

纳米科学技术一瞥——原子、分子的直接观察和操纵

A Glance at the Nanometer Scale Science and Technology——Direct Observation and Manipulation of Atoms and Molecules

李民乾

(中国科学院上海原子核研究所, 研究员)

提要 本文以原子、分子的直接观察和操纵为轴线介绍纳米科学技术。纳米科技引导人们对自然的认识和改造进入一个更深的层次, 即从微米进入纳米的层次。基于现代物理学和先进技术基础上的这门新高科技作为生产力中最活跃的因素, 将对21世纪的人类生活和生产模式产生难以估量的深远影响。

纳米科学技术的诞生

长期来人类就有一个幻想: 希望能直接看到原子。但直至20世纪80年代除了极个别情况外, 原子还是不能直接被“看”到。这个幻想在80年代初由于扫描隧道显微镜(STM)的发明终于成为现实。稍后, 人们又发明了原子力显微镜(AFM), 它也可以直接地观察原子、分子, 而且对导电和非导电样品均适用, 用途更为广泛。

人类的另一个幻想是1959年最初由著名物理学家理查德·费因曼(R. Feynman)导出的: “如果有一天可以按人的意志安排一个个原子将产生什么样的奇迹?!”。这个直接操纵原子、分子的幻想长期来即使在科技界也一直认为是不可能实现的。1990年, 也还是利用STM, 通过STM针尖与表面原子间的相互作用, 可以操纵一个个原子, 按需排布原子, 实现了人类直接操纵原子、分子的幻想。就是在这个基础上, 90年代初诞生了可直接利用原子、分子的排布制造产品的新科技——纳米科学技术(Nano ST)。

纳米科学技术是在0.1—100纳米尺度上研究和应用原子、分子现象及其结构信息, 是一门多学科交叉的、基础研究和应用开发紧密联系的新高科技。纳米科技又将引发一系列新的科技, 如纳生物学(Nano biology)、纳电子学(Nano electronics)、纳化学、纳米材料学和纳机械学等一系列冠

以纳米的新学科。纳米在这里不仅是一个空间尺度的概念, 而且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、分子的排布制造具有特定功能的产品。

直观的原、分子世界

这里是我们精选了一些有代表性的原子、分子直观图象(见封面、封底和彩页)。在浏览原子、分子世界时, 读者或许会发现它们不仅有揭示微观结构的科学意义而且还颇具美学上的欣赏价值。

先看两幅原子图像。图1(见封二)是吸附在铂晶体表面碘原子规则排列的STM图像, 在图1的下部甚至可观察到原子结构中单个原子的缺陷(泛黄光处碘原子缺位)。封面图是硫化钼的原子图像, 彩图中以桔黄色显示的硫原子和以绿色表示的钼原子的有序排列历历在目。

在分子世界中人们首先关注于决定人类遗传性状的大分子DNA分子。第一张DNA分子的STM图像于1989年1月问世, 并被评为当年美国的第一号科技成果。图2(见封二)是中国科学院上海原子核所应用自己研制成功的STM与上海细胞生物学所与前苏联科学院分子生物学所合作获得的一种新的DNA构型——平行双链DNA(P---DNA)的STM图像, 直观地显示了P---DNA的结构特征: 右手螺旋及链的等距间隔(从照片上则相应地可

看到右手螺旋和等距间隔的条纹)。客观世界中,一切生命物质中的DNA的复制过程每时每刻都在进行着,但人们从未直观见过。图3a(见封二)是中科院原子核所和生化所合作,利用STM拍摄到的表征DNA复制过程中一瞬间的照片。图的中央是DNA聚合酶,左下角为DNA双链分子,其相应的结构模型图见图3b。

揭示基因表达的机理,如何调控基因的表达是现代生物学的一个中心任务。人们猜想,在这个调控过程中,当DNA分子与调控蛋白结合时,可能会形成一些特殊的局域结构(Local Structures)。中科院上海原子核所和上海细胞生物学所合作,获得了人体 β 珠蛋白基因的某个调控过程中DNA形成环结构(Loop Structure)的STM图像,见图4(见封二),此图像的中部突起部分系调控蛋白的结合位点,中下部系DNA的环形结构。生物家们认为这种环结构对理解基因的调控机制有重要意义。英国《自然》杂志1992年5月刊出专文予以阐述。

