

# 纳米科学技术进展

林鸿溢

(北京理工大学电子工程系 100081)

纳米技术(nano scale technology)是一门在0.1~100nm尺度空间内、研究电子、原子和分子运动规律和特性的崭新高技术学科。它的最终目标是人类按照自己的意志直接操纵单个原子,制造具有特定功能的产品。

它包括纳米物理学(nanophysics)、纳米电子学(nanoelectronics)、纳米材料科学(nanometer materials science)、纳米机械学(nanomechanics)、纳米生物学(nanobiology)、纳米显微学(nanoscopy)、纳米计量学(nanometrology)和纳米制造(nanofabrication)等。它是在现代物理学与先进工程技术相结合的基础上诞生的,是一门基础研究与应用探索紧密联系的新型科学技术。

## 一、21世纪的关键技术

人类社会进入世纪之交的关键时期,各国先后制订了国家关键技术。美国国家关键技术委员会向总统提交的《美国国家关键技术》报告中,第8项为“纳米技术”。报告指出,“微米级和纳米级制造涉及微量级(微米和原子量级纳米)的材料及器件的制造和使用”;“对先进的纳米级技术的研究可能导致纳米机械装置和传感器的产生”;“纳米技术的发展,可能使许多领域产生突破性进展”。纳米技术在美国基本上都在大学里部署。

日本和德国积极推进纳米技术的发展。日本80年代开始就以每年1.5—2.0亿美元投资于纳米技术。德国联邦研究与技术部提出21世纪初的关键技术为:新材料技术、微电子技术、纳米技术、光子学、显微技术、软件技术、纳米电子学、细胞生物工程和管理技术。可以看出有多项技术与纳米技术密切相关。

欧洲关于纳米技术的一项计划已在法国的一个实验室开始运作。为了保持欧洲的竞争力,

这项计划自然是保密的。

在我国,纳米技术同样受到国家领导的高度重视。包括国家科委、国家自然科学基金委员会和国防科工委都在组织推进这项重大的新兴科学技术的发展。

一场围绕纳米技术的世界性竞争已经开始。

## 二、纳米物理学

50年代,著名物理学家,诺贝尔物理奖获得者R.Feynman曾说:“如果有一天可以按人的意志安排一个个原子,那将会产生怎样的奇迹?”这在当时只是一个美丽的梦想。今天,纳米科学技术的诞生,将使这一美梦成为现实。

人们突破传统观念的限制,深入到物质的内部按人们的意志直接操纵单个原子,组装具有特定功能的成品,这必将深刻影响全人类的生产活动,生活方式和人类自身。

纳米物理学将深入揭示物质在纳米空间的物理过程和物性表征。它以纳米固体为研究对象,对若干重要物理问题进行研究,如结构的奇异性,鲜为人知的光学性质、特殊的导电机理、量子尺度效应和小尺寸界面效应等。这些问题的明朗化将对开发物质潜在信息和电子技术产生重大的影响。总之,既有重要的理论意义,又有重要的应用前景。

## 三、纳米电子技术

100nm被认为是微电子技术发展的极限。空间尺度在0.1~100nm定义为纳米空间。在纳米空间电子的波动性质将以明显的优势显示出来。因此,视电子为粒子的微电子技术就失去赖以工作的基础。微电子技术面临挑战。于是纳米电子技术应运而生。

利用电子的量子效应原理制作的器件称为量子器件,也称量子波器件或纳米器件。要实现

量子效应,在工艺上要实施制作厚度和宽度都只有几到几十纳米的微小导电区域(称为势阱),这样,当电子被关闭在此纳米导电区域中时,才有可能产生量子效应.这也就是制作量子器件的关键所在.如果制作若干纳米级导电区域,而导电区域之间形成薄薄的势垒区.由于电子的波动性此时明显表现出来,因此,可以从某势阱穿越势垒进入另一势阱,这就是量子隧道效应.势阱中形成电子能级,当电子受激励时,将从低能级跃迁到高能级,而当电子以高能级向低能级弛豫时,会发射一定颜色的光.这样一些量子效应在纳米技术中将得到有效应用.

