

# 纳米测量仪器和纳米加工技术

姚骏恩

(中国科学院北京科学仪器研制中心, 北京 100080)

**【摘要】** 纳米科技是当今国际上的一个热点。文章对纳米科技作了简要介绍, 纳米测量和加工是纳米科技中的一个不可缺少的重要组成部分。叙述了发展纳米测量和纳米加工技术的两个主要途径: 一是发展传统技术, 主要是电子显微术以及最近发展起来的聚焦离子束(FIB) - 电子束数控加工中心; 二是创造新的测量仪器, 建立新原理和新方法, 介绍了国内外电子显微镜和扫描探针显微镜这两类纳米测量分析仪器的发展、应用和生产现状。指出我国电子显微仪器和扫描探针显微镜的开发和生产面临困境, 应尽快建立和加强自己的电子显微仪器和扫描探针显微镜等纳米测量和纳米加工设备制造产业, 并列入国家科技发展规划。

**【关键词】** 纳米科技; 纳米测量; 电子显微镜; 扫描探针显微镜; 聚焦离子束 - 电子束装置; 仪器生产

**【中图分类号】** TN16; TN405; TB838 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1009-1742(2003)01-0033-05

## 1 纳米科技是当今国际上的一个热点

纳米科技是20世纪80年代发展起来的一门新兴科学技术。一个纳米是十亿分之一米, 已接近原子尺度(0.2~0.3 nm)。纳米科技涉及的尺度通常是100 nm以下, 直到原子尺寸。在这种尺度上对物质和材料进行研究和处理的科学技术称为纳米科技。纳米科技实质上就是一种从原子、分子开始制造材料和产品的科学技术; 也可以说是在1~100 nm范围内认识和改造自然的科学技术, 是一个交叉综合学科, 是一个前沿基础学科和高技术融为一体的完整体系。钱学森早在1991年就指出, 纳米左右和纳米以下的结构将是下一阶段科技发展的一个重点, 会是一次技术革命, 从而将是21世纪又一次产业革命。目前所有的发达国家都对纳米科技的研究、开发投入大量人力物力, 试图抢占这一21世纪战略制高点, 它可给包括生物技术在内的几乎所有工业领域带来一场革命性变化。

## 2 当今高技术的核心乃是半导体芯片技术

当今高技术的核心乃是半导体芯片技术, 发展的关键是进一步微型化。元件的尺寸由毫米到微米仍可用传统的科学和技术; 从微米到纳米功能元件, 尺寸缩小到纳米级, 即由有限个原子构成基本功能元件, 再由这类新元件组成更复杂的器件, 表征这种纳米功能元件的参量具有显著的量子效应和统计涨落特性, 就必须发展新理论、新技术和新材料。于是纳米电子学就应运而生。芯片的集成度以每18个月硅片上功能元件数增加1倍的速度增加。元件的尺寸越小, 芯片的功能越强。商用芯片的线宽在2001年达到0.13~0.10  $\mu\text{m}$ , 现已开始0.10  $\mu\text{m}$ 的竞争, 估计2004年大部分半导体制造企业都会采用0.10  $\mu\text{m}$ 以下的制造工艺<sup>[1]</sup>。

## 3 21世纪将是生命科学的世纪

现今生命科学已经从描述性、实验性科学向定量科学过渡, 研究的焦点是生物大分子, 尤其是蛋

白质和核酸发展的机构与功能。纳米生物学是在纳米尺度上研究生物的反应机理,包括修复、复制和调控等方面的生物过程,以对分子的操纵和改性为目的;发展分子工程,主要包括纳米尺度的机器人和信息处理系统。由于扫描隧道显微镜 (STM)<sup>[2,3]</sup>和原子力显微镜 (AFM)<sup>[4]</sup>等扫描探针显微镜 (SPM),可给出生物分子在大气或液体条件下的自然状态、或接近自然状态的纳米结构图像,并具有高度的直观性以及三维表面信息,已成为研究生物大分子高级结构及其对功能影响的理想工具。现在 STM/AFM 的视野可从几纳米到 100 $\mu\text{m}$  量级,使得观察巨大分子甚至细胞的全貌成为现实。研究对象也从最初的 DNA 迅速扩大到包括细胞结构、染色体、蛋白质、膜以及 DNA 和蛋白质的复合物等生物学的大部分领域。更为重要的是,SPM 不仅可作静态观察,还可实现动态成像,在分子水平上了解系统的生物活性,并由单纯观察发展为纳米尺度上直接对生物大分子的操纵和改性(例如对 DNA 分子进行改性),按分子设计制备具有特定功能的生物零件、生物机器,将生物系统和微机械系统有机地结合起来。这种技术的诱人之处是有可能把具有多种功能的微型机器注入人体血管内,进行全身健康检查和治疗,如疏通心、脑血管中的血栓,将基因或药物输送到癌细胞和器官,达到直接治疗的目的。

