



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FUND PROJECT



国家出版基金资助项目
湖北省学术著作出版专项资金资助项目
智能制造与机器人理论及技术研究丛书
总主编 丁汉 孙容磊

微纳运动实现技术

冯显英 杜付鑫◎著



WEI-NA YUNDONG SHIXIAN JISHU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

内 容 简 介

本书介绍了微纳米技术领域的各种微纳运动系统及其相关实现技术。全书共7章:第1章主要是微纳技术及微纳技术应用与发展的综述;第2章主要介绍了基于智能材料的常见的微纳驱动技术类型及特性;第3章主要介绍了微纳运动检测技术;第4章概括性地介绍了微纳运动系统控制策略;第5章介绍了基于直线电机的单自由度微纳定位实现技术,主要讨论了电磁式和压电超声式两种情况;第6章主要介绍了单自由度宏微复合微纳运动的实现技术,并讨论了非线性因素对微纳运动性能的影响和补偿策略;第7章重点介绍了本书作者提出的宏微复合微纳运动的实现技术、性能特点及低速性能。

本书具有很强的针对性、概括性和指导性。通过本书,读者可以系统、全面地了解各种微纳运动实现技术。本书可作为精密机械工程、机电工程、控制工程、仪器科学与工程、材料科学与工程、微电子科学等专业本科生、研究生关于微纳制造的导论性教材,同时也可作为医工交叉学科及其他相关领域研究生和广大科学工作者、工程技术人员的学习参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

微纳运动实现技术/冯显英,杜付鑫著. —武汉:华中科技大学出版社,2020.7
(智能制造与机器人理论及技术研究丛书)
ISBN 978-7-5680-6152-0

I. ①微… II. ①冯… ②杜… III. ①纳米技术-应用-进给-研究 IV. ①TK223.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第106104号

微纳运动实现技术

冯显英 杜付鑫 著

Wei-na Yundong Shixian Jishu

策划编辑:俞道凯

责任编辑:邓 薇

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)
武汉市东湖新技术开发区华工科技园

电话:(027)81321913

邮编:430223

录 排:武汉三月禾文化传播有限公司

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:11.5

字 数:201千字

版 次:2020年7月第1版第1次印刷

定 价:96.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



目录

第 1 章 绪论	/1
1.1 对微纳技术的理解	/1
1.2 微纳技术的应用	/3
1.3 微纳运动实现技术及其进展	/22
第 2 章 智能材料微纳驱动技术	/31
2.1 概述	/31
2.2 形状记忆合金微纳驱动技术	/32
2.3 超磁致伸缩材料微纳驱动技术	/38
2.4 压电陶瓷微纳驱动技术	/41
2.5 热微纳机电驱动技术	/50
第 3 章 微纳运动的传感检测	/54
3.1 概述	/54
3.2 微纳位移传感技术	/54
3.3 激光干涉微纳检测技术	/74
3.4 其他先进微纳检测技术	/80
第 4 章 微纳运动控制技术	/83
4.1 概述	/83
4.2 常用微纳运动控制策略	/83
4.3 其他先进控制策略及研究	/100



第 5 章	直线电机微纳运动实现技术	/103
5.1	概述	/103
5.2	电磁式直线电机微纳运动系统	/104
5.3	压电超声电机微纳运动系统	/110
第 6 章	宏微复合微纳运动实现技术	/120
6.1	概述	/120
6.2	宏微复合微纳运动系统	/121
6.3	宏微复合微纳运动系统的非线性影响及控制	/124
6.4	宏微复合微纳运动系统应用	/135
第 7 章	宏宏复合微纳运动实现技术	/138
7.1	宏宏复合微纳运动系统工作原理	/138
7.2	宏宏复合微纳运动系统的动力学模型	/144
7.3	宏宏复合微纳运动系统的低速特性	/152
参考文献		/164



第 1 章

绪论

1.1 对微纳技术的理解

人类对自然界的认识和改造能力经过漫长历史的发展,已经由传统尺度迈向微纳尺度;工业产品的开发层次已经由传统宏观层次转向微纳观层次,达到微纳米量级。目前国际上已经开始了基因重组与编辑、光量子通信与计算、超导、碳纳米管与纳米结构自组装、微纳生物组装等前沿科技竞争。由于微纳技术关系到国家未来的发展与安全,因此各个发达国家不断投入巨资争夺微纳技术的战略制高点。

微纳技术是 20 世纪 80 年代末在美国、日本等发达国家兴起的高新科学技术。由于具有巨大的应用前景,自问世以来,微纳技术就受到了各国政府和学者的普遍重视,是当前科技界的热门研究领域之一。微纳技术涉及学科和领域很广,目前似乎还没有一个十分确切的定义。鉴于微米、纳米是一种长度计量单位,从狭义上看微纳技术就是对物质产品的可控尺度达到微纳米级的尺寸大小,而从广义上看则可以理解为:微纳技术对物质产品的认识尺度达到了微纳米级。换句话说,微纳技术是在微米、纳米尺度(从原子、分子到亚微米尺度之间)上研究物质的相互作用、组成、特性与制造方法的技术,是微米、纳米量级的材料、设计、制造、测量、控制和产品的研究、加工、制造及应用技术。

