

微米纳米技术及微型机电系统

周兆英 叶雄英 崔天宏 张联

(清华大学精密仪器与机械学系 北京 100048)

摘要 微型机电系统和微型制造技术是一个新兴的技术领域。本文论述微米纳米制造技术的发展过程, 微细加工的进展, 微型机电系统的概念、主要研究课题, 以及它的应用领域。

关键词 微型机电系统 微米纳米制造技术

1 引言

微米/纳米技术是一个新兴的、多学科交叉的高科技领域, 它研究和控制物质结构的功能尺寸或分辨能力, 达到微米至纳米尺度, 它汇集电子、机械、材料、制造、测量, 以及物理、化学和生物中新生长出的(包括交叉的、不同层次的)微小和微观领域的科学技术群体。几十年前人们就实现了微米级精度的加工, 而制造微米尺度的器件、装置或机器就不容易了。虽然微米量级的器件仍遵循宏观世界的规律, 但又在不同程度上显示出微小事件的特征。在技术上, 从微米量级发展到纳米量级是一次飞跃; 从机理上, 纳米尺度的现象和器件的特性与宏观世界的规律有很大的差异。科学家的目标是要实现原子分子层次上的制造技术, 形成新的物质结构和机器。如1989年由IBM实验室开始用STM搬移氦原子、铁原子和某些分子, 而组成字符或图案, 引起了世界科技界的重视和幻想; 1986年IBM还研制出超微型碳分子算盘, 算盘珠是由60碳原子组成的巴基球, 由扫描隧道显微镜操纵。近期可望取得重大突破的技术为: 微型机械电子系统、微米/纳米制造技术、扫描探针显微技术、微电子及纳米电子技术、纳米材料技术和纳米生物工程等等。纳米科学技术和生物工程被认为是未来科技的两大重要前沿。

2 微米/纳米技术

科学技术向微小领域发展,由毫米级、微米级继而涉足纳米级,人们把这个领域的技术称为微米/纳米技术。微米(Micrometer, 简称为 μm)和纳米(Nanometer, nm)的尺度分别为 10^{-6}m 和 10^{-9}m 。虽然还有更小的尺寸单位,但现代科学技术研究的尺度大都在埃以上(Angstrom, $1\text{\AA} = 0.1\text{nm}$)。光的波长为 100nm 量级,超大规模集成电路线宽可达亚微米级,大容量光存储的信息记录尺寸线宽为 $0.6\mu\text{m}$ 、深 $0.1\mu\text{m}$,生物大分子中蛋白质核酸的尺度为几十到几个纳米,而固体物质结构的极限尺寸——原子间距为 $0.1\sim 0.3\text{nm}$ 。微米/纳米技术尺度如图1所示。微电子技术仍是现代科学技术中的关键技术,由于微细加工水平的提高,微电子集成规模由大规模集成(LSI)、超大规模集成(VLSI)、特大规模集成(ULSI),现进入京规模集成(GSI),线宽达 $0.16\mu\text{m}$,工业化生产为 $0.35\mu\text{m}$ 。据美国微电子规划:线宽由 $0.35\mu\text{m}$ (1995年),发展为 $0.2\mu\text{m}$ (1998年)、 $0.18\mu\text{m}$ (2001年)、 $0.12\mu\text{m}$ (2004年)、 $0.10\mu\text{m}$ (2007年)和 $0.07\mu\text{m}$ (2010年);微电子技术的另一重大贡献是在它基础上发展了微型机电系统,在本文中另有专节介绍。