在DNA的测序或基因调控研究中往往将DNA片段组合至质粒DNA中。由于质粒DNA具有一定的线度及闭合的环形结构,很易与样品衬底上可能产生的缺陷图形区别。因此,质粒DNA的成像成了最近研究的又一热点。图5(见封三)是笔者在美国加州大学(UCSB)Hansma实验室利用AFM获得的质粒(BS II)DNA的清晰图像。只需纳克(10^{-9} 克)级的样品即可获得重复的、稳定的纳米级分辨率的AFM图像。这对数量极少的珍贵样品的结构研究尤其重要,并为DNA测序和基因调控研究打下了良好的基础。

STM和AFM在工业应用方面也获得了巨大成功。图6a(见封三)是笔者在UCSB,利用AFM测得的激光唱片大范围($10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$)的AFM图像。其中1微米宽的长、短突起即为数字化的音乐印记。图6b为其中局部的三维图像。图7a(见封三)是集成电路的AFM图像,制作工艺过程中的缺陷都暴露无遗。图中 $\times$ 记号的上部即是一个缺陷。另外,也可获得任何局部的三维图像(见图7b)。这种在正常大气环境中快速获得的高分辨率的三维图像对监督和改进亚微米集成电路的工艺具有突出的作用。目前国际上,即将推出移动式的大范围扫描的STM/AFM将用于微电子工业的实时监控中。

原子、分子的直接操纵

扫描探针显微学(包括STM和AFM等)发展至80年代末有了突破性进展。这类新型显微镜不仅是观察微观世界的工具,而且还是改造微观世

界的手段。最近二年已陆续报道了利用STM操纵单个原子的成功例子。首先是美国加州的IBM研究实验室利用STM,在低温真空下在镍表面上将35个氩原子排布成最小的IBM商标。此后,日本日立研究室实现了在室温下单原子的操纵,以原子空穴的形式“写下了”“Peace'91”的字样。利用这种按需排布单个原子的能力显然可以构成高密度的数据储存器件,其储存密度比目前的磁盘要高1亿倍,势将引起信息技术新一轮的革命。当然,目前尚存在写读速度的问题。1991年IBM的科学家O. Eigler进一步利用STM能快速地重复地在镍表面同一个位置上“拾”起或“放”下一个氩原子,原则上创造了一个单原子的双向开关装置。这可能导致原子级的计算机开关器件的诞生。图8a(见封底)上面两个图即图示了这个过程,上左图为单个Xe原子(品红色)静置于镍表面上,上右图为探针(桔红色)“拾”起该个单原子的情景。图8下面两个图则分别显示了相应的两种状态的STM图像。该实验室的访问学者P. Zeppenfeld更有趣地利用STM操纵分子,将28个一氧化碳分子在铂表面上排布成世界上最小的“分子人”(见封底图9)。

在纳米科技中纳米加工具有更广泛的含意。例如纳米刻蚀术(Nano lithography)也是在纳米尺度上制备产品的方法之一。目前微电子技术中最细的刻线为几分之一微米,而利用STM中针尖与表面相互作用的原理可以进行纳米级的刻蚀。中国科学院化学所和原子核所共同承担的中科院八五重大基础研究项目中就将纳米刻蚀列为主要课题。目前他们的合作研究已获初步的结果。可以用STM刻蚀10纳米左右的细线,并能写字和刻蚀一定的图形(本刊1992年第9期上刊出了中国科学院化学所用STM在石墨晶体上进行纳米级加工刻制的中国地图,中科院英文缩写等图形)。图10(见封底)即是用STM在石墨表面上刻画的图形,各点的大小为几个纳米。这种纳米刻蚀技术具有非常重要的实用价值:

