



核技术应用

## 纳米科学技术——面向二十一世纪的新科技

李民乾 青年学术研讨小组

(中国科学院上海原子核研究所 上海市 201800)

**摘要** 介绍了一门崭新的面向二十一世纪的新科技——纳米科学技术,它的发展历史、现状与展望,它在电子学、材料科学、生物学、工程学和机械学方面的应用,也讨论了与其相关的科学技术,对今后的研究方向提出若干建议。

**关键词** 纳米科学技术,扫描隧道显微镜,纳米电子学,纳米生物学,纳米工程,纳米材料科学。

### 1 引言

著名物理学家理查德·费曼在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、面向二十一世纪的科学技术——纳米科学技术(Nanometer Scale Science and Technology, 简称为 NanoST)已经诞生了,这对生产力的发展将产生深远影响,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。

纳米科学技术是指在0.1~100纳米(nm)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、基础研究和应用紧密联系的新的科学技术。它是基础科学(介观物理、分子生物学、化学等)和先进工程技术(包括计算机和扫描隧道显微镜技术等)结合的产物。NanoST又引发一系列的新科技,包括纳米电子学、纳米光学、纳米工程、纳米制造学、纳米材料科学、纳米生物学及医学等纳米科技。

NanoST将抽象的量子力学理论变化为Nanoscope的设计原理,变化为Nano电子学器件活生生的工作基础。在这Nano世界中人们还要用到混沌(Chaos)这个概念。NanoST是人类改造世界的又一次长征。

### 2 NanoST的发展简史

NanoST的源头可以追溯到五十年代末美国物理学家理查德·费曼的理想:逐级地缩小生产装置,以致最后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。在70年代,科学家从不同角度提出了许多有关NanoST的设想,但都比较零乱,不成系统。至1977年麻省理工学院的K. E. Drexler作了认真的思考,认为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,并将其命名为纳米技术。70年代末德雷克斯勒访问斯坦福大学,成立了NanoST研究组。1982年扫描隧道显微镜(STM)为G. Binnig和H. Rohrer所发明,以空前的分辨率为我们揭示了一个“可见”的原子和分子世界。在80年代末,STM已发展成为不仅是一个观察的手段而且是一个可排布原子的工具<sup>(1)</sup>。STM的出现,被公认为对NanoST的诞生起到了根本性的推动作用。

NanoST从提出以来(1959年R. Feynman)经过了三十年的酝酿和准备,在STM发明的直接推动和其它研究微观世界的新技术发展的促进下,NanoST终于在1990年诞生了,其主要标志是:

(1) 第一届国际纳米科学技术会议于1990年7月在美国巴尔的摩召开。

(2) 两种专业国际刊物已经出版, 一种是《Nonotechnology》, Vol. 1, No. 1 于 1990 年 7 月出版, 另一种刊物《Nanobiology》于 1991 年 3 月出版。

(3) 冠以纳米 (Nano) 的新名词、新概念不断出现, 例如纳米电子学 (Nanoelectronics)、纳米材料 (Nanometer Scale Materials)、纳米显微学 (Nanoscopy)、纳米加工 (Nanometer machining) 和纳米生物学 (Nanobiology) 等。

(4) 已有日本和英国等少数科技先进国家制订了发展 NanoST 的国家规划。美国自然科学基金会将 NanoST 作为优先支持项目, 美国 Stanford 大学早就成立了 NanoST 研究中心。

### 3 为何要发展 NanoST? NanoST 的现状和展望

#### 3.1 为何要发展 NanoST?

NanoST 在刚刚提出时, 确是一个富于幻想色彩的理想, 如今它不仅有了发展的迫切需要而且也有了实现的可能。NanoST 将引起关心人类命运的科学家的严肃思考。

人类今天已有五十多亿人口, 面临着许多刻不容缓的问题。例如, 怎样防止生态平衡因地球人口增长过快和继续进行普遍工业化而遭到破坏? 怎样提高经济效益、减少原材料和能源的消耗? 怎样提供足够的粮食和保障人类健康? 等等。这些问题的解决在很大程度上要依靠科学技术的进步。我们知道自有人类文明至今, 生产活动一直是利用天然材料 (矿物、动植物) 进行的, 这就不可避免地会在生产过程中造成原料和能源的浪费, 会破坏生态平衡, 污染环境。假如人们能直接利用原子、分子进行生产, 这将是一个质的飞跃。这将改观人类的生产方式和空前地提高生产力, 并有可能从根本上解决上述由于老的生产活动模式所不可避免地带来