发展到原子尺度的科学技术(Science and technology at atomic scale)就是纳米科学技术,它包括纳米电子、纳米材料、纳米生物、纳米机械、纳米制造、纳米测量等等的学科群。以扫描探针显微镜(SPM),包括扫描隧道显微镜(STM)和原子力显微镜(AFM)等等技术为代表的纳米级观测和加工方法,可以分辨出单个原子、可在真空、大气或水溶液中直接观测表面结构的缺陷,还可操纵单个原子或分子进行纳米级的加工。纳米电子学立足于最新的物理理论手段,按新的概念构造电子系统,超越传统极限,实现信号采集、处理和存储能力突破。纳米材料指其特征维度尺寸小于 100nm 的零维、一维、二维和三维的介于原子、分子与块材之间的固体材料。在此尺度下,小尺寸和界面效应、量子效应和宏观量子隧道效应的影响,使它的物理、化学和力学特性与大尺寸材料有明显的差异。

从工程技术观点,微米/纳米技术是一个发展过程,微米技术与纳米技术是有所区别又有联系的宽广技术领域,是指微米级(按照习惯的划分, $0.1\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$)到纳米级($0.1\text{nm}\sim 100\text{nm}$)的材料、设计、制造、测量、控制和应用的新技术。从微米/纳米技术研究的技术途径亦

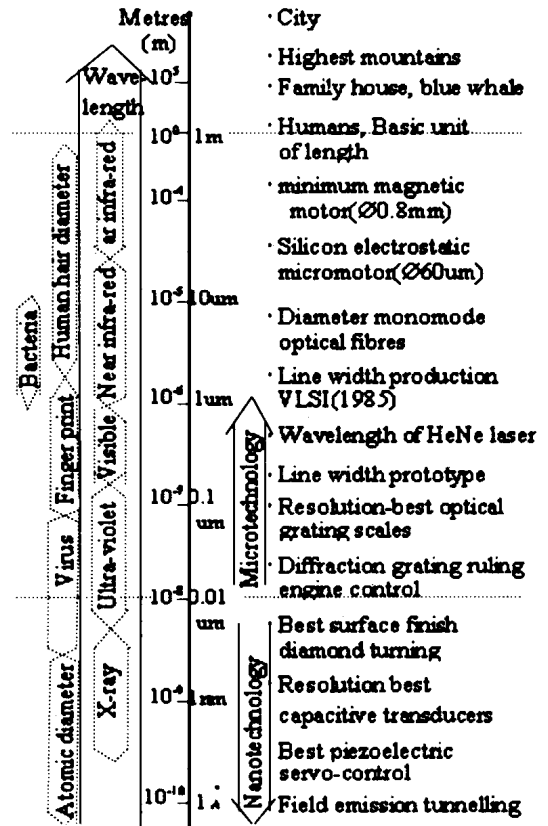


Fig. 1 The scale of things: where microtechnology and nanotechnology hit

可分为两类:一种是分子、原子组装技术的办法,即把具有特定理化性质的功能分子、原子,借助分子、原子内的作用力,精细地组成纳米尺度的分子线、膜和其它结构,再由纳米结构与功能单元进而集成为微系统,这称为由小到大(Bottom-up)的途径;另一种是用光刻刻蚀等微细加工方法,将大的材料割小,形成结构或器件,并与电路集成,实现系统微型化,亦称为由大到小(Top-down)和途径。微米/纳米技术使人类在改造自然方面进入一个新的层次,开发物质潜在的信息和结构潜力,使单位体积物质储存、信息处理和运动控制的能力实现又一次飞跃。将在信息、材料、生物医疗、航空航天和工业等方面导致人类认识和改造世界的能力的重大突破。

3 纳米制造技术

从制造能力看,现在已进入纳米制造时代。纳米制造技术涉及超精密加工技术、精密测量传感和控制技术,其中纳米级加工技术是其核心,可分为加工精度和加工尺度两个方面。加工精度由本世纪初的最高精度 $10\mu\text{m}$,发展到现在的 20nm 、表面粗糙度 $2\sim 5\text{nm}$,而用金刚石车床加工的超精密衍射光栅的精度已达到 1nm 。目前,加工中心的定位精度约为 $2\mu\text{m}$,坐标磨床的定位精度约为 $1\mu\text{m}$;对于 IC 图形制作设备,它的校准和曝光机定位精度约为 50nm 。实验室可制作 10nm 以下的线、柱和沟槽。