各行各业尖端前沿制造科技的发展,对加工精度要求日益苛刻,传统的加



工精度已远远不能满足诸如硅芯片、大规模集成电路等高端制造的要求,因此,在微纳尺度领域就衍生发展出微纳级表面形貌测量技术,微纳级表层物理、化学、力学性能的检测技术,微纳级精度的加工技术,微纳级表层原子和分子的加工、去除、搬迁和重组技术,纳米级微传感器和控制技术,微型和超微型机械,微机电系统(micro electro mechanical system, MEMS)、纳米机电系统(nano-electro mechanical system, NEMS)和其他综合系统,以及纳米材料、纳米生物学、纳米光学等诸多细分领域的微纳科学与技术。当今,微纳技术的应用也正在极速拓展,渗透到众多学科领域和行业应用中。

在2000年,美国制定了第一个正式的国家纳米技术的启动计划——the U. S. National Nanotechnology Initiative (简称 NNI),其中将纳米技术定义为:包含科学、工程和技术在内的对尺度在1 nm到100 nm之间的物质的理解与控制。纳米技术包含了与材料、器件和系统相关的具有纳米尺度结构和部件的新特性和新功能的研究和发展,并与信息技术、生物工程和认知科学等一起,将会发生深刻的变革和进步,涉及物理、化学、光学、医学、生物医疗、生态环保等诸多领域。纳米技术的研究与开展对世界经济、国家与领土的安全和发展具有重大的战略意义。

微机电系统(MEMS)的典型尺寸一般在100 nm到1 mm之间,其加工制造主要是指在硅、聚合物或其他材料上,利用化学的湿法腐蚀、干法刻蚀,机械与物理的材料去除加工等方法来加工。

纳米尺度一般是指1~100 nm,纳米科学是研究纳米尺度范畴内原子、分子和其他类型物质运动和变化的科学,而在同样尺度范围内对原子、分子等进行操纵和加工的技术则称为纳米技术。尺寸小于100 nm的加工系统被视作纳米机电系统(NEMS)。从生物体的角度来讲,构成人类一些结构单元的尺度都在微米、纳米尺度;从材料学科上讲,微纳技术涉及微米、纳米尺度材料的制备和物性的研究,如碳纳米管、纳米球、纳米带、硅微孔的制备,以及该尺度下微硬度、弹性、黏性、导电性等特性的研究;从观察与操作上来讲,微纳技术是将高分辨透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)、扫描隧道显微镜

(scanning tunneling microscope, STM)、原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 等设备用于微纳尺度观察、检测和进行微纳米操作的研究技术;从微纳制造技术和应用的层面上来讲,微纳制造技术是指能够稳定、可重复、可控制地进行微米和纳米尺度结构制造的技术。

1.2 微纳技术的应用

随着现代技术的发展,目前微纳技术已广泛应用于大规模集成电路、光学器件、微创医疗与保健机器人、生物与微纳传感器、驱动器、纳米功能材料、表面改性、成膜与涂层等领域,涉及电子、机械、光学、物理、化学、材料、生物等多种学科,是基于制造技术的融合交叉新技术,并涵盖了微机械加工、表面成膜、半导体加工、纳米制造和生物制造等多种技术。微纳技术的研究、发展和应用渗透到各个领域,如图 1-1 所示。

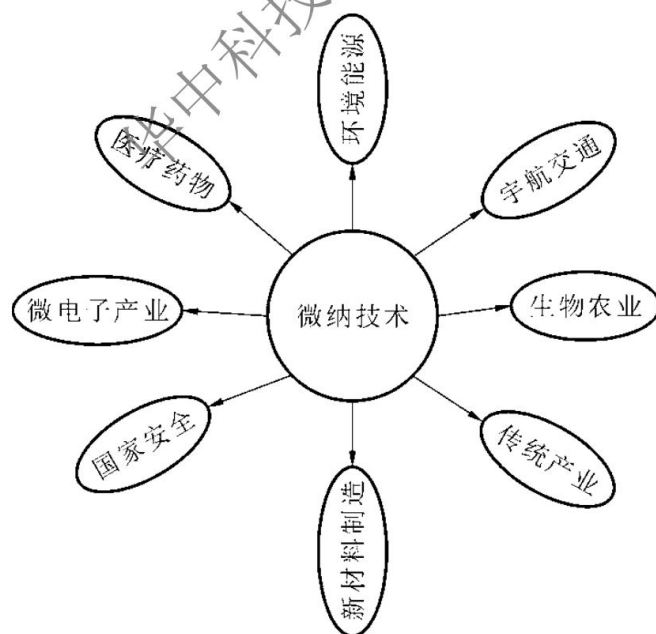


图 1-1 微纳技术应用领域



1.2.1 微纳米电子器件

微纳米电子器件指利用纳米级的微机电加工和制备技术,设计制备而成的具有纳米级尺度和特定功能的电子器件。要制备微纳米电子器件及实现其集成电路,有两种可能的方式。一种方式是将现有的电子器件、集成电路进一步向微型化延伸,研究开发更小线宽的加工技术来加工尺寸更小的电子器件,即所谓的“由上到下”的方式。另一种方式是利用先进的纳米技术与纳米结构的量子效应直接构成全新的量子器件和量子结构体系,即所谓的“由下到上”的方式。

