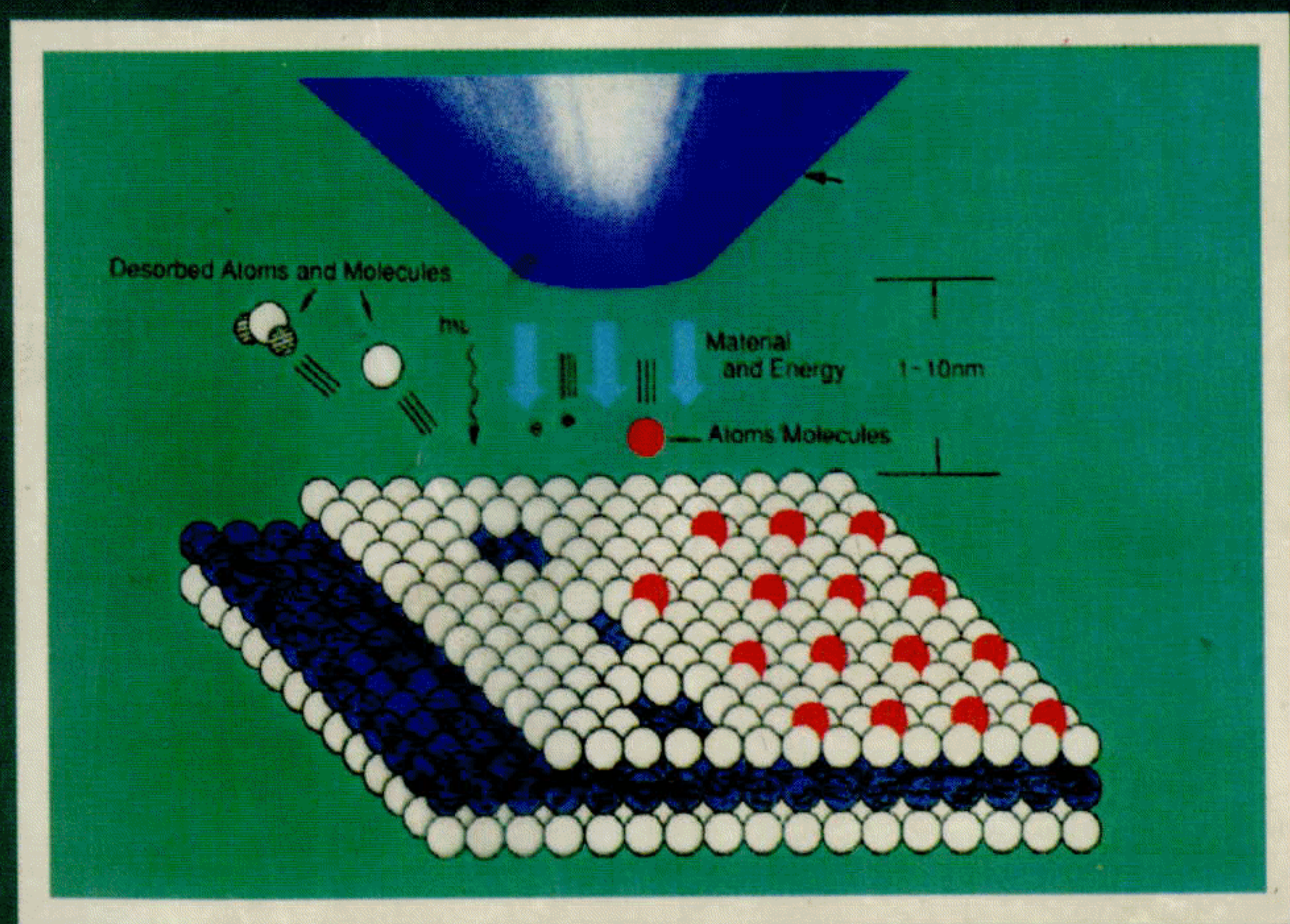


纳米技术与应用

黄德欢 著



中国纺织大学出版社

纳米技术与应用

黄德欢 著

中国纺织大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

纳米技术与应用/黄德欢著. —上海: 中国纺织大学出版社, 2001. 7

ISBN 7-81038-368-X

I. 纳… II. 黄… III. 纳米材料 IV. TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 043909 号

策 划 卢根祥 封志学 施敏俊
责任编辑 吴川灵
封面设计 陶善丰
校 对 张国华 苏 俞 季丽华

纳米技术与应用

黄德欢 著

中国纺织大学出版社出版

(上海市延安西路 1882 号 邮政编码: 200051)