的一系列严峻问题。纳米科学技术正是引导人类通向这个新的“纳米时代”。

另外, 从军事角度看, 发展 NanoST 将会在军事领域内产生许多革命性成果, 它对世界安全的作用将如同 30 年代发展原子弹一样, 因此不可掉以轻心。

#### 3.2 NanoST 的现状与展望

NanoST 并不是空中楼阁。两年前, 不仅是一般的, 而且包括那些从事 NanoST 研究的科学家在内, 都认为 NanoST 虽然前景诱人, 但仍有一段漫长的路要走。可是近一两年的发展速度和达到的水平, 都远远超出了人们的想像<sup>(2)</sup> (以 nm 级蚀刻与原子分子操纵技术为例, 见表 1)。Mark Grubrud 在 1990 年 5 月曾预言, 单原子分子水平的操作将会在近十几年内实现, 并认为这已是很乐观的估计了。然而仅几个月后, IBM 公司的科学家就把这一幻想变成了现实<sup>(1)</sup>。

##### 3.2.1 NanoST 的支撑技术之一——STM 技术

STM 是 1986 年诺贝尔物理奖获奖项目。它具有空前高的空间分辨率 (横向可达 0.1nm, 纵向可优于 0.01nm)。它能直接观察到物质表面的原子结构, 从而实现了希望看到原子真面目的愿望。由于 STM 具有原子级的空间分辨率和广泛的适用性, 国际上掀起了研制和应用 STM 的热潮, 并推动了纳米科学技术的产生。在我国中科院化学所、北京电子显微镜实验室和北京大学也先后建立了 STM。上海原子核所于 1989 年初研制成国产化的数字化的 STM (SINR-I 型 STW)<sup>(6)</sup>。现在全国已有十几家 STM 实验室。

STM 从两个方面奠定了 NanoST 的基础。第一, 它可直观地观测到 nm 世界, 并能获取 nm 尺寸的有关电子态、几何形貌、原子和分子作用力等大量物理化学信息。第二, 它可以在 nm 尺度上改造世界。下面分别加以介绍。

表 1 1990~1991 年 nm 级加工与操纵水平

类 别	说 明
(1) 单原子操纵 <sup>(1)</sup>	液氮温度、高真空
(2) <10nm 级的蚀刻技术	多种材料、真空、大气, 已比较常规
(3) 单原子蚀刻 <sup>(3)</sup>	常温、高真空
(4) nm 级存储历史文献 <sup>(4)</sup>	集成度比现行技术高 10 <sup>8</sup> 倍
(5) 单原子开关 <sup>(2,5)</sup>	峰谷比 9:1, 可重复

3.2.1.1 直观可见的原子、分子世界

STM 第一次使人类可以直接地观察到固体表面的原子图像. 自 1981 年 STM 问世

以来, 短短十年间 STM 技术以及基于 STM 发展起来的相关技术得到了迅猛发展. 表 2 显示了当前 STM 的发展水平.

表 2 STM 技术发展水平

性 能 分 类	水 平
分辨率	常规, 纵向 0.1 埃, 横向 1 埃, 最高水平纵向 0.01 埃
工作条件	真空, 大气, 水溶液, 高温 (>900℃), 低温 (4K)
扫描速度	1mm/s 可表现动态观察 (原子分子吸附, 血红蛋白凝聚, 病毒穿过细胞膜)
相关技术及能获取的信息	见表 3

STM 是面向二十一世纪的高技术产品, 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彩多姿的原子和分子世界.

3.2.1.2 对 nm 世界的改造

STM 不仅是观察的工具, 而且也是改造世界的工具. 通过 STM 针尖与样品的相互作用, 人们可以在 nm 尺度上对物质进行改性、操作. 用 STM 可以把一幅简化世界地图画在小于 1μm×1μm 的区域内<sup>(6)</sup>. 利用 STM 在低温 (4K) 真空下在镍表面排布 Xe 原子的 STM 图像, 显示了人类按需排布一个个原子的可能性. 在室温下原子级的蚀刻是向实用化更迈进了一步.

传统的方法对 nm 区域以及原子分子的改造是通过对宏观体系的调节而实现的. 例

如, 化学合成新分子的方法, 是对大量的分子进行宏观操作, 它虽然能创造出许许多多的新物质, 但毕竟还是有限的. 而对单个原子分子的操作成功后, 其前景不可估量.