微纳米电子器件“由上到下”的制备方法主要包括光学光刻、电子束光刻和离子束刻蚀等技术;“由下到上”的制备方法则包括金属有机化学气相沉积,分子束外延、原子层外延等外延技术,扫描探针显微镜技术,分子自组装合成技术,以及特种超微细加工技术等。通过上述两种加工方式,可以制备出多种多样的微纳米电子器件,并将其应用于各个领域。

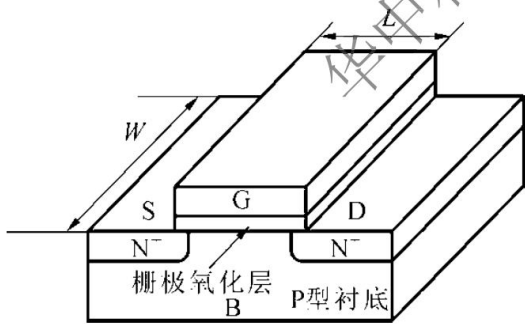


图 1-2 MOSFET 的器件示意图

依据微纳米器件的加工技术和分类组成,将其应用于各行各业,主要包括机电器械、生物医疗、材料制备、微电子和计算机行业。20 世纪 60 年代, Kahng 和 Atalla 应用热 SiO_2 结构提出并制造了世界上第一只金属-氧化物-半导体场效应晶体管

(metal-oxide-semiconductor field effect transistor, MOSFET)。在此后的几十年里,以硅基 MOS 集成电路为代表的微电子技术迅速发展,单一芯片上集成的晶体管数量,即集成电路的集成度,从发明初的几颗扩展为现今的数十亿颗,且其发展速度基本上符合摩尔定律。图 1-2 展示了 MOSFET 的器件示意图。

在集成电路与器件物理的高速发展过程中,摩尔定律与 MOSFET 的器件始终处于核心指导地位,为微电子技术的发展奠定了扎实的基础,不断定义先

进的技术节点。

在航空航天、汽车检测、超声医疗、无损检测等领域,基于压电效应实现微纳尺度的压电材料,在微纳器件上具有很多应用,主要包括压电陶瓷(PZT)、压电晶体、压电纤维、压电薄膜、压电聚合物等,具有响应速度快、测量精度高等特点,既能用于制作传感器又能用于制作执行器。国内外对压电材料的研究已经有几十年了,但在结构的改进、新器件的开发应用上仍然有很大的探索空间。

压电材料在微电子领域已经有很多的应用,主要集中在各类传感器和执行器中的压电谐振器,它是微电子器件的一个重要分支,也是压电材料的一个重要应用。常见的压电谐振器是薄膜体声波谐振器(film bulk acoustic resonator,FBAR),以及压电微机械梁谐振器。美国的 Kerherve 等研究出了第一款集成 FBAR 滤波器的 WCDMA(宽带码分多路访问)接收芯片,该芯片采用的是 AlN 作为传感部分,如图 1-3 所示。虽然该芯片在工艺程度及成本上都未达到产业化的地步,但这一成果促进了薄膜体声波传感器的集成化。

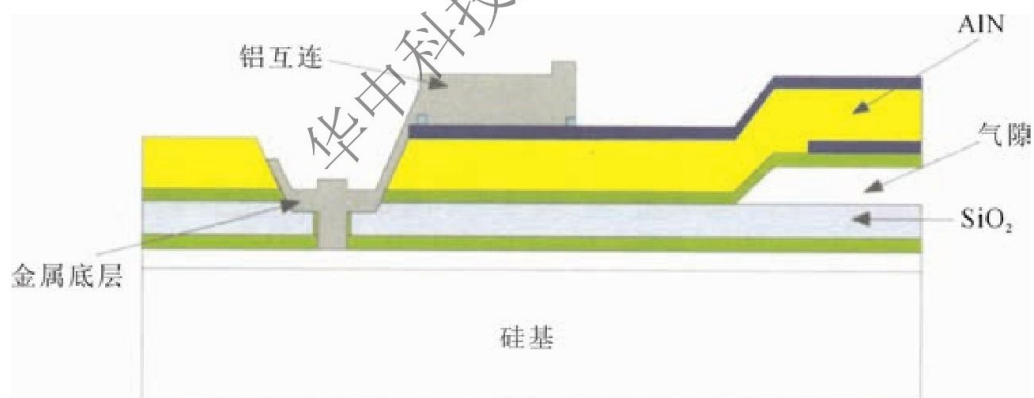


图 1-3 AlN 压电谐振器

经过多年的发展,压电材料更加广泛地应用于基于压电纤维的能量收集器、超声换能器等,基于压电薄膜的 ZnO 压力传感器、PZT 压电薄膜的微驱动器、压电微加速度计等。