南京展望照排印刷有限公司排版 上海长阳印刷厂印刷

新华书店上海发行所发行

开本: 850 × 1168 1/32 印张: 8 彩页 8 字数: 200 千字

2001 年 7 月第 1 版 2001 年 7 月第 1 次印刷

印数: 0 001—10 000

ISBN 7-81038-368-X/T·24

定价: 15.00 元

本书所有文字及图片未经许可不得转载

内 容 提 要

本书介绍纳米技术这门新兴学科的基本内容 and 应用,主要包括纳米电子学、纳米材料学、纳米生物学和纳米医学等。纳米技术是 20 世纪 80 年代末发展起来的新兴学科,它以现代先进的科学技术为基础,创造的物质和产品具有当代微米技术无法媲美的奇异特性和非凡的特殊功能。纳米技术将成为 21 世纪新技术革命的主导中心。本书全面系统地介绍纳米技术的各个研究和应用领域。全书共分八章。第一章简单介绍纳米技术及其特征;第二章和第三章着重介绍对纳米技术发展具有里程碑意义的扫描隧道显微镜和原子力显微镜的基本原理,以及它们在原子操纵和纳米加工技术中的应用,这些领域是当前纳米技术得以深入发展的基础;第四章论述纳米电子学的发展趋势以及纳米单电子晶体管的基本原理和最新研究进展;第五章介绍纳米材料学的研究状况,特别是碳纳米管的研究进展及应用;第六章介绍纳米生物学和纳米医学的基本知识和主要研究领域,包括人类基因组计划,纳米医学以及未来的生物计算机和分子机械等内容;第七章介绍纳米技术在国际上(主要是美国、日本和中国)的主要研究进展;第八章介绍纳米技术目前的应用状况和未来的应用趋势。

本书的一个特点是,以大量的图片来帮助读者直观地了解原子尺度的微观结构,以便迅速准确地掌握一些纳米技术的基本

2 纳米技术与应用

概念。

本书可以作为纳米技术入门者的科普读物,也可以作为大专院校有关专业师生的教学参考用书,同时也可供有关研究开发和应用纳米技术的单位、工矿企业的企业家、工程师和科技人员参考。

序

富有挑战性的 21 世纪将人类带进了又一个新的关键历史时期。纳米技术作为 21 世纪的主导科学技术,将会像 20 世纪 70 年代微米技术在世纪之交的信息革命中起的关键作用一样,给人类带来一场前所未有的新的工业革命。近年来,纳米技术正向各个学科领域全面渗透,速度之快,影响面之广,出乎人们的意料之外。纳米技术与传统学科相结合形成的新兴学科包括有纳米电子学、纳米生物学和纳米医学、纳米材料学、纳米机械学、纳米物理学和化学、纳米力学和纳米测量学等学科。这些新兴学科的发展趋势和潜力使我们完全有理由相信,21 世纪将会是一个纳米技术的世纪。这个由纳米技术主导的世纪会在不久的将来带给人类新的信息时代、新的生命科学时代、新的医学时代、新的材料科学和制造技术时代。目前,纳米技术的基础和应用研究正在我国兴起,为使我国在这场科学技术的巨大变革中能够赶上世界新技术的发展潮流,与发达国家齐头并进,我国的科技工作者正不断涉入纳米技术的不同研究领域,取得了很多可喜的成果。

本书作者黄德欢博士从事纳米技术的基础理论和实验研究已有十多年的经验,他在使用扫描隧道显微镜和原子力显微镜进行单原子操纵和纳米尺度结构及器件加工方面作出了突出的贡献,发表了 240 余篇学术论文和国际会议报告,申请了十余项发明专