其一是将STM的纳米刻蚀技术应用于微电子中的工作介质上就有可能制造出高密度的存储器。日本NEC公司已研制出超高密度记录技术,其记录密度为目前磁盘的大约3 000倍。NEC公司计划在21世纪初实现实用化、产业化。届时一张邮票大小的衬底上可记下400万页报纸刊登的内容。

其二是将STM刻蚀技术与分子束外延薄膜生长技术相结合,即可望构成量子点,即它的三维尺度均为纳米级的量子器件。例如,利用砷镓和砷铝镓多层分子束外延薄膜材料加上纳米刻蚀,即可构成电或光的量子器件。这将对微电子、激光技术和光电技术产生革命性的影响。

在纳米材料方面,通过气凝纯、激光气相沉积法或者离子注入法均能制备直径为纳米级的超细颗粒,即所谓纳米材料。由于其表面原子所占的比例很大以及具有量子尺寸效应等原因,纳米颗粒具有独特的、与宏观材料绝然不同的力学、电磁学和化学性质。在新材料领域内将独树一帜。

在分子的纳米技术方面也有重要进展。利用特殊的DNA序列,可将DNA分子构成特殊的立方结构,这将为分子电子学和分子操纵提供所需的分子“块材”,并且是可以大量自动复制的分子元件。最近H. Hansma和笔者在美国加州大学(UCSB)用AFM都成功地对DNA分子链上的任何确定部位进行了分子切割。图11(见封底)为初始的质粒DNA经分子切割后的AFM图像(X号即为切割部位)。这类分子手术再结合分子操纵是迈向在纳米尺度上改造基因的重要进展。

在纳米机械学和纳米电源方面值得一提的是现已制成平面型的几十微米大小的静电微电动机。在纳米定位马达方面有纳米线性马达(日本)、蠕虫(Inchworm)式纳米马达和惯性驱动纳米马达(上海原子核研究所研制)等。最近,美国加州大学的一位中国研究生在利用STM进行电化学研究时,发现了纳米级电池的现象,即在几十纳米尺度上此纳米电池可放电毫安量级,并持续了45分钟。人们认为纳米电池在将来的纳电子学和纳机械学领域内可担当起动力电源的任务。

结 语

STM和AFM既能直接观察又能直接操纵原子、分子的潜力导致了纳生物学(Nano biology)、纳化学(Nano chemistry)等新学科的出现。最近几年在纳米科学技术领域内强有力的实验事实和众多的、飞速发展的新进展已逐渐促使科学家乃至公众意识到,我们已经面临了一个科技的新纪元——纳米科技时代。

人们是否仅仅出于追求新奇才去发展纳米科技的呢?当然不完全是。纳米科技诞生于今日不仅是因为有了实现的可能,而且也因为有其迫切的需要。

目前人类已有50多亿人口,面临着许多刻不容缓的问题。怎样防止生态平衡的破坏和环境污染?怎样提高经济效益,减少原材料和能源的消耗?怎样提供足够的食品和保障人类健康?这些问题的解决在很大程度上要靠科学技术的进步。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(动、植物,矿物)进行的,在一系列的生产过程中就不可避免地会造成一定程度的原料和能源的浪费,破坏生态平衡、污染环境。当然可以改进、提高,但这总是一些“量”上的变化。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,将改观人类的生产模式和空前地提高生产力,并有可能从根本上解决上述的种种严重问题。纳米科技正是引导人类通向这个新的“纳时代”的新科技。这是发展纳米科技的客观需要和动力。尽管要实现纳米科技生产模式尚有很长的路要走,但它的到来是确信无疑的。