NanoST 是一门崭新的科学技术, 这可以从两个意义上来讲. 科学技术包括两个方面, 一是对自然的观察和分析, 二是对自然的改造. 人类在第一个方面的进程, 并不是连续的. 虽然早已深入到原子以及原子核层次, 但在宏观与微观的连接区, 即所谓介观区域 (100nm~0.1nm) 仍存在较大的空白. 可以说 NanoST 目前正在填补这一空白. 在对自然的改造方面, 六十年代至七十年代以微电子技术为代表的科学技术使人类改造世界的水平延伸到了 μm 层次, 它带来了信息革命. 现在 NanoST 又在此基础上推进了一步, 它使人类

改造世界的尺度第一次延伸到了 nm 层次, 是人类改造世界的一次飞跃。

NanoST 是一门多学科的、基础研究与应用研究紧密相连的新学科, 由它会引发如下许多新的领域。

### 3.2.2 纳米电子学 (Nano electronics)

根据目前常规微电子学技术的发展趋势, 预计 21 世纪初元件最小尺寸可能小于  $0.1\mu\text{m}$  的水平<sup>[9]</sup>, 然而目前的微电子理论至此也就失败了。在纳米尺度上, 电子以波动性为主。Nano electronics 必须利用量子力学效应, 例如隧道效应或共振隧道效应。

目前 Nano electronics 理论上已作了较为广泛和深入的探讨, 并且已研制出了一些基本的器件, 例如共振隧道二极管, 它的伏安特性曲线中峰谷比为 23:1, 足以构成下一代的 Nano 器件。另外, 量子耦合器件 (Quantum coupled devices)、量子共振隧道传输器、量子导线等也已问世。这些器件高速、低耗、在常温下工作、集成度高和经济可靠, 必定会引起电子学的革命。

然而目前的 Nano 电子器件基本上是分立的, 高集成度的 Nano 电子器件取决于刻蚀技术的发展。根据现在微电子学的刻蚀技术发展状况, 以及新的刻蚀技术 (例如 STM 刻蚀技术, 线宽在实验室中已达到单原子级) 的发展趋势, 可望在 2010 年达到线宽  $0.01\mu\text{m}$  的水平<sup>[9]</sup>。

寻找或合成一种特殊分子, 使其具有特殊的电气功能, 这样就可以用一个分子来代替一个电路元件。现在已经找到了一种记忆分子, 它具有开关功能<sup>[10]</sup>。这方面的发展也很引人注目。美国与日本已经开始了用原子、分子直接制造电子线路的合作研究。单原子的开关在实验室已经做出<sup>[5]</sup>。

Nano electronics 的发展, 不仅在一般意义上的信息处理领域引起革命性进展, 而且通过把电路与传感、传动装置集成在一起, 可以实现特殊用途, 例如制造可以取代人体的

一些特殊器官 (耳蜗、视网膜等) 的微系统, 以及研制能诱导神经元修复的集成芯片之类的“意识技术”。

### 3.2.3 纳米材料科学 (Nanometer Material Science)

这是发展最早研究最深入的一个领域。由于国内在这方面作了许多工作, 这里就不详细介绍。纳米材料科学的研究应当注意同其它纳米科学领域的协作, 比如与生物学的合作研究。已经发现纳米尺寸的陶瓷粒子比通常用作蛋白载体的微米级聚苯乙烯粒子具有更大的优越性。它不会影响蛋白的形状, 从而使蛋白保持原有功能。用纳米陶瓷粒子作载体的病毒诱导物已取得成功, 目前正用于临床动物实验。

以加速器为基础的核分析技术包括: SPM、PIXE、RBS、DRA、AMS、IC 等在材料的 Nano 结构研究中起着重要的作用。凭借这些方法, 辅以 SEM、TEM、Auger/ESCA、XPS 等其它设备, 美国北德克萨斯大学建立了以 Nano 结构为对象的材料研究中心, 并称该中心将使美国在先进材料研究中保持竞争能力。

### 3.2.4 纳米生物学 (Nanobiology)

纳米生物学是研究在纳米尺度上的生物反应机理, 其中包括修复、复制和调控等方面的生物过程, 并根据生物学原理发展分子工程, 主要包括纳机器人和纳信息处理系统。

当今的生命科学研究的焦点是生物大分子的结构与功能, 用 STM 可对单个的生物大分子进行直接观测, 在纳米尺度上获取生命信息, 特别是细胞内的信息, 利用微电子或纳电子工艺方法, 将生物系统和微机械系统有机地结合起来, 建造纳机器人, 可进行全身健康检查和治疗, 包括脑血栓的疏通, 清除心脏动脉脂肪沉积物等。

当前国内纳生物学的研究方向包括: (1) DNA 形态多样性的研究, (2) DNA 结构多样性的量子生物学研究, (3) DNA 序列

AFM 分析探索研究, (4) 若干蛋白酶的表面结构研究, (5) DNA 复制过程的研究, (6) 真核基因调控区局域高级结构的研究.