#### 4 纳米测量学和纳米加工

综上所述,无论是纳米电子学还是纳米生物学等纳米科技,都涉及对纳米尺度物质的形态、成分、结构及其物理/化学性能(功能)的测量、表征,形成了纳米测量学。这是人的眼睛和双手在纳米世界的延伸。由此可见,纳米测量学在纳米科技中起着信息采集和分析的不可缺少的重要作用。纳米加工是纳米尺度制造业的核心:一是,对宏观材料从大到小进行纳米级的超精加工;另一是,按人们的设计,从小到大直接对原子、分子进行操作、沉积和迁移来制造各种功能材料、元器件。发展纳米测量学和纳米加工主要有两个途径:一是发展传统技术;二是创造新技术,建立新原理和新方法<sup>[5]</sup>。

##### 4.1 发展传统技术

发展传统技术,主要是电子束、离子束和光子束技术。现在高性能透射电子显微镜 (TEM) 和

扫描电子显微镜 (SEM) 的分辨本领分别达到了 0.1~0.2 nm 和 0.6~3.0 nm,从单纯的显微放大发展为:集物质动态观察、化学成分和结构的分析以及研究与其宏观性能(功能)之间的关系于一体的常规精密仪器<sup>[6,7]</sup>,已广泛用于表征、分析纳米材料和生物大分子的微结构。纳米颗粒、纳米线、纳米管、纳米棒等新型纳米材料的表征和最终确定,主要依靠电子显微技术。目前,电子显微镜市场也发生了改变,原来的主要用户是大学和研究单位,现在很多企业也成为买主。特别是扫描电子显微镜,及在此基础上发展起来的专用大规模集成电路测试设备,甚至透射电子显微镜都已应用于半导体集成电路生产线进行失效分析,提高了成品率<sup>[8]</sup>。

加工制造微米/纳米器件时,常规的车、铣、刨、磨、钻、钳等传统加工技术已无能为力。最近开发出的聚焦离子束-电子束双束纳米加工中心 (dual beam focused ion beam system),用高强度聚焦离子束对材料进行纳米加工和扫描电子显微镜实时观察,开辟了从大块材料制造纳米器件、进行纳米加工的新途径。这种纳米加工中心已用于半导体集成电路生产线,直接修补、加工集成电路,大大提高了生产率<sup>[8]</sup>。

现在,自电子显微镜发明以来一直影响其分辨本领的电磁透镜球差已可减小到接近于零,采用高亮度场发射电子枪及电子能量过滤器,发展 X 射线能量色散谱和电子能量损失谱、电子衍射、低温和环境试样室、计算机控制和图像处理等技术,电子显微术正面临新的突破<sup>[6]</sup>。

##### 4.2 创造新的测量技术,建立新原理和新方法

科学技术上的重大成就往往是以测量仪器和技术方法的突破为先导的。诺贝尔奖设立的百年来,已约有 40 人次由于在仪器研制和技术创新方面的贡献获得了诺贝尔奖。例如,英国克卢格 (A. Klug) 博士将付里叶变换方法与电子显微学结合,发展了晶体电子显微学——付里叶电子显微学,开辟了研究生物大分子三维重构的新途径,使人们对生命至关重要的核酸-蛋白质复合体的晶体结构和功能有了较细致的了解。为此,克卢格博士获得了 1982 年的诺贝尔奖化学奖<sup>[9]</sup>。