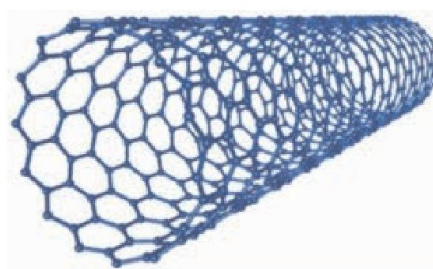


图 1-4 碳纳米管

图 1-4 所示的碳纳米管(carbon



nanotube, CNT), 因优异的电学、热学、机械特性和化学稳定性, 以及独特的一维纳米结构, 成为应用在微纳米电子器件中的理想功能材料。与传统电子器件相比, 采用 CNT 制作的微纳米电子器件性能更为优异。

CNT 与金刚石、石墨、富勒烯一样, 是碳的一种同素异形体, 具有以一种管状的碳分子形成的六边形组成的蜂窝状结构骨架。作为一维纳米材料, CNT 质量轻, 六边形结构连接完美, 具有许多异常的力学、电学和化学性能。因此, 它被广泛应用于诸多领域, 例如, 基于导电性, 被应用于锂电池的设计优化中; 基于质量轻盈与新生产物氮化硼纳米管 (boron nitride nanotube, BNNT) 等高级纳米材料, 被广泛用作 3D 打印材质, 对航空航天、国防、能源、汽车、健康等多个行业意义重大; 基于六边形的完美结构, 被应用于液晶显示器和部分传感器, 如 CNT 热膜传感器、CNT 化学传感器等。这些应用 CNT 制作的传感器具有灵敏度高、响应速度快、体积小、功耗低和恢复性强等优点, 具有传统传感器无法比拟的优势, 可广泛应用在环境、农业、机械和医药等领域。

在当前电子技术微型化和高度集成化的趋势下, 多铁性纳米材料的研究正逐渐成为一个重要主题。通过对多铁性材料中多重铁性能顺序参量共存、竞争、耦合行为的深入细致探索, 不断挖掘出各种新颖的物理机制, 可开发全新概念的量子信息器件, 如多铁磁感应探头, 非易失性多铁逻辑器件、高速高密度的电读、磁写、随机存储器件等。依据如图 1-5 所示的多铁纳米点制备方法, 结合压印技术, 还可制备长程有序的纳米点阵列, 并制造高密度多铁性器件。在此基础上, 还可以设计纳米点复合多铁性材料, 实现室温下的多铁性。

综上所述, 微纳米电子器件有很多制备方法, 应用也多种多样, 主要表现为压电陶瓷半导体材料和硅质材料微纳米电子器件, 生物医疗器械中的纳米材料电子器件, 机械领域内 3D 打印的微组件、微机电纳米电子元件, 以及化学领域内的多铁纳米结构和锂电池中的应用, 涉及的领域非常多, 研究应用的空间也很广阔。