### 3.2.5 纳米工程、机械学

作为多学科的并协调发展, 纳米工程机械也是不可缺少的. 现仅对作为动力和定位的纳米马达作一简单介绍.

纳米马达已有两种构造实现了 nm 驱动和定位. 一种是基于线性马达的 Yoshida 系

统, 有 1nm 的定位精度和 200mm/s 的速度. 另一种是基于压电陶瓷管的 Inchworm (毛毛虫) 装置, 以步进方式很容易达到 1nm 的定位.

从 STM 出发可以发展一系列的 STM 装置 (见表 3), 很多可用于纳米尺度的装配加工和印刷术. 针尖与表面的各种相互作用方式均可构成原子工艺的基础. 有关纳米级刻蚀的进展见表 1.

表 3 STM 及它的后代

名称	作用力性质	分辨率 (Å)	功能
STM	电力、量子隧道	1	导体表面形貌
AFM 原子力显微镜	表面斥力	<10	导体、非导体形貌
FFM 摩擦力显微镜	碰撞力	2	了解润滑摩擦过程
MFM 磁力显微镜	磁力	200	观察磁场分布
EFM 静电力显微镜	电力 (吸或斥)	2000	半导体参杂离子分布
AMFM 吸引力显微镜	引力和表面张力	100	集成电路制造
SThM 扫描热显微镜	电热转换	100	表面温度分布
OAM 光学吸收显微镜	原子的特征吸收	10	表面化学组份
SEM 扫描离子导电显微镜	离子流	亚微米	细胞膜中离子输运过程
SNOM 扫描近场光学显微镜	光衍射、反射	300	观察生物结构
SSM 扫描声波显微镜	声波反射、衍射	300	材料断裂情况
MDM 分子蘸棒显微镜	表面张力和内部排斥力	5	测量薄膜厚度

另外, 作为核技术的低能离子、原子束也是表面纳米溅射抛光的重要手段, 光洁度可达 nm 级, 亚微米离子束加工和单粒子加工等核技术都是新近发展起来的 Nano 加工方法<sup>(11)</sup>.

其它一些分立的 Nano 装置已经成功, 如纳米电极、纳米光源、纳米温度计及其它纳米传感器等.

以上所列的装置在整体尺寸上都是宏观量级的, 今后 Nano machine 的发展方向是将它们缩小到 nm 级. 其中第一步是利用现有的微电子技术制造出 μm 级的装置, 然后在此基础上发展 Nano 装置. 这里必须指出的是, 纳米机器的设计原理与宏观机器是完全

不同的. 像摩擦、润滑、振动等机械问题在 nm 尺度上必须重新考虑. 所以, 有必要建立和发展相关理论.

## 4 发展 NanoST 的相关科学技术

NanoST 的诞生完全基于现代科学的进展上, 从出版物数量为标准总结与 NanoST 研究相关的各种科学技术, 包括: 紫外、核效应、离子束、中子衍射、同步辐射 X 射线、精密机械、电子束与 TEM 电镜和扫描隧道显微镜等, 60% 以上的 NanoST 研究运用了 STM 和核分析技术.

## 5 NanoST 是核分析技术开放实验室的战略发展方向

在纳米材料方面已有有关国家实验室予以关注<sup>[12]</sup>, 但就 NanoST 总体而言在我国尚属空白, 我们应当予以重视开拓, 特别是因为我国的人均资源较贫乏, 而发展 NanoST 的投入产出比可能高于其它高科技, 我们更应及早开展 NanoST 的研究.

新发展的核分析技术大都可以直接用于研究 Nano 现象. 例如扫描质子微探针 (SPM) 可用于微区元素分布、深度分布分析, 亚微束加工及单粒子加工等; 超高真空靶室用于表面研究; 低能离子束的表面溅射抛光, 微束 AMS 的微区元素谱分析, 穆斯堡尔及正电子效应等核效应分析在纳米材料研究中都可大显身手.