2 纳米技术与应用

利。黄德欢博士还多次获得国内外学术机构的奖励。这些研究经验使他具备了写好本书的基本条件。

《纳米技术与应用》这本书内容丰富,较为全面地介绍了纳米技术各个学科的基本内容,应用前景,总结了近年来纳米技术各个研究领域的最新成果。作者力求深入浅出,使用大量的图片来帮助读者直观地了解原子尺度的微观结构,以便迅速准确地掌握一些纳米技术的基本概念和最新知识。本书集知识性、科学性和可读性于一体,是一本很值得一读的书。

我相信本书的出版对推动我国纳米技术的发展将会起到积极的作用。

中国科学院副院长
中国科学院院士

2001年6月

目 录

序	1
1 纳米技术的由来	1
1.1 什么是纳米技术	1
1.2 纳米技术的特征	4
2 扫描隧道显微镜及其应用	6
2.1 扫描隧道显微镜的基本原理	6
2.2 扫描隧道显微镜不同条件下的应用	9
2.3 扫描隧道显微镜针尖的制作技术	20
2.4 扫描隧道显微镜单原子操纵和纳米 加工技术	34
3 原子力显微镜及其应用	66
3.1 原子力显微镜的基本原理	66
3.2 原子力显微镜微悬臂偏转的检测方法	68
3.3 原子力显微镜微悬臂的制作技术	73
3.4 原子力显微镜的纳米加工技术	94
4 纳米电子学	104
4.1 微米电子学技术及超大规模集成电路的 发展限制	106
4.2 单电子晶体管和单电子存储器	111
5 纳米材料学	129
5.1 纳米材料的特征	129
5.2 纳米超微颗粒材料的制备	133

2 纳米技术与应用

5.3 碳纳米管材料	135
5.4 碳纳米管材料的应用	144
6 纳米生物学和纳米医学	155
6.1 DNA 分子的结构和复制过程	159
6.2 人类基因组计划和应用	161
6.3 纳米医学	167
6.4 生物计算机和分子机械	171
6.5 生物芯片技术	173
7 纳米技术在国际上的研究和发展	179
7.1 纳米技术在美国	179
7.2 纳米技术在日本	185
7.3 纳米技术在欧洲	199
7.4 纳米技术在中国	201
8 纳米技术的应用及前景	213
8.1 在信息技术和计算机工程中的应用	213
8.2 在机械工业和微小加工业中的应用	215
8.3 在微小量检测和测量技术中的应用	216
8.4 在材料工业中的应用	219
8.5 在生物和医学中的应用	221
8.6 在军事中的应用	225
8.7 在日常生活中的应用	230
后记和致谢	236
附录 I 国际和国内部分纳米技术网站	239
附录 II 作者简介及主要学术年谱	241
附录 III 作者部分生活和学术活动照片	247
附录 IV 本书部分插图精选	251

1 纳米技术的由来

1.1 什么是纳米技术

什么是纳米？什么是纳米技术？这是当前纳米热潮中人们常常提起的问题。在我国最近的新闻报道中，越来越多关于纳米技术的介绍跃入人们的眼帘。例如，应用纳米技术，人们可以操纵原子，加工出许许多多的以往不可能加工的微小结构；应用纳米技术，人们可以及早地诊断出疾病，并有效地控制和治疗这些疾病；纳米技术使得材料的性能得以改善；纳米技术可以制造出极微小的机器；纳米技术改变了我们的日常生活等等。时而，也不断有与纳米技术有关的产品出现，诸如纳米洗衣机、纳米冰箱、纳米鞋垫、纳米布料等等。公司的名称若与纳米有关，其股票价值直往上窜成为股市上的龙头，并被人戏称为“纳米”就是“纳钱”；公司的产品若与纳米技术有关，不仅销路好，深受大众的欢迎，而且新闻单位会主动给予追踪报道，成为新闻炒作的热点；农民也时髦地说，以前种的是早米和晚米，今后要改种纳米了。更有甚者，在笔者家乡的小城竟