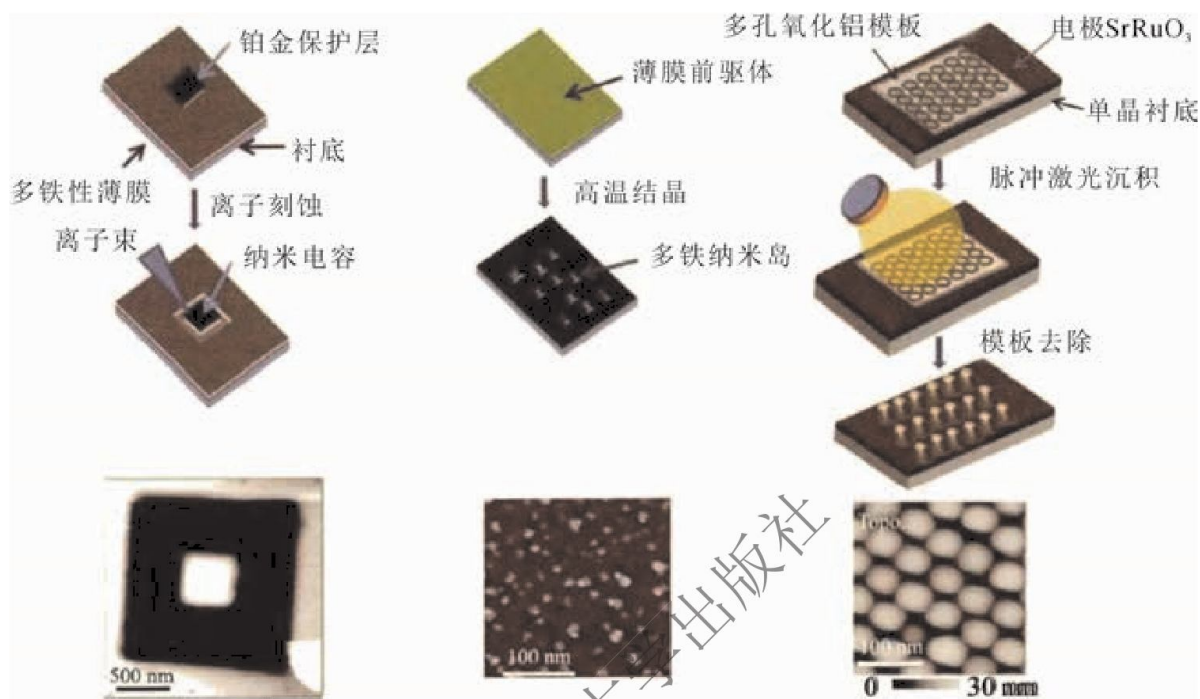


图 1-5 多铁纳米点制备方法示意图

1.2.2 纳米织构材料及碳纳米材料

从材料学科角度讲,微纳技术涉及微纳米尺度材料的制备及其物性的研究,如碳纳米管、纳米球、纳米带、硅微孔的制备,以及该尺度下微硬度、弹性、黏性、导电性等特性的研究。通过操纵物质的原子、分子结构,微纳技术实现对材料功能的控制。它使人类认识和改造物质世界的手段和能力延伸到原子和分子尺度,最终目标是直接以原子和分子,以及物质在纳米尺度下表现出来的新颖的物理、化学和生物学特性,制造出具有特定功能的产品。

1. 碳纳米材料

以碳为骨架的有机化合物构成了这个多姿多彩的世界。长期以来,人们认为碳元素只以金刚石、石墨两种同素异形体存在。金刚石具有由四配位的 SP^3 碳原子形成的三维网状结构。石墨具有由三配位的 SP^2 碳原子形成的平面片层结构,基本单元是平面六元环。



Hamwi 报道,碳纳米管在常压及真空或有惰性气体保护的情况下,2800 °C 退火后其结构得到大大改善。Ajayan 在大气中加热碳纳米管,发现在 850 °C 退火 15 min 后样品全部消失。利用透射电镜和扫描电镜研究碳纳米管在高压高温下退火时的相转变规律及机制发现,碳纳米管在高压高温下是不稳定的,其相转变规律为:碳纳米管→碳纳米洋葱→金刚石。在上一小节中,已经阐述碳纳米管的微观结构(见图 1-4),而碳纳米洋葱的微观形态为多层石墨面构成的洋葱状或多面体状颗粒,尺寸在纳米数量级。在制备高强度复合材料及减摩材料方面,碳纳米洋葱有广阔的应用前景。碳纳米洋葱最初是在用激光法合成 C₆₀ 等富勒烯的同时伴随合成的。随后用改进的直流电弧法合成富勒烯时,又在阴极沉积物中发现了碳纳米管和碳纳米洋葱。当然还有其他方法可以合成碳纳米管和碳纳米洋葱。总体而言,富勒烯、碳纳米管和石墨都是在石墨烯的基础上转变合成而来的。图 1-6 所示为不同结构的石墨烯,图 1-7 所示为不同维度下的碳纳米结构形态。

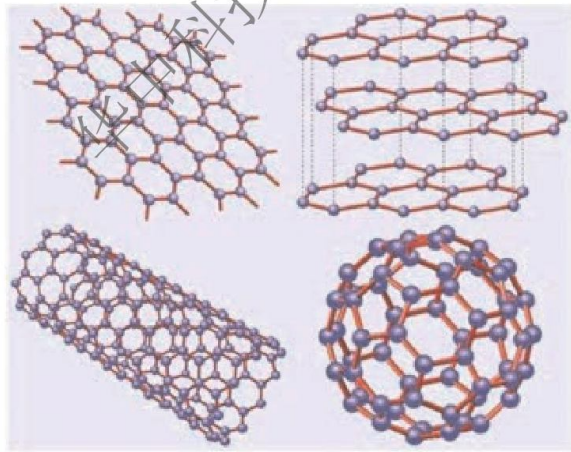


图 1-6 不同结构的石墨烯

2. 碳纳米材料的制备

图 1-6、图 1-7 所示的石墨烯又称单层石墨烯,具有一种二维平面的蜂窝状结构,也是零维的富勒烯、一维的碳纳米管及三维的石墨最基本的组成单元。碳纳米管可以看作由石墨烯直接无缝卷曲而成,根据层数的不同,可以分为单壁碳纳米管和多壁碳纳米管。而根据卷曲向量的不同,单壁碳纳米管又可以表

现出金属性或半导体性两种特性。正是凭借这些性质,单壁碳纳米管在纳米电子学领域有着令人瞩目的应用前景。二维的石墨烯本身具有半金属性,或者说是零带隙的半导体,同时具有金属和半导体的一些特性。