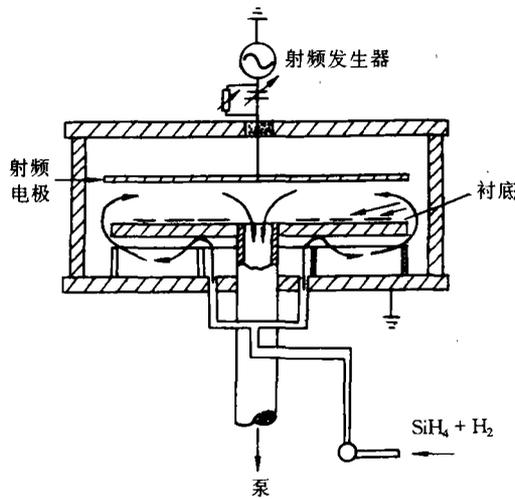


图1 PECVD系统

制作量子势阱的方法有分子束外延(MBE)、原子层外延(ALE)、等离子体增强化学气相淀积(PECVD)和有机金属化学气相淀积(MOCVD)等方法,图1是PECVD系统的反应室.

利用PECVD方法已经成功的生长纳米硅薄膜(nc-Si:H).nc-Si:H薄膜的结构特点是其内部晶态组分与界面组分各占50%,晶粒的尺寸在数纳米,界面宽度约1nm.由于nc-Si:H薄膜具有独特的结构,可以设想各纳米级晶粒之间的界面区形成势垒,则纳米级晶粒即为势阱.这样就形成所谓量子点结构.

日本NEC基础研究所制订了量子波计划,并已成功制作了量子点阵列.在GaAs衬底

上淀积InP形成的许多纳米级岛状结晶的量子点结构.当用激光照射这些量子点使之激励时,从量子点释放出呈蓝色的光,表明所制作的量子点确实有关闭电子的功能.

#### 四、控制单个电子

美国IBM公司和日本日立制作所中央研究所都已研制成功单电子晶体管.

传统的晶体管是控制成群电子的运动状态,形成开关、振荡和放大等功能的.与此不同,单电子晶体管只是控制单个电子的运动状态.器件中只有单个电子移动完成特定功能.显然是一种极限情况,所以也称为极限器件.

随着集成度的提高,功耗成为严重问题.开发单电子晶体管,只要控制一个电子的行为即可完成特定功能,可使功耗降低到原来的1/1000,从根本上解决日益严重的功耗问题.

对电子在真空中和在固体中的行为进行控制,已产生举世瞩目的辉煌成果.但是,作为电子器件,迄今为止只利用了电子波粒二象性的粒子性;其次,各种传统电子元器件都是通过控制电子数量来实现信号处理的.例如开关器件是以控制电子流的有或无来实现电路通断的;放大器件则是通过控制通过的电子数量多少来完成放大功能的,等等.而量子器件不单纯通过控制电子数目的多少,主要是通过控制电子波动的相位来实现某种功能的.因此,量子器件具有更高的响应速度和更低的功耗.

现有的Si和GaAs器件无论怎样改进,其响应速度最高只能达到 $10^{-12}$ 秒,功耗最低只能降至 $1\mu\text{W}$ .然而量子波器件在响应速度和功耗方面可以比这个数据优1000倍.由于器件尺度为纳米级,集成度大幅度提高,同时还具有器件结构简单,可靠性高、成本低等诸多优点,因此,有理由相信纳米电子学的发展,必将在电子学领域中引起一次新的电子技术革命,从而把电子工业技术推向一个更高的发展阶级.

#### 五、纳米态的奇异性

德国物理学家格莱特(Gleiter)在一次穿越大沙漠的旅行中的创造性思维导致1984年纳米金属材料的研究成功.物理学的传统观念,视

晶体的有序排列为物质的主体,而其中的缺陷、杂质等是次要的.格莱特提出如果把缺陷作为主体,那该是一种怎样的物质?经过多年研究,他终于获得双组元材料,即晶态组元和界面组元,二者的体积各占 50%.晶态组元原子仍然是有序排列的,而界面组元则存在大量缺陷,原子有序排列发生变化.这种具有特殊结构的材料被称为物质新态——纳米态材料.