纳米科技在国际上已渐露头角,它使人类在改造自然方面进入一个新的层次,即从微米层次深入到原子、分子级的纳米层次。正如本世纪三、四十年代发展原子能、原子弹的时期,核技术开发了物质潜在的能量,使单位质量物质的爆炸力增加了百万倍一样,纳米科技将开发物质潜在的信息和结构潜力,使单位体积物质储存和处理信息的能力提高百万倍以上。纳米科技将成为下一个信息时代的核心。美国最早成立了纳米科技研究中心,开展了预研究。IBM和德克萨斯仪器公司等都是积极参与者。单单在加州就有加州大学伯克利分校、圣巴巴拉分校(UCSB),斯坦福大学,加州理工学院等十多所著名大学、研究机构在重点开展纳米科技研究。STM等纳米技术产品已初步实现了产业化,并已将纳米加工列为国家关键技术。日本制订了庞大的国家规划,在日本研究发展合作组织下制定了以开拓纳米技术为核心的研究规划(ERATO),共14个课题,均以学术带头人命名,甚至有后来居上之势。日本最近决定拨巨款(1.7亿美元)创办“原子工厂”,将利用原子、分子直接制造产品这个战略思考付诸行动。在欧洲,德国、英国等国均积极参与。在我国,中国科学院于1991年11月召开了纳米科技发展战略学术研讨会,对纳米科技的重要性有了共识。1992年9月中国真空学会组织了第一届纳米科技学术会议。纳米材料研究已列入国家重大科研项目,纳米加工和DNA结构研究已安排为中科院的八五重大基础研究项目。但就整个纳米科技而言,尚无国家规划,尚未全面启动。鉴于纳米科技是节能、低耗和技术密集型的新科技,发展纳米科技的投入产出比可能高于其它高科技项目。因此纳米技术可能为我国迎头赶上世界科技、经济飞跃发展提供一个难得的历史机遇。我国科技界、参谋层、决策层决不可等闲视之!

(责任编辑 蔡德诚)

纳米科学技术一瞥

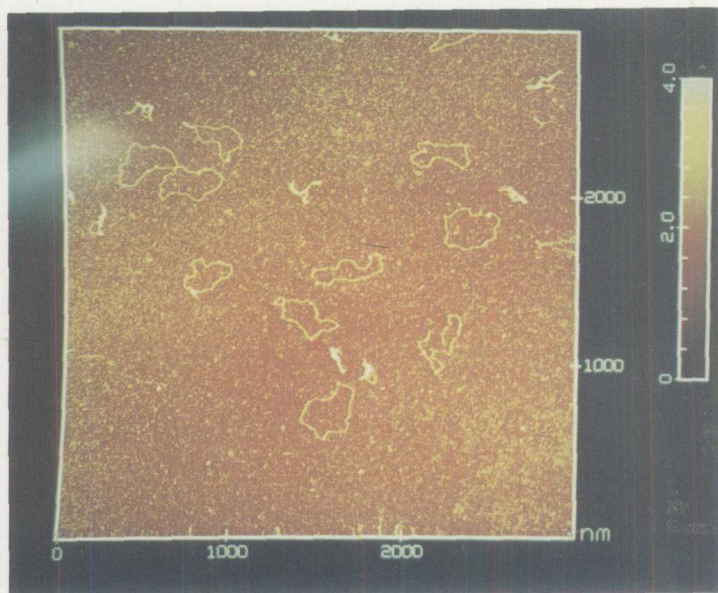
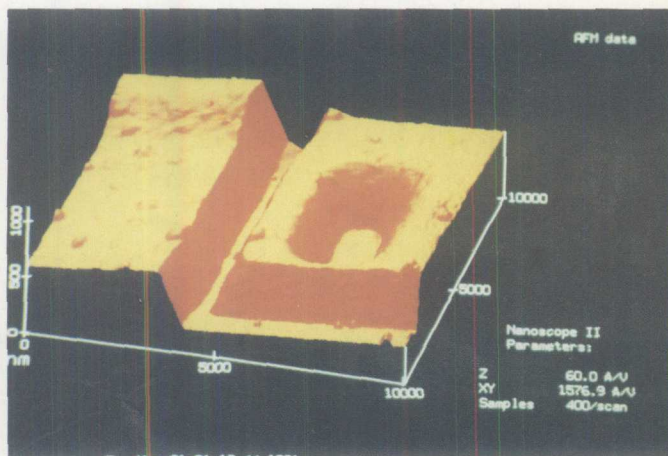
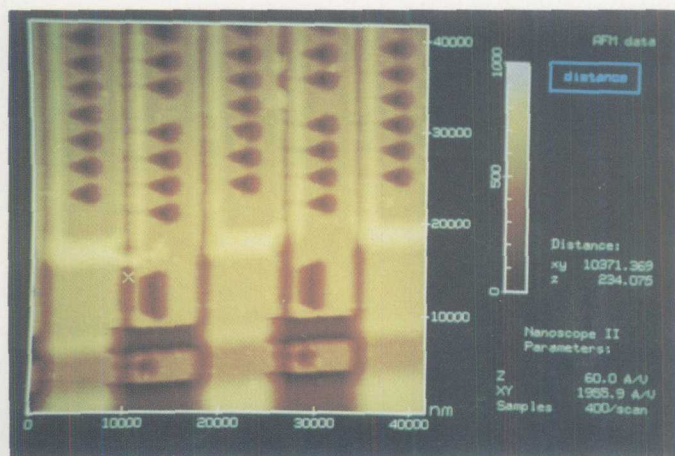
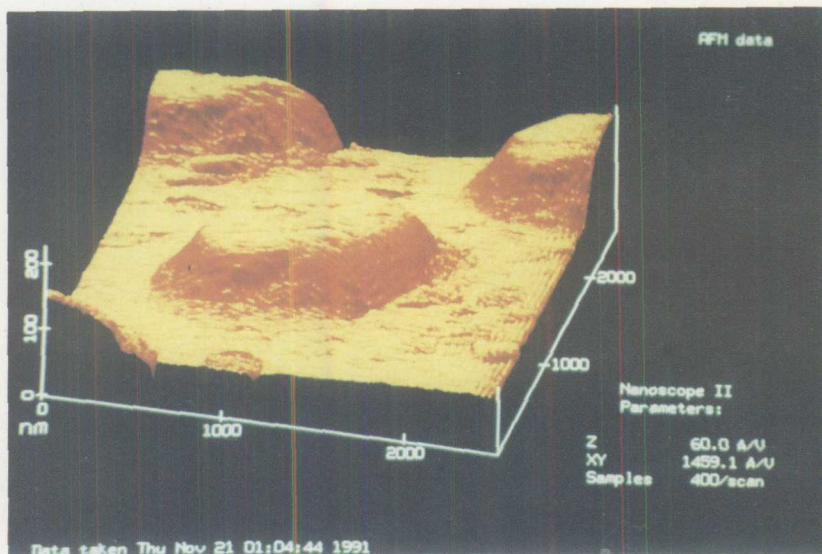