1982 年卢雷尔 (H. Rohrer) 与宾尼 (G. Binnig) 博士发明了扫描隧道显微镜,为人类在原子级和纳米级水平上研究物质表面原子、分子

的几何结构及与其电子行为有关的物理、化学性质开辟了新的途径。作为纳米测量强有力的工具，在扫描隧道显微镜基础上发展起来的原子力显微镜、磁力显微镜、静电力显微镜、电化学扫描隧道显微镜、光子扫描隧道显微镜（PSTM）、扫描近场光学显微镜（SNOM）等扫描探针显微镜（SPM），以及各种谱学分析手段与其相结合的新纳米测量技术已相继出现，推动了纳米科技的兴起和发展。利用各种物质针尖获得有关试样表面信息的技术也可称为针尖技术（近场技术）。为此，三位纳米测量技术的主要开创者——STM的发明人卢雷尔与宾尼博士和制造世界上第一台电子显微镜的鲁斯卡（E. Ruska）教授，分享了 1986 年诺贝尔物理奖<sup>[10]</sup>。

扫描探针显微镜已广泛用于基础科学研究和工业生产，成为纳米科技，包括纳米生物科技在内的常规基本工具。利用扫描隧道显微镜、原子力显微镜还可研制纳米级电子（量子）器件，实现原子操纵<sup>[11]</sup>，进行纳米加工<sup>[12]</sup>，其市场前景及在未来国民经济中的作用非常巨大。特别是 1996 年以来，IC 及光盘工业已大量采用 SPM 作为测量及质量控制的手段，为 SPM 在工业界开辟了市场。据预测，SPM 在工业界的市场将大大超过其在科研与教学领域。SPM 已超越了作为一种认识世界的工具——显微镜的意义，而成为能创造财富的纳米机器。欧共体在 1995 年专门成立了国际专家小组，对 SPM 在以 IC 为主流的高科技产业中的应用价值及前景作了全面总结，认为可以大大提高 IC 的生产质量及效率。SPM，特别是 AFM，由于价格适当，将在实验室中与光学显微镜一样，得到广泛应用。

正因为如此，自 1987 年 SPM 开始商品化以来，十几年间 SPM 本身已形成了一个颇具规模的新兴产业。美国 DI 公司到 1997 年底已销售了 2 600 台 SPM，1997 年度的销售额为 5 000 万美元。全世界的总销售量约为 DI 公司的 2 倍。目前 SPM 国际市场约为每年 1 000 台（1~2 亿美元），并仍处于继续增长阶段。

SPM 的相关技术已开始扩展为以近场相互作用为基本原理的传感器技术群，正在汽车、通讯、航天及军事领域中取代传统的传感技术，这又为 SPM 产业的发展提供了更为广阔的空间。

## 5 我国电子显微镜、扫描探针显微镜的开发和生产<sup>[13~15]</sup>

### 5.1 透射电子显微镜

1958—1959 年中国科学院长春光学与精密机械研究所开创了我国的电子显微镜制造事业。在完成了我国第一台中型电镜后，又自行设计研制了大型电子显微镜。1964 年长春光机所的电子显微镜研究室转并到在北京的中国科学院科学仪器厂（后为中国科学院北京科学仪器研制中心，北京中科科仪技术发展有限公司，KYKY），先后研制生产了两种高分辨 100 kV 透射电镜（TEM）。上海精密医疗器械厂（后为上海电子光学技术研究所）成批生产了 100 kV TEM，开发了 120 kV 透射电镜，组装了日本 JEOL 公司的 200CX 型 TEM，1989 年又研制成我国首台 200 kV 透射电镜。1959 年起江南光学仪器厂（现江南光电集团）批量生产了几种普及用的透射电镜，1985 年起引进日本日立公司 H600A 型高分辨透射电镜制造技术，1993 年实现了国产化并投入生产。这三个单位共生产了 300 余台透射电镜。

### 5.2 扫描电子显微镜

1975 年中国科学院科学仪器厂开发了我国第一台扫描电镜，并投入小批生产。此后，江南光学仪器厂、上海电子光学技术研究所、上海第三分析仪器厂等也生产了各种扫描电镜。中国科学院科仪厂，在 80 年代引进美国生产技术的基础上，批量生产了多种微机控制的 KYKY 系列扫描电镜约 200 台。全国共生产了 700 余台扫描电镜。