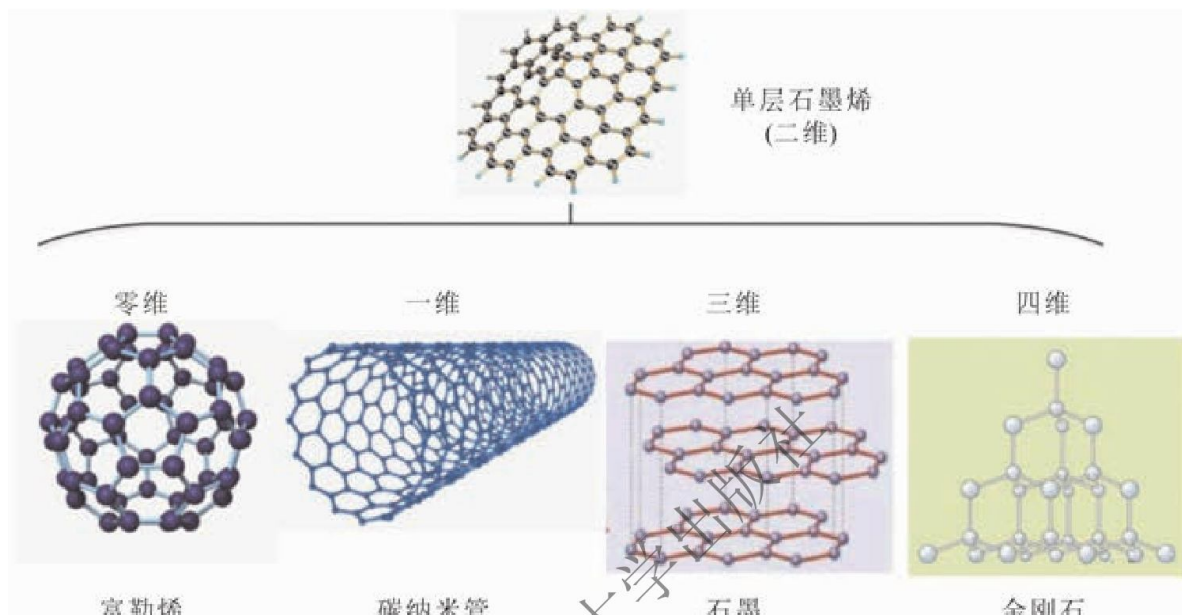


图 1-7 不同维度下的碳纳米结构形态

正是由于石墨烯纳米带与碳纳米管之间有着紧密的联系,因此通过打开碳纳米管来制备石墨烯纳米带就成为可能。由最初的机械剥离法演变为后来的各式各样的制备法,这一进化过程使得制备工艺更加精准。莱斯大学(Rice University)通过研究发现,使用浓硫酸和高锰酸钾处理多壁碳纳米管,可以将碳纳米管打开并制得水溶性的石墨烯纳米带。同时,斯坦福大学(Stanford University)利用等离子刻蚀的方法,也能将多壁碳纳米管打开制备得到石墨烯纳米带,而且该方法的可控性更强。墨西哥研究小组发现,通过锂和液氨插层后再剥离的方法或者直接通过过渡金属(Ni、Co等)催化剪切的方式,也能将碳纳米管打开制得石墨烯纳米带。这四种方法如图 1-8 所示。

随着微纳驱动技术的发展,目前化学气相沉积(chemical vapor deposition, CVD)法已经逐渐取代了其他制备方法而成为大尺寸石墨烯制备的研究热点。通过化学气相沉积方法在图案化的 Cu 膜上制备覆盖基底的石墨烯的过程如图 1-9 所示。