NanoST 诞生的 STM 技术已有基础, 并在国际、国内合作方面有了良好的开端. 未来 STM 技术发展要求超高速 (nm 信息存取、多路信息获取、动态观察等) 和超灵敏 (pm 级纵向分辨率等), 在这方面, 可以直接利用核电子学技术的特长.

NanoST 的理论基础是介观物理、量子物理、混沌物理等, 它又是一门综合性的多学科的科学技术, 正好发挥原子核所之长, 可综合物理、化学、工程和电子学各方面的力量, 共同研究.

近期内拟与有关单位合作重点开展三方面的工作:

### (1) 纳米材料及纳米材料结构研究

由水化  $\text{SiO}_2$  纳米颗粒形成的硅溶胶是催化剂或催化剂载体. 例如用 40%  $\text{SiO}_2$  粒径为 20nm 的硅溶胶可制成丙烯腈催化剂载体. 不同粒径的硅溶胶在无机粘结剂、制备高强度陶瓷材料、高级涂料等方面均有很大用处. 用 STM 可观察 nm 颗粒的粒径、质量分布等.

利用 STM 的局域信息获取功能, 可以对单个纳米粒子进行物性测量. 这是以往传统手段无法实现的.

等规聚苯乙烯 UFP 的 STM 研究和  $\text{ZrO}_2$  等精细陶瓷的研究.

纳米级的  $\text{ZrO}_2$  颗粒可构成有延展性的、强度比普通陶瓷高几个数量级的精细陶瓷材料.

### 高 $T_c$ 超导材料的纳米结构研究.

应用多种核分析技术 (包括离子束分析和核效应分析) 可开展广泛的纳米结构研究. 例如, 纳米材料反应率和合金形成的动力学研究. 由于纳米材料扩散率和反应率与晶态及非晶态材料不一样, 往往可以用比较低的温度使纳米材料 (二元、多元) 起反应. 因此我们可以挑选具有较大负混和热体系, 例如 Fe/Ti、Ni/Ti、Fe/Zr 和 Ni/Zr 等, 制备各种状态样品 (多晶、非晶和纳米), 然后比较它们固相反应和离子束混和所形成合金的规律差异, 用 RBR 来验证反应动力学, 用穆斯堡尔来检查 probe 原子反应微观特性, 看不同晶态样品原子临近结构差异, 用正电子湮灭来观察材料反应时内部缺陷空洞的收缩和消失行为.

由于纳米材料具有较大晶界体积分数, 因此它们杂质偏析行为与晶态、非晶态是不一样的, 我们可挑一些固浓度较低的体系, 让它们形成纳米结构的晶态结构的过饱和溶液, 然后在热处理中让杂质偏析出来, 这样可用核效应来观察 probe 原子周围结构差异和空位缺陷对偏析的影响.

### (2) 纳米生物学 (Nanobiology) 研究

生物学的突破往往以方法学的突破为先导. 我们已经与北京化学所 STM 实验室提出了“STM 在表面、界面以及生物大分子结构研究中的应用”研究项目. 研究集中在 Nano-生物学的基础研究方面, 包括:

• DNA 结构的 STM 研究 (新 DNA 构型的发现, 局域结构与序列的相关性等)



· 蛋白质和 DNA 复合物, DNA、RNA 复制过程的 STM 研究

- Super STM 的研制和实验室建立
- 固氮基因的 STM 研究
- 癌基因的探索性研究

(3) 纳米工程学研究, 包括: 纳米级刻蚀及加工研究; 纳米区域图像实时自动识别系统研究; Nano robot 的预研究; 吸引式激光原子力显微镜。另外, 我们还计划开展 Nano 马达 (Inchworm) 的研制和开发。这不仅对 Nano 生物学, 而且对其它 NanoST 分支均很重要。清华大学已作出夹放式纳米驱动器, 我们也研制成功了冲击式的纳米驱动器, 进一步的工作将考虑协作研究, 并与有关大学、工厂合作。

## 6 建议与展望

NanoST 的重要性毋庸置疑, 美国、德国、日本和英国都已开展 NanoST 研究。英国已投入 350 人 (来自 128 个公司), 有 5 个研究课题, 至 1992 年将有 17 个项目, 投资为 12.8 百万英镑。日本有 12 个与 NanoST 相关的新技术项目, 投资 1.87 亿美元专门发展 NanoST 研究。我国在 1990 年 3 月召开了纳米固体讨论会, 但尚未作出规划。因此, 我们提出一些建议。