### 5.3 扫描探针显微镜

1987 年依托在中国科学院北京科学仪器研制中心的中国科学院北京电子显微镜（开放）实验室研制完成我国第一台扫描隧道显微镜。此后，北京大学、中国科学院化学研究所、上海原子核研究所等 10 余个单位也先后制成了 STM，化学所研制成我国第一台原子力显微镜，中国科学院北京电镜实验室又和大连理工大学物理系首先在我国研制开发了光子扫描隧道显微镜。中国科学院电工研究所北京机电设备公司、本原显微仪器开发中心和上海爱建纳米科技发展有限公司等，正在生产扫描探针显微镜。估计全国至今共制造生产了 100 余台扫描探针显微镜。

根据 1996—1997 年国家科委组织的一项调查，

当时我国拥有 1 921 台电子显微镜, 包括透射电子显微镜 756 台, 扫描电子显微镜 1 165 台。其中, 进口 915 台, 占 47.6 %; 国产 1 006 台 (透射电镜 316 台, 扫描电镜 690 台) 占 52.4 %。应该指出的是, 我国生产的数量虽与进口的相当, 但大都是中低档产品。中国科学院北京科学仪器研制中心 KYKY、上海电子光学技术研究所和江南光学仪器厂生产的占国产 1 006 台中的 95 % 以上。

全世界现有各种电子显微镜约 5 万台。2001 年由于我国科技经费大量增加, 特别是加大了对纳米科技的投入, 进口电子显微仪器的数量由以前的每年二三十台猛增到 100 台左右, 销售额估为四五千万美元, 占世界年销售量 3 千台的份额由 1 % 增加到 3 %。国产中档扫描电镜在数量上约占 10 %, 而这 10 来台扫描电镜的销售额却仅相当于 1 台进口高分辨场发射透射电镜的价格。

回顾我国电子显微镜研制生产的历程: 从无到有, 一个单位率先研制成功, 随后是 10 余个机构研制, 逐步形成三足鼎立, 最后只剩一个作坊式的研制生产单位。国产超显微镜为发展我国的科学技术和工农业生产做出了贡献, 有过自己的辉煌。但是, 在市场经济和国际竞争的冲击下, 很多毕生为发展我国电子显微镜制造事业做出贡献的老科学家已退休、改行, 有经验的电子显微镜制造专家也大量流失。现在只剩中国科学院北京科学仪器研制中心 (北京中科科仪科技发展有限公司) 还在艰苦奋斗, 继续生产中档扫描电镜, 平均年产量 10 台。目前我国扫描探针显微镜的研制生产也正在重复电子显微镜的历程, 步履维艰, 难成气候。

## 6 建立和加强我国自己的纳米测量仪器和纳米加工设备制造业

我国纳米技术与开发目前大多集中在与传统技术的改性和纳米粉体制备技术上, 与“在原子、分子水平上操纵物质”、“设计、制造和控制纳米结构”的纳米主流技术差距很大。纳米技术与纳米材料是一个典型的新兴高技术领域, 我国也亟待超前发展新的纳米测量方法和纳米加工技术, 装备大批先进设备和测量仪器。为避免成为“瓶颈”、延误我国纳米科技发展时机, 必须实现跨越式发展, 尽快建立和加强我国自己的纳米测量仪器和纳米加工设备制造业<sup>[16]</sup>, 并纳入国家纳米科技发展规划。

1) 最新的高技术产品是用钱买不来的, 必须要有自己的技术力量、自己的制造业。鉴于纳米测量和纳米加工等纳米科技在计算机、信息处理、通信、生物、医疗、地面和空间技术、制造业, 尤其是国防上的巨大发展前景, 国外已开始对有关的纳米科技实行技术保密和技术封锁。即使外国公司与我签订了高技术产品的买卖合同, 也会拖延交货期, 直到他们新一代产品出现为止。如上面已经提到的专用电子束大规模集成电路测试设备, 国外只出售前几代产品, 而且价格昂贵, 每台高达 1 千万美元。国内研究和研制达到什么程度, 外国公司就解禁到什么程度, 价格也大幅度跌落, 以此冲垮我国的仪器生产幼苗。我国发展“两弹一星”的历史表明, 由于当时有了相当的技术储备, 能及时制造出必需的、国外对我们禁运的仪器装备。