然有人太张旗鼓地开了一个“纳米饭店”。

这一切，仿佛纳米能给人类带来所需要的一切。它犹如一股巨大的浪潮正向人类、向我们的社会、向我们每个人扑面而来，预示着一个崭新的纳米时代的来临。

那么，纳米到底是什么呢？它为什么会那么神奇？它真的会给人类带来一个新的时代吗？

其实，纳米(nanometer, nm)就字面来说，只是一种尺度，它和我们所熟悉的米(m)、毫米(mm)、微米(μm)一样都是长度计量单位。1纳米等于 10^{-9} 米，也就是说，1纳米只有10亿分之一米，百万分之一毫米，和千分之一微米。仅从上述的数字，也许我们不能马上想像出纳米的大小，让我们再进一步来描述一下：1纳米大约是3~4个原子排列在一起的宽度；如果用最小的氢原子来排列的话，1纳米大约是10个氢原子的宽度；人体内的血红细胞的直径大约为8千纳米；人头发的直径大约有6~8万纳米；而人的身高则高达10几亿纳米。由此来看，纳米是一个很小很小的长度单位，其意义也仅此计量长度而已，本身并没有任何的“价值”可言。

那么，纳米技术又到底是什么呢？它是不是也像纳米那样简单的而毫无“价值”可言呢？作为一种如此微小尺度的技术，人们应用它能够做些什么呢？纳米技术的出现，对我们未来的世界又会发生什么样的和多大的影响呢？这一股如此强大的纳米潮流，将会给我们的人类、我们的企业甚至我们的每个人带来多大的变化呢？解释这些问题正是本书写作的目的之一。

显然，纳米技术(nanotechnology)不可能没有“价值”，而且我们可以肯定地说，纳米技术不但极具“价值”，而且是前途无量，不然的话，纳米技术怎么能够在上面所述的各个领域中都起到如此神奇的作用。

那么,纳米技术是什么呢?

纳米技术是 20 世纪 80 年代末期刚刚诞生并正在迅速崛起的用原子和分子创制新物质的技术,是研究尺寸范围在 $0.1 \sim 100 \text{ nm}$ 之间的物质的组成。这个极其微小的空间,正好是原子和分子的尺寸范围,也是它们相互作用的空间。纳米技术之所以会受到如此的重视,是因为当物质小到纳米的尺度时,由于量子效应、物质的局域性及巨大的表面和界面效应,使物质的很多性能发生质变。这些变化渗透到各个工业领域后,将引导一轮新的工业革命。

尽管纳米的尺度很小,但该尺度的物质在自然界比比皆是,从小到单个的原子和数个原子的小分子,到大得多的具有几百个原子的血红蛋白分子以及长度达几百万个原子的 DNA 分子。

早在 1959 年,美国著名物理学家、1965 年诺贝尔物理奖获得者 Richard Feynman 在当年的美国物理学会年会的发言中曾对未来的物理学作了一个精彩的预言:“如果我们按自己的愿望一个一个地排列原子,将会出现什么呢? 这些物质将有什么性质? 这是十分有趣的问题。虽然我现在不能精确地回答它,但我决不怀疑当我们能在如此小的尺寸上进行操纵时,将得到具有大量独特性质的物质。”Feynman 的这段话,实质上是对纳米技术出现的预言。

自然界千千万万不同的动物和植物,具有无奇不有的性能,显示出自然界的无比创造力。跳蚤可以轻松跃起数百倍自己身长的高度,蚂蚁能够撼动几十倍于自己体重的物体,而蜜蜂扇动的频率可高达每秒上百次。即使在高科技高度发达的今天,人类创造的东西仍不及自然界的万分之一,哪怕是鲍鱼那样软体动物的贝壳构造,还是蜘蛛吐出的又韧又粘的丝,都是人工无法实现的,更不用说像人本身这样的高等动物了。自然界的种种万物,它们之所以能够具有它们各自的神奇特性,根本原因在于它们在原子和分

子水平上所具有的独特结构。

纳米技术所追求的最终目标,正像 Feynman 当年预言的那样,就是要使人类能够按照自己的意愿任意地操纵单个原子和分子,并在对自然界物质的本质进行深入探讨和研究的基础之上,按照人们的期望,在原子和分子的水平上设计和制造全新的物质。而这些全新的物质将给人类带来全新的变化。