图5 质粒DNA的AFM图像

图6a,b 激光唱片的AFM图像

图7a,b 大规模集成电路的AFM图像



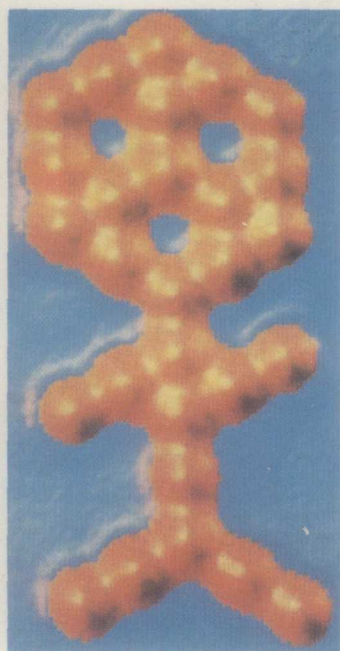
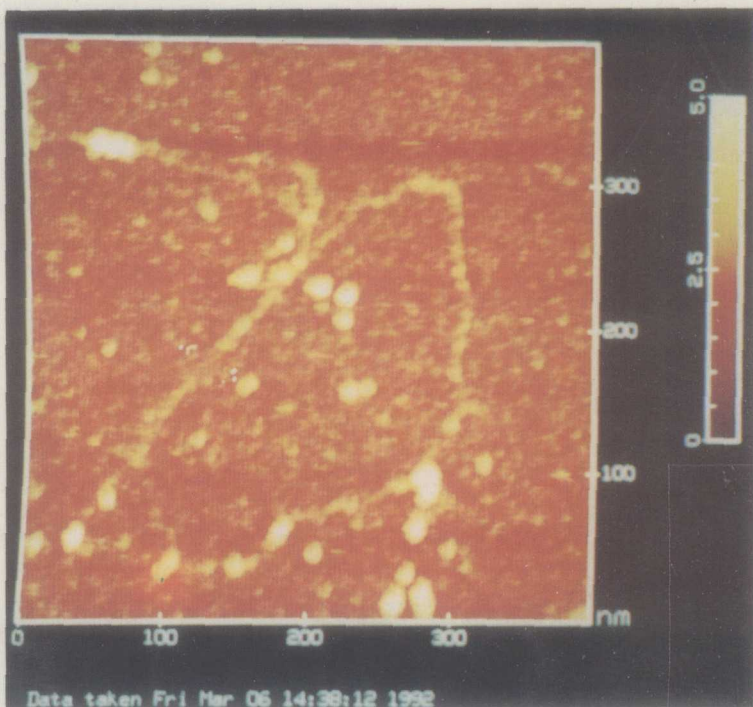
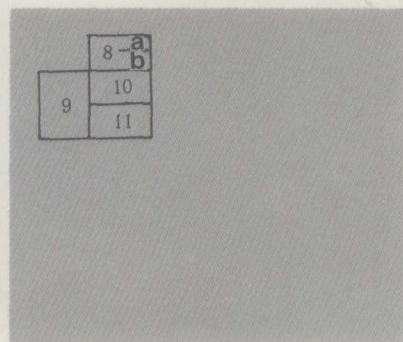
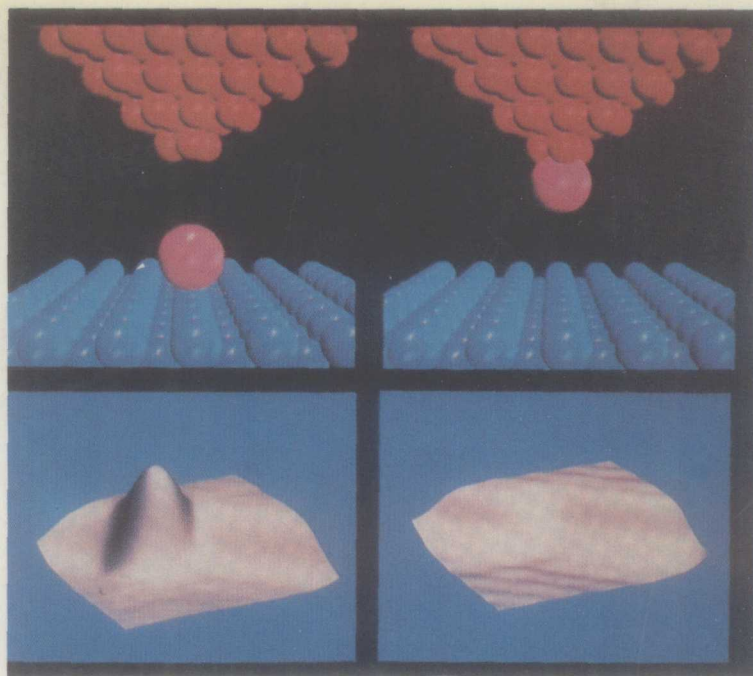