2) 高新技术产品价格十分昂贵。电子显微分析与扫描探针显微仪器在纳米科技中起着不可缺少的信息源的作用。发展现代科技需要大量分析仪器, 其销售额在一定程度上代表了一个国家的科技水平。全世界分析仪器的平均年销售额约为 200 亿美元, 北美、欧洲和日本分别约占 1/2, 1/3 和 1/6, 而我国只占 1 % 左右。1992 年电子显微仪器的全世界销售额为 6.4 亿美元, 我国销售额也只有约 1 % (每年增加 20~30 台, 约 1 千万美元); 如要达到日本的 16 %, 每年就要花费上亿美元。

3) 工欲善其事, 必须利其器。基础研究要有所创新, 要发展新仪器, 也可以利用国产仪器加以改进, 实现自己的新思想; 国产仪器可以大胆使用, 便于维修。进口仪器往往由专人操作, 不得随意改动。

4) 使用国产仪器有利于培养人才。彭加木研究员为中国科学院新疆分院安装了我国第一台自己批量生产的大型透射电子显微镜, 造就了一批人才, 科研成果累累。

## 7 结语

回顾过去, 我国曾自力更生研制生产了不少电子显微仪器, 也引进过生产技术, 目前只剩北京中科科仪科技发展有限公司 KYKY 还能够继续生产一些中档的扫描电镜。这主要是由于国家科技部在政策和资金上的支持, 使北京科仪中心还能保持一小部分科技力量, 在引进技术的基础上有所创新; KYKY 本身也具有市场意识, 以生产质量高而稳



定可靠的仪器为己任, 作好售后服务, 赢得了用户的信任。历史的经验值得总结。

在面对激烈的市场经济情况下, 为满足基础研究及高新技术的需要, 尽快制定研制开发生产纳米测量仪器和聚焦离子束纳米加工装备等的创新体系, 纳入国家纳米科技发展规划, 给予扶植政策和保护措施, 利用多种渠道, 投入相当于购买几台高分辨场发射透射电子显微镜所需的几百万美元资金, 在现有基础上, 有计划有目的地组织人力、物力, 通过各种方式进行国际合作, 建立几个融科研、开发、生产、销售和服务为一体的规模企业, 改变目前品种少、档次低、产量小的局面, 力争在 15~20 年内达到和接近国际先进水平, 生产出足够的有自主知识产权的高中档电子显微分析和扫描探针显微仪器、以及聚焦离子束加工中心等纳米测量、纳米加工装备, 在国内市场的占有率达到 20%~30%, 以满足全国广泛的需求。

#### 参考文献

- [1] 宗 和. 芯片: 进入 0.10 微米竞赛 [N]. 解放日报, 2002-04-22
- [2] 姚骏恩. 扫描隧道显微镜 [A]. 姚骏恩主编. 生物化学仪器指南(第四册)——扫描隧道显微镜、电子显微镜及有关设备 [C]. 北京: 科学出版社, 1992. 1~15
- [3] Yao J E, He J, Shang G Y, et al. Scanning tunneling microscope and its biological applications [A]. In: Kuo K H, Yao J E, Eds. Intern symp on electron microscopy [C]. Beijing, China, Oct 22~23, 1990. Singapore, New Jersey: World Scientific Pub, 1991. 81~95
- [4] 张亦奕, 贺 节, 姚骏恩, 等. 原子力显微术 [J]. 电子显微学报, 1995, 14(2): 142~146
- [5] 张立德. 纳米测量学的发展与展望 [J]. 现代科学仪器, 1998, (1/2): 30~33
- [6] 姚骏恩. 电子显微镜的现状与展望 [J]. 电子显微学报, 1998, 17(6): 767~776
- [7] Hirano H. Factors promoting research and development in electron microscopy in Japan [J]. JEOL News (Electron Optics Instrumentation), 1999, 34E(1): 8~9
- [8] Ono A. Development of electron optical technology for JEOL's electron probe instruments [J]. JEOL News (Electron Optics Instrumentation), 1999, 34E(1): 64~66
- [9] 郭可信. 晶体电子显微学与诺贝尔奖 [J]. 电子显微学报, 1983, 2(2): 1~6
- [10] 姚骏恩. 通向微观世界之路——电子显微镜与扫描隧道显微镜的诞生 [A]. 陈建礼主编. 科学的丰碑——20 世纪重大科技成就纵览 [C]. 济南: 山东科学技术出版社, 1998. 410~415
- [11] 庞世谨. 原子操纵的进展 [J]. 现代科学仪器, 1998, (1/2): 44~48
- [12] 傅惠南. 应用 SPM 技术开展纳米切削加工 [J]. 电子显微学报, 2001, 20(5): 615~619
- [13] 姚骏恩. 我国超显微镜的研制与发展 [J]. 电子显微学报, 1996, 15 (2): 350~370
- [14] 金鹤鸣, 姜新力, 姚骏恩. 中国电子显微分析仪器市场 [A]. 国家科委条件司, 中国分析测试协会. 分析仪器市场调查与分析(第四章) [C]. 北京: 海洋出版社, 1998. 112~150
- [15] Yao Jun-en. Development and production of electron microscopes in China: A historical survey [J]. 电子显微学报, 2002, 21(3): 354~367
- [16] 姚骏恩. 自强是真理 [N]. 科学时报, 2000-08-01 (B)