对于纳米技术在未来人类社会中的技术和经济地位,美国 IBM 公司首席科学家 Armstrong 在 1991 年曾作过一个重要的评论,他说:“我相信纳米科技将在信息时代的下一个阶段占中心地位,并发挥革命的作用,正如微米科技从 20 世纪 70 年代初以来所起的作用那样。”这就是说,纳米技术是 21 世纪高新技术的产生和发展的源头,将领导下一场工业革命。

1.2 纳米技术的特征

在人类社会发展的漫长过程中,已经经历过二次巨大的工业革命,现在我们正面临着第三次工业革命的到来。

早在 18 世纪中叶,以蒸汽机为代表的第一次工业革命是毫米技术应用的标志;它使人们从手工为主的时代跨进了以机械代替人力的工业时代,结束了人类进化以来最漫长的以体力劳动为标志的时代。20 世纪以微电子学技术为代表的第二次工业革命是微米技术应用的标志。微米技术使人类进入了计算机和通讯网络的新时代,不仅缩短了人类的空间距离,而且极大地促进了人类生产力的发展。以纳米技术为代表的新兴科学技术,将在 21 世纪给人类带来第三次工业革命。它将给人类创造许许多多的新物质、新材料和新机器,彻底改变人们千百年来形成的生活习惯。它也

将使人类对生命的注释有一个全新的定义,给医学和新药开发等技术带来极大的变革。总之,纳米技术将为人类创造一个全新的世界,带给人类大量的不可思议的变化,纳米技术必将成为 21 世纪的里程碑。

纳米技术是一门以许多现代先进科学技术为基础的科学技术,是现代科学(量子力学、分子生物学等)和现代技术(微电子学技术、计算机技术、高分辨显微技术、核分析技术等)结合的产物。它代表着今后人类科学和技术发展的趋势,它也将成为现代高科技和新兴学科发展的基础。

正因如此,纳米技术在不断渗透到现代科学技术的各个领域的时候,形成了许许多多的与纳米技术相关的新兴学科,如纳米体系物理学、纳米化学、纳米电子学、纳米材料学、纳米生物学、纳米医学、纳米机械学等。这些纳米技术中的新兴学科使人类能够对物质的本质在更加微观的水平上进行研究,这必将迅速地改变物质产品的生产方式,提高产品的质量,拓宽它们的应用范围,从而导致人类社会发生巨大的变化。在 21 世纪里,成功地掌握了纳米技术就等于建立了现代产业革命的新平台。

必须指出的是,在当今的微米技术时代,微电子学技术在人类的发展和生活中起了决定性的作用。同样,在纳米技术时代,纳米电子学技术也将起着最关键的作用。因此,在纳米技术中各个分支学科中,应当更加重视纳米电子学的研究,特别是要重视纳米电子器件的开发工作。而几乎贯穿于全部纳米技术各个分支学科的扫描隧道显微镜 (STM) 和原子力显微镜 (AFM) (它们也被统称为 SPM, Scanning Probe Microscopy), 因其具有原子和纳米尺度的分析和加工的能力,在纳米技术的发展中占有极其重要的地位。

2 扫描隧道显微镜及其应用

2.1 扫描隧道显微镜的基本原理

1982 年,国际商业机器公司(International Business Machine, IBM)苏黎世研究所的 Gerd Binnig 和 Heinrich Rohrer 及其同事们成功地研制出世界上第一台新型的表面分析仪器,即扫描隧道显微镜(scanning tunneling microscope, STM)^[1]。它使人类第一次能够直接观察到物质表面上的单个原子及其排列状态,并能够研究其相关的物理和化学特性。因此,它对表面物理和化学、材料科学、生命科学以及微电子技术等研究领域有着十分重大的意义和广阔的应用前景。STM 的发明被国际科学界公认为 20 世纪 80 年代世界十大科技成就之一。由于这一杰出成就,Binnig 和 Rohrer 获得了 1986 年诺贝尔物理奖。

由于 STM 具有极高的空间分辨能力(平行方向的分辨率为 0.04 nm,垂直方向的分辨率达到 0.01 nm),它的出现标志着纳米技术研究的一个最重大的转折,甚至可以说标志着纳米技术研究的正式起步,因为在此之前人类无法直接观察