实验表明,纳米材料具有许多鲜为人知的奇异特性.

纳米铜(晶粒尺寸为 8nm)的自扩散系数比晶格扩散系数增大  $10^{19}$  倍! 纳米铜的膨胀系数比普通铜成倍增大;纳米硅的光吸收系数比普通单晶硅增大几十倍(见图 2);在普通情况下陶瓷是脆性材料,因而限制了其应用范围.纳米  $\text{TiO}_2$  陶瓷却变成韧性材料,在室温下可以弯曲,塑性形变高达 100%;纳米金属颗粒以晶格形式淀积在硅表面时,可以形成高效电子元件或高密度信息存贮材料;超细颗粒铁表面覆盖一层 5~20nm 厚的聚合物,可固定大量蛋白质或酶,在控制生物反应和酶工程中将起重要作用;北京理工大学实验室研制的纳米 ZnO 薄膜具有很好的 C 轴取向,有良好的压电效应;据英国《科学与共同政策》杂志报道,已经制备成功一种尺寸只有 4nm 的复杂分子,具有“开”和“关”特性,可以由激光驱动,开关时间很快,这将为激光计算机的研制提供技术基础.

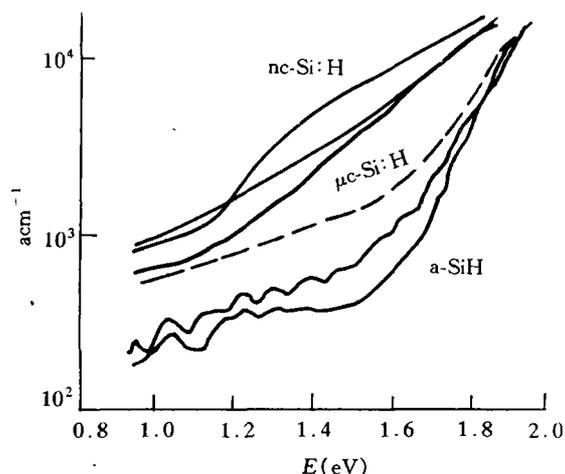


图 2 纳米硅光吸收系数

## 六、行进在血管中的 纳米机器人

纳米生物学的近期设想,是在纳米尺度上应用生物学原理,发现新的现象.研制可编程的分子机器人,也称纳米机器人.目前涉及的内容可归纳为以下三方面:(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;(2)在纳米尺度上获得生命信息.例如利用扫描隧道显微镜(STM)获取细胞膜和细胞器表面的结构信息,利用纳米传感器(nano sensor)获得各种生化反应的化学信息和电化学信息;(3)纳米机器人(nanorobot)的研制.

纳米机器人是纳米生物学中最具诱惑力的内容.第一代纳米机器人是生物系统和机械系统的有机结合体,如酶和纳米齿轮的结合体.这种纳米机器人可注入人体血管内,可以进行全身健康检查,疏通脑血管中的血栓,清除心脏动脉脂肪淀积物,吞噬病毒,杀死癌细胞.

第二代纳米机器人是直接从原子或分子装配成具有特定功能的纳米尺度的分子装置.

第三代纳米机器人将包含有纳米计算机.这是一种可以进行人机对话的装置.这种纳米机器人一旦研制成功,有可能在 1 秒钟内完成数 10 亿次操作.人类的劳动方式将产生彻底的变革.

## 七、原子世界奇观

扫描隧道显微镜(STM)是 IBM 公司苏黎士研究所宾尼格(G. Binnig)和洛旭(H. Rohrer)于 1981 年发明的.STM 是一种基于量子隧道效应的新型高分辨率显微镜.它是继第一代光学显微镜和第二代电子显微镜之后的第三代显微镜,能从迄今为止最高的原子级空间分辨率来观测物质表面原子或分子的几何分布和态密度分布,确定物体局域光、电、磁、热和机械特性.STM 结构小巧,操作方便,人们可以在大气或液体中对样品进行原子级分辨的无损观测.为表彰这一具有深远影响和现实意义的发明,两位发明者共同获得 1986 年诺贝尔物理学奖.