## Nano-measuring Instruments and Nano-machining Technology

Yao Junen

(Beijing Scientific Instrument Research and Development Center,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

[Abstract] Nanotechnology is a research and development hot spot nowadays. In this paper a short introduction of nanoscience and nanotechnology was given. Nano-measurement and nano-machining play a very important and key role in the nanoscience and nanotechnology. Conventional electron microscope is a major nano-measuring instrument. Newly developed scanning probe microscope and focused ion beam-electron beam (dual beam) equipment are two types of powerful nano-measuring instruments and nano-machining tools. Its present state, prospect and market in the world as well as in China were described briefly.

(cont. on p.47)

社. 1981

## The Basic Characteristics of the Yangbajing Geothermal Field— A Typical High Temperature Geothermal System

Duo Ji

(*Geothermal Geological Brigade, Bureau of Mineral and Resource of Tibet, Lhasa 850032, China*)

**[Abstract]** The Yangbajing Geothermal Field is one of non-volcanic high-temperature geothermal fields. The Yangbajing convective system consists of two reservoirs at different depth. The shallow reservoir is constituted of loose alluvium of Quaternary and altered granite of Himalaya. Temperature inside the shallow reservoir is in the range of 150~165°C at the depth of 180~280 m. Shallow thermal water is of sodium chlorite type and mixture of deep hot water and cold groundwater. The deep reservoir is in a slip-fault zone of the core complex. It is a veinor zone-shape reservoir. The deep reservoir can be divided into two parts. The upper parts of temperature 251°C is at depths ranging from 950m to 1350 m. The lower part is below 1850 m, in which the measured temperature is as high as 329°C. The deep thermal water is of sodium chlorite type, too. Carbon dioxide is a major non-condensate gas in the shallow and deep reservoir.

**[Key words]** high temperature geothermal; thermal reservoirs; genesis; Yangbajing; Tibet

---

(cont. from p. 37)

The first-two Chinese prototype transmission electron microscopes were constructed in 1958-1959 in Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS. Beijing Scientific Instrument R & D Center (KYKY) developed the first domestic scanning electron microscope. According to a survey in 1996-1997 there were 1 921 electron microscopes including 756 transmission electron microscopes (TEM) and 1 165 scanning electron microscopes (SEM) in China at that time. Of these 1 921 TEMs and SEMs, 1006 were domestic production (mostly medium- and low- grade electron microscopes) accounting for 52.4 % of the market, and 915 instruments were imported (47.6 %). Beijing Scientific Instrument R & D Center, CAS (KYKY Technology Development LTD), Shanghai electron-Optical Technology Research Institute and Jiangnan Optical Instrument Plant produced more than 95 % of these 1 006 home-made electron microscopes. The first domestic scanning tunneling microscope (STM) was completed in 1987 in Beijing Open Laboratory of Electron Microscopy under CAS. Since then more than one hundred scanning probe microscopes of various types have been constructed in China. The Chinese electron microscope and scanning probe microscope production should be improved and enlarged to cover the progressively increasing demand of research and development work in China.

**[Key words]** nanotechnology; nano-measurement; nano-machining; electron microscope; scanning probe microscope; focused ion beam-electron beam (dual beam) equipment; instrumentation