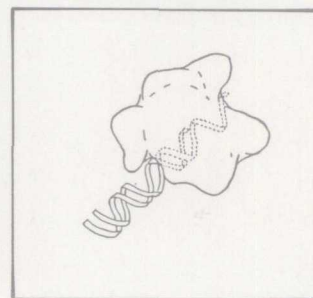
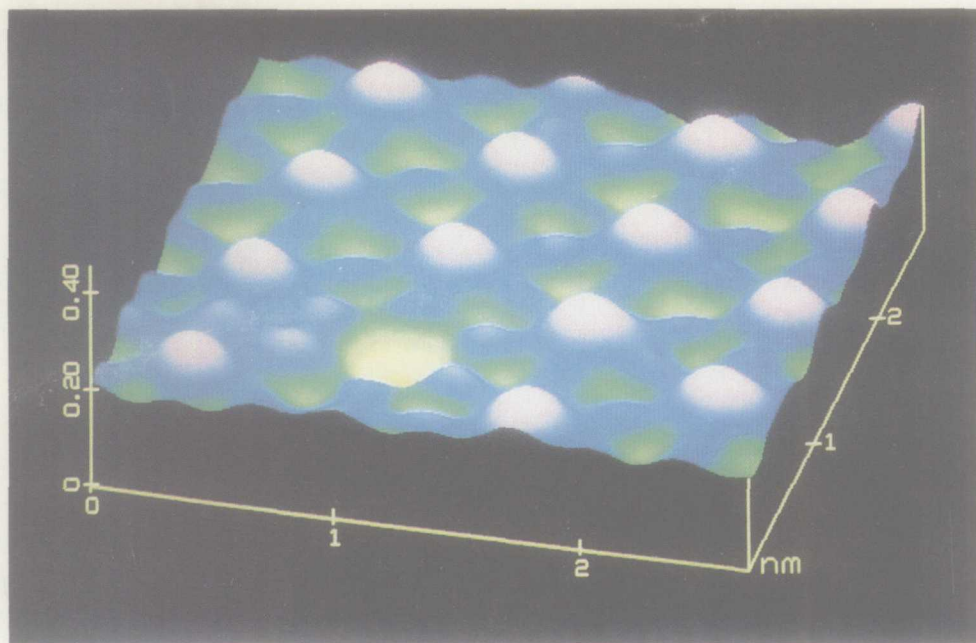
图8a,b 单原子开关实例

图9 分子排布的小人

图10 纳米刻蚀的图形(照片尺寸为50纳米×50纳米, 图形由直径为几个纳米的点刻蚀成形)

图11 质粒DNA分子的AFM分子切割(图左中部两个×号之间的部位即DNA分子链径原子力切割后的空缺部位.)





纳米科学技术一瞥

(详细说明见李民乾文)

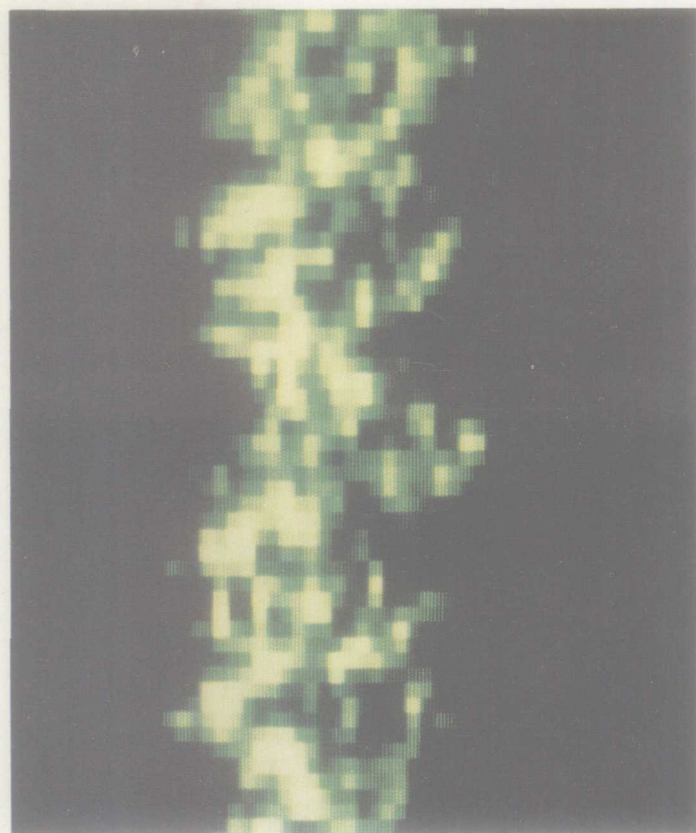


图1 在铂表面碘原子的排列

图2 平行双链DNA的STM图像(上海原子核所)

图3a,b 表证DNA复制过程的STM图像(上海原子核所)

图4 基因调控中的DNA环结构的STM图像(上海原子核所)