表面上的原子和分子结构,使纳米技术的研究无法深入地进行。利用 STM,物理学家和化学家可以研究原子之间的微小结合能,制造人造分子;生物学家可以研究生物细胞和染色体内的单个蛋白质和 DNA 分子的结构,进行分子切割和组装手术;材料学家可以分析材料的晶格和原子结构,考察晶体中原子尺度上的缺陷;微电子学家则可以加工小至原子尺度的新型量子器件。

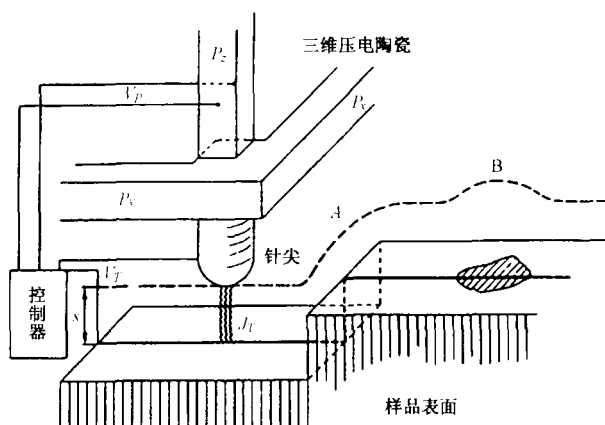


图 2-1 STM 的基本原理图

(图片复制自参考文献[1])

图 2-1 是 STM 的基本原理图^[1],其主要构成有:顶部直径约为 50~100 nm 的极细金属针尖(通常是金属钨制的针尖),用于三维扫描的三个相互垂直的压电陶瓷(P_x , P_y , P_z),以及用于扫描和电流反馈的控制器(control unit)等。

STM 的基本原理是量子的隧道效应。它利用金属针尖在样品的表面上进行扫描,并根据量子隧道效应来获得样品表面的图像。通常扫描隧道显微镜的针尖与样品表面的距离非常接近(大约为 0.5~

1.0 nm), 所以它们之间的电子云互相重叠。当在它们之间施加一偏置电压 V_b (V_b 通常为 2 mV ~ 2 V) 时, 电子就可以因量子隧道效应 (tunneling effect) 由针尖(或样品)转移到样品(或针尖), 在针尖与样品表面之间形成隧道电流。此隧道电流 I 可以表示为:

$$I \propto V_b \exp(-k\Phi^{1/2}s) \quad (2-1)$$

这里, k 为常数, 在真空条件下约等于 1; Φ 为针尖与样品的平均功函数; s 为针尖与样品表面之间的距离, 一般为 0.3 ~ 1.0 nm。

由于隧道电流 I 与针尖和样品表面之间的距离 s 成指数关系, 所以, 电流 I 对针尖和样品表面之间的距离 s 变化非常敏感。如果此距离减小仅仅 0.1 nm, 隧道电流 I 将会增加 10 倍; 反之, 如果距离增加 0.1 nm, 隧道电流 I 就会减少 10 倍。

STM 有两种工作模式, 恒电流模式和恒高度模式, 如图 2-2 所示^[2]。

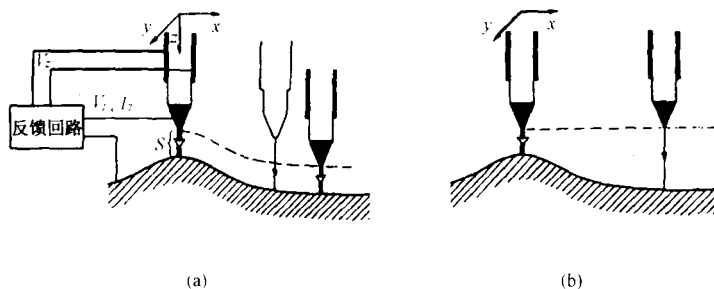


图 2-2 STM 扫描模式示意图

(a) 恒电流模式; (b) 恒高度模式 (图片复制自参考文献^[2])。

恒电流模式是在 STM 图像扫描时始终保持隧道电流恒定, 它可以利用反馈回路控制针尖和样品之间距离的不断变化来实现。当压电陶瓷 P_x 和 P_y 控制针尖在样品表面上扫描时, 从反馈回路