### 6.1 发展 STM 技术及相关技术

STM 技术在我国已有相当的基础, 并且有一定的国际水平。然而目前还未从 NanoST 角度来引导 STM 技术的发展。由于 STM 技术是 NanoST 的支撑技术, 因此, 希望能在短期内 (1~2 年) 促使几家主要的 STM 实验室开展系统的 NanoST 研究。这主要包括:

(1) STM 的改进, 下一代 STM、AFM 的研制。

(2) STM 和 AFM 的观察应用, 重点是材料表面原子结构和 DNA 与生物大分子的结构研究; AFM 对光栅、光盘制造的工业应

用等。

(3) STM 和 AFM 的原子、分子加工研究。主要是在材料和生命科学领域以及电子学领域内的可能应用。

### 6.2 促进微系统研究, 鼓励把微电子的集成电路技术应用于机械、传感器、光学和生物学等领域

这不仅仅是为 NanoST 提供技术基础 (例如, 超高速 STM 所需的微针尖、微驱动器等等), 它本身的发展也将带来巨大的经济效益。

### 6.3 调整现存的部分核技术力量, 建立一个能适应 NanoST 需要的核技术中心

我国核科学技术领域人员众多, 素质好, 而核技术本身在 NanoST 中占有重要比重。核技术的一些基本技术, 如高真空技术、核电子学技术等都是将来 NanoST 发展的基础。因此, 可以设立一个适应 NanoST 研究的核技术中心。

### 6.4 深化纳米材料科学的研究, 并强调与其它纳米技术的联合

### 6.5 对我国如何开展 NanoST 研究进行专题研究

由于 NanoST 涉及许多学科, 旧有的研究模式已不能适应它的需要。

美国 NSF 于 1989 年专门资助一个研究小组, 探索在美国发展 NanoST 的模式, 其中提到联合实验室 (Colaboratory) 可能最适应 NanoST 的发展。而日本则对科学城筑波的科技力量作了重新调整, 以超级实验室和交叉科学研究中心为模式开展 NanoST 研究。

如何根据我国现状和特点, 协同各路力量开展我国 NanoST 整体研究, 并不是一个很简单的问题, 建议将此作为一个专题进行研究。在一两年内给出实施方案。

### 6.6 立即开展 NanoST 的预研究

由于 NanoST 目前发展很快, 为了保持一定的水平, 有必要对 NanoST 的一些基础技术, 如 STM 技术等, 率先进行预研究, 建

立起专门适用于 NanoST 的 STM 系统. 其它领域也可以开展相应的工作, 为 NanoST 整体研究正式启动做准备.

在本工作中我们得到了许多同志的热情帮助, 为此特向杨富家、唐孝威、杨威、白春礼、陈皓明、王汝笠、沙振元、汪勇先、艾小白、诸顺算、盛康龙、朱德新和张桂林先生以及中科院计划局战略远景规划处各位同志表示感谢.

### 参 考 文 献

- 1 Eigler D M, Schweizer E K. *Nature*, 1990, 344: 524
- 2 Quate C F. *Nature*, 15 August, 1991, 352: 571
- 3 *New Scientist*, 26 Jan. 1991, 31
- 4 *New Scientist*, 24 August, 1991, 22
- 5 Eigler, et al. *Nature*, 15 August, 1991, 352: 600
- 6 李民乾, 朱节清, 胡 钧等. *自然*, 1989, 9: 714
- 7 Burns M M, et al. *Science*, 1990, 249: 749
- 8 Marmin H J. *J. Vac. Sci. Technol.*, B. V9112, Mar./Apr. 1991, 1399
- 9 Bate R J. *Nanotechnology*, 1990, 1 (1): 1
- 10 国外科技消息, 1991, 7: 3
- 11 Fischer B E. *Nucl. Inst. Methods in Phys. Res.*, March, 1991
- 12 “纳米固体研讨会论文集”, 中国合肥 (1990年3月26—28日)

## Nanometer Scale Science and Technology

### ——The New Science and Technology Facing the 21st Century

Li Minqian, the Society of Young Scientists

(Shanghai Institute of Nuclear Research, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract** The brand—new science and technology facing the 21st century——Nanometer scale science and technology is introduced. It's history of development, current situation and prospect are mentioned. It's application on electronics, material science, biology, engineering and mechanics is discussed. The related science and technology is also discussed. Some suggestions for the future study are raised.

**Key Words** NanoST, STM, Nano electronics, Nanobiology, Nano engineering, Nanometer material science.