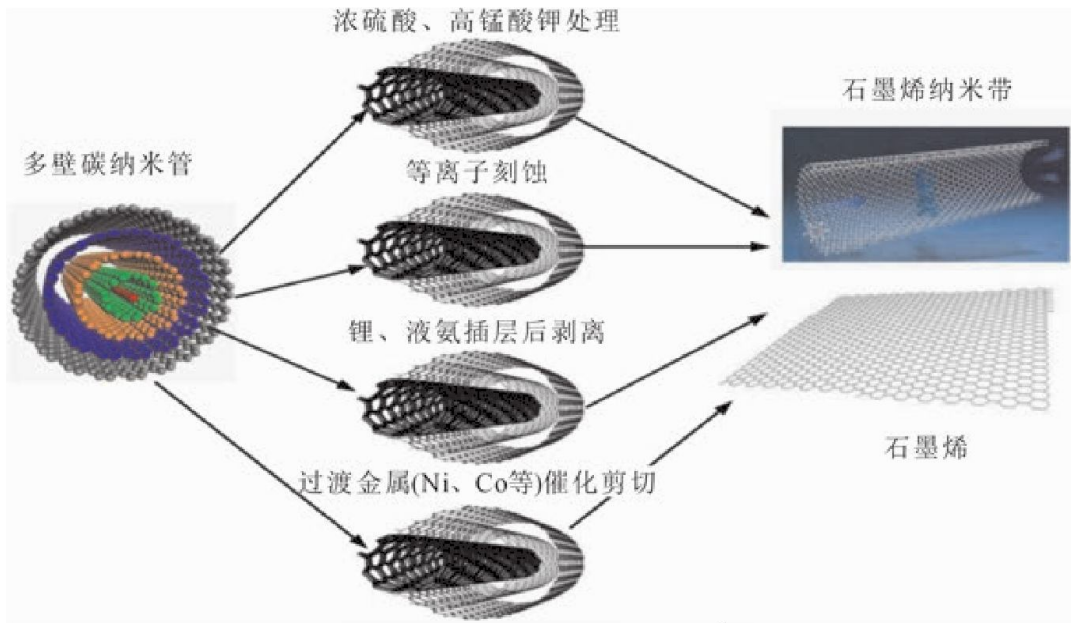


图 1-8 通过碳纳米管打开制备石墨烯纳米带的四种途径

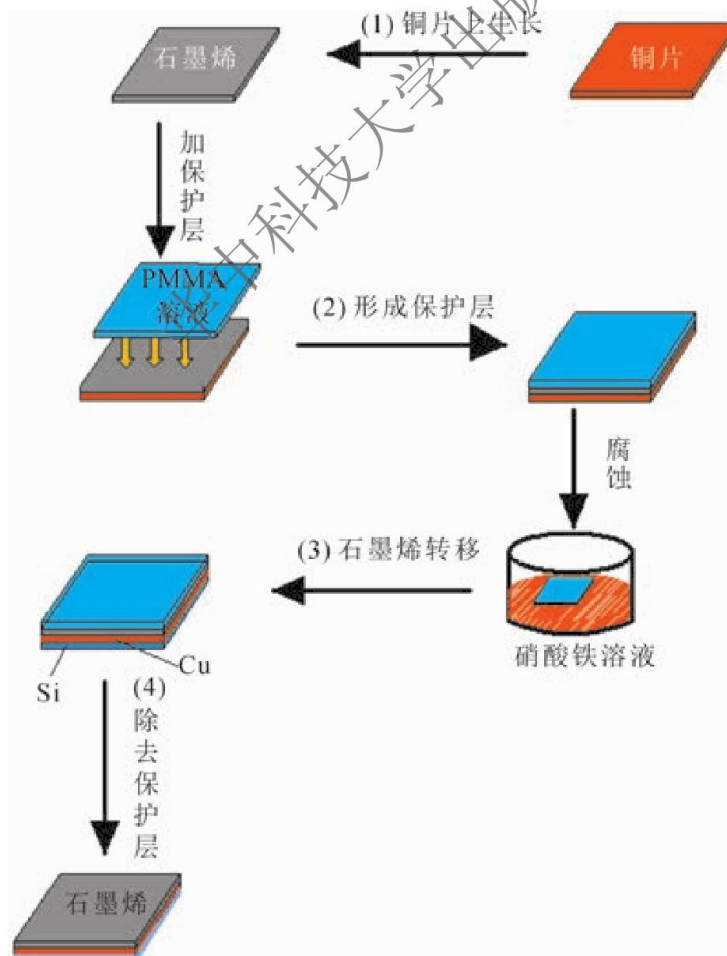


图 1-9 CVD 法制备石墨烯

3. 碳纳米材料的应用

碳纳米材料是纳米材料领域重要的组成部分,主要以碳纳米管、富勒烯、石墨烯、纳米钻石及其衍生物等结构形态存在。由于其独特的理化特性,上面这四类碳纳米材料在生物传感、生物医学工程、环保化工等领域有着广泛的应用前景。

(1)生物传感器方面的应用。石墨烯所具有的优良的电子、光学、热学、化学和力学性能,使其具有构筑探针分子和信号传递并放大的三重作用,使其成为应用于超灵敏生物传感器的理想材料。快速的电子传递和可多重修饰的化学性质使其能够实现准确而高选择性的生物分子检测。石墨烯及其复合材料在酶传感器、免疫传感器、基因传感器,以及一些生物小分子的检测等方面的应用十分广泛。

(2)生物医学工程领域的应用。例如,将碳纳米管与骨骼组织中的羟基磷灰石制成复合材料,有望在保持其生物相容性的同时,大大提高其力学性能;通过在层层自组装制备的单壁碳纳米管(SWCNTs)上培养鼠胚胎神经干细胞的研究发现,细胞能够分化为神经元和星形胶质细胞;有学者研究制备了层连蛋白-SWCNTs 薄膜,发现这种薄膜可以作为神经电极材料,促进神经干细胞的分化。在基因转染方面,已经发现碳纳米管转染 β -gal 基因的例子,发现带正电荷的氨基化多壁碳纳米管转染率高,这为基因载体治疗提供基础。此外,纳米钻石在基因载体领域的应用是目前一个新的研究方向。

(3)环境、化工领域的应用。重金属(铅、镉、铬、汞、镍等)及类金属砷一类具有高毒性、难降解、生物富集等特点的环境污染物,对生态环境和人类健康损害极大,而碳纳米管和石墨烯可用作吸附材料,去除水中重金属污染物。碳纳米管吸附重金属的效果主要受溶液初始 pH、接触时间、重金属离子的初始浓度、吸附剂的量等因素的影响。碳纳米材料在环境中的转化和降解直接影响它们在环境中的归趋及生态毒性,对该过程的研究是确定其环境可容纳量及进行生命周期评价的重要环节。

对于具有大比表面积、高电导率和良好生物相容性的碳纳米管、碳纳米纤



维和石墨烯,它们在电化学领域的应用也是一个研究热点。如在超级电容器和燃料电池中的应用,它们作为燃料电池中的催化剂,能够提高燃料电池的能量密度、燃料利用率和抗中毒能力。此外,新型碳纳米材料可以应用在增强铜基复合材料的研究上,得到性能优良的高强度、高电导率的铜基复合材料。