根据量子力学原理,多原子尺度针尖与被

研究物质表面非常靠近( $<1\text{nm}$ )时,在外加电场作用下,电子会穿越针对被测物体表面间的空隙,而产生隧道电流,即量子隧道效应.实验表明,隧道电流对针尖与样品表面之间的距离十分敏感,此距离每减小 $0.01\text{nm}$ ,隧道电流可增加一个数量级.

STM 利用量子隧道效应,可以实时测量物体表面的实空间三维图像.测量分辨率极高,对平行和垂直于表面方向分别为 $0.1\text{nm}$ 和 $0.01\text{nm}$ .以如此高的分辨率对物质表面原子结构进行直接观测,将会实现人类长期以来孜孜不倦追求的直接观察原子真面目的愿望.

STM 不仅具有原子级空间高分辨率,而且还具有广泛的适用性,如刻划纳米级微细线条,移动原子等当今最高层次的实际操作.因此 STM 已成为纳米科学技术的主要工具.图 3 是用 Xe 原子排列的 IBM 字样.

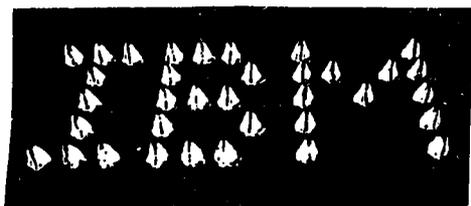


图 3 Xe 原子排列的 IBM 字样

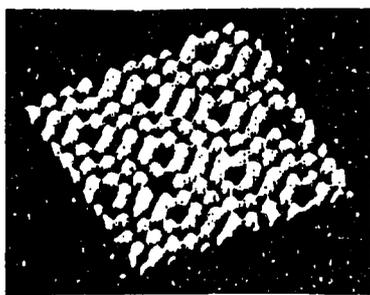


图 4  $7\times 7$  占优势 Si(111)表面的 STM 三维图像

STM 不仅是纳米电子学和纳米材料科学的有力工具,而且可在自然条件下对生物大分子进行原子级直接观察,因而 STM 在生命科学研究中具有极大的潜力.人们借助 STM 可以看到一个多姿多彩的原子世界的真面目.在英

国《自然》上发表的用 Xe 原子排列的 IBM 字样(如图 3),则显示了按照人类的意志操纵排布单个原子的事实.图 4 是 Si(111)表面的 STM 三维图像.

## 八、当今最微小的操作

美国康乃尔大学的科学家基于扫描隧道显微镜发展了一种新型电子显微镜,称为弹道电子发射电镜(BEEM).在一个有金覆盖的硅片上,利用 BEEM 可以刻写出线宽仅为几个纳米的小字母.这就是信息存贮器的数据密度可比现有的磁盘或光盘提高几个数量级的秘密所在.

纳米马达已实现纳米级驱动和定位.日本的 Yoshida 系统定位精度达 $1\text{nm}$ ,驱动速度达 $200\text{mm}/\text{s}$ .

扫描隧道显微镜已实现拨动一个一个原子的操作,因此 STM 已成为一种最重要的纳米机械装置.

纳米机器人还可以用来进行人体器官的修复工作,如修复损坏的器官和组织,做整容手术,从基因中除去有害的 DNA,或把正常的 DNA 安装在基因中,使机体正常运行.

## 九、结束语:重大突破的前夜

纳米科学技术是跨世纪的新学科,必将发展成为 21 世纪最重要的高技术.它已成为国际科学界和工程技术界关注的热点.在纳米尺度上重新认识和改造客观世界,确实是颇具激动人心的事情.目前,纳米科学技术正处于重大突破的前夜,它已经取得的一系列成果,已足以使全世界为之震动,并引起全世界关心未来发展的科学家的思索.美国 IBM 公司首席科学家 Amotrong 说:“正如 70 年代微电子技术引发了信息革命一样,纳米科学技术将成为下一世纪信息时代的核心.”人们正注视着纳米科学技术领域不断涌现的奇异现象和新进展.纳米技术前景诱人,预计将对经济建设,国防实力,学科发展,以至社会进步产生巨大的影响.