对 CNT 进行表面改性,能改善 CNT 对橡胶的增强效果,制得表面改性的天然橡胶复合材料。

4. 其他纳米材料的制备

在新型纳米材料的制备中,为了实现物质原子或分子的主动诱导、迁移运动控制和重构,有许多方法。但各种不同的原理和方法,不外乎都是在一定条件下借助于机械的、物理的、化学的外力,驱动物质的分子或原子等精准迁移、重构、组装晶格,从而形成具有不同用途的新型纳米材料。

1.2.3 微纳生物传感器

1. 生物传感器的简介

生物传感器技术是一个非常活跃的交叉研究领域,它处在生命科学、化学、物理学、工程加工技术及信息科学的交叉区域。生物传感器技术的研究重点是:广泛地将各种生物活性材料与传感器结合,研究和开发具有识别功能的换能器;基于这些材料和器件设计新的分析方法、制造新型分析仪器,并研究和开发它们在生物传感领域的应用;从用一种或多种酶作为分子识别元件的传感器,逐渐发展出基于其他多种生物分子识别元件的传感器。例如抗原-抗体、激素-受体、蛋白质-配体、DNA 双螺旋拆分的分子等,把它们中的一方固定后,这固定的一方都可能作为分子识别元件来选择性地检测另一方,这一类生物传感器一般称为亲和型生物传感器。亲和型生物传感器利用生物分子识别技术(基于亲和力的识别技术),将生物反应的信息通过与之相连的信号换能器转换成可记录的信息,可对生物反应进行定量分析或半定量的分析,如图 1-10 所示。

亲和型生物传感器不仅可以用于分子探测,而且还是疾病诊断、基因筛检和药物研发的重要工具。通过分析,亲和型生物传感器记录的实时信号,可以

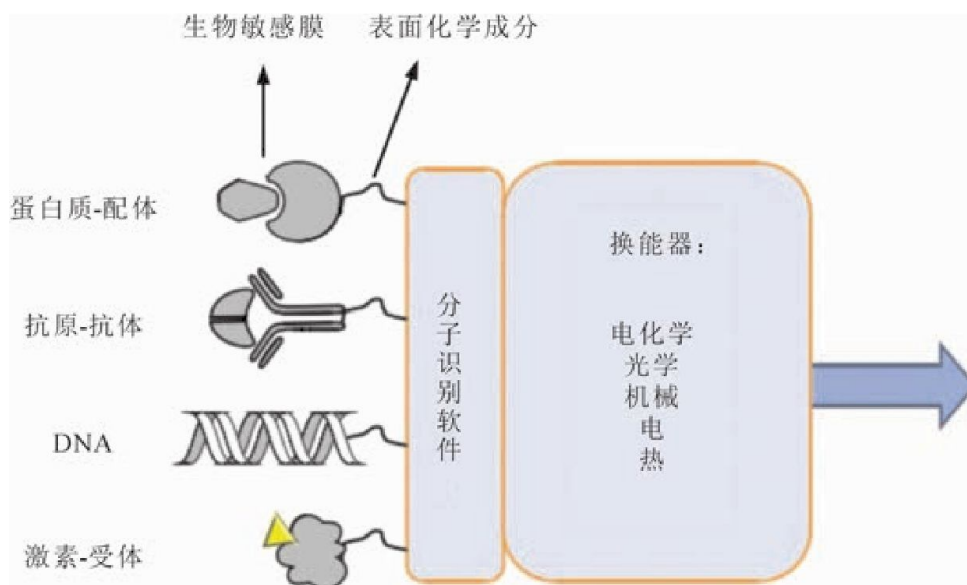


图 1-10 亲和型生物传感器传感原理示意图

监测生物分子结合和分解的动态过程,确定生物分子相互作用的结合平衡常数,以及结合、解离速率常数等,从而提供被分析物与目标检测物的结合强度等信息。这些信息对临床诊断和药物开发具有重大的意义,例如由此筛选出效果显著、可供进一步研发的高选择性治疗药剂。

2. 生物传感器向微观尺度的发展

传统生物传感器的尺寸通常处在宏观尺度或者毫米尺度。得益于微纳技术和生物电子技术的发展,常规尺度的传感器已逐步过渡到微纳米尺度,同时提高了对生物特异性反应的检测精度。微纳米尺度敏感元件具有更高的表面-体积比,因而其物理性质更易受到外部的影响;但同时,随着尺度继续向原子极限缩小而具有更高的结构密度和更高的捕获效率,其灵敏度也得以大幅提升。纳米线、碳纳米管、纳米粒子和纳米棒等已逐步发展为未来亲和型生物传感器的关键敏感膜。目前微纳生物传感器的研究呈现以下三个趋势特点。

(1)集成微流控的高密度的微纳传感阵列芯片。

诸多研究成果证实了把成千上万的微悬臂梁、微流道集成到一个毫米级单芯片上的可行性,如利用晶圆级转移技术将微机电系统(MEMS)器件成功地从一片晶圆可靠地转移到另一片晶圆,并以此实现了每平方毫米 100 个悬臂梁及