纳米加工的精度或尺度是近原子尺寸量级的,其加工技术包括:(1)超精密机械加工,如:超精密切削、磨削、研磨、抛光等以及研磨、抛光等。超精密加工机床已商品化生产,其主轴的精度为 10nm ,导轨和定位精度为 $0.013\mu\text{m}/1000\text{mm}$,数控分辨率 25nm ,切削加工粗糙度为 2nm ,切削圆度为 25nm ,磨削圆度为 10nm ,平面度为 $0.5\mu\text{m}$,非球面精度为 $0.1\mu\text{m}$,非球面粗糙度为 5nm ;(2)光刻加工,它是化学腐蚀加工的典型代表,其中用光刻加工的 VLSI 的最小线宽可达 100nm ,实验室加工已达 10nm 。(3)能量束加工,包括电子束加工、离子和等离子体蚀刻、分子束外延、物理和化学气相淀积,以及激光加工、电解射流加工、电火花加工、电化学加工等等。(4)扫描探针显微镜加工,可以进行原子级操作、装配和改形等加工处理。

微米/纳米制造技术要求纳米级的测量,有传统的探针及一些光学方法,包括外差干涉测量技术、超短波长干涉测量技术、基于 F-P(Fabry-Perot)标准的测量技术;还有一些新的方法,如扫描电子显微镜(SEM)和扫描探针显微镜(SPM)等等。外差干涉测量技术具有高的位相分辨率和空间分辨率,可以达到 0.1nm ;X 射线干涉测量技术是微米/纳米测量中的一项新技术,位移测量的分辨率可能实现 0.01nm ;F-P 标准具的测量分辨率可达到 10nm ;SEM 可使几十个原子大小的物体成像,而 STM 和 AFM 可以直接观测原子尺度结构,垂直分辨率在到 0.1nm 。

加工与测量离不开控制技术,而高精度的定位技术又是实现纳米级控制的关键。在 STM 测量与加工中,需要纳米级的三维定位与控制,目前普遍采用的是管状压电陶瓷器件。利用电致变形材料、静电或磁悬浮轴承式结构,以及静电致动的高精度控制技术正向纳米级精度进展。

新的加工原理和新的加工极限研究受到重视。纳米加工机理、测量原理、定位控制方法涉及到原子尺度的科学理论基础,纳米机械学等新学科正在形成。

4 微型机电系统

半导体集成电路微细加工技术的成熟和超精密机械加工技术的发展, 从一个方面使人们认识到微米/ 纳米技术应用的巨大前景。其发展并非单纯微小化, 而是指可以开发批量制作的、集微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理的控制电路、直至接口、通讯和电源等于一体的微型器件或系统。通常称之为微型机械(Micromachine, 日本惯用词), 其特征尺寸范围为 $1\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ 。考虑到现在的技术水准, 尺寸在 $1 \sim 10\text{mm}$ 的小型机械, 以及将来有可能借助于生物工程和分子组装实现的 $1\text{nm} \sim 1\mu\text{m}$ 的纳米机械或分子机械, 也属于微型机械的范畴。它也可称为微型机电系统(Micro Electro Mechanical Systems, 略记为MEMS, 美国惯用词), 或微型系统可分成几个独立的功能单元如图2所示。其输入是物理信号, 通过传感器转换为电信号, 经过信号处理(模拟的和/或数字的)后, 由执行器与外界作用。每一个微型系统可以采用数字或模拟信号(电、光、磁等等物理量)与其它微型系统进行通讯。微型机电系统的特点是: 体积小、重量轻、耗能低、性能稳定; 有利于大批量生产, 降低生产成本; 惯性小、谐振频率高、响应时间短; 集约高技术成果, 附加价值高等, 使其拥有广泛的应用领域和前景。微型机电系统的目标在于通过微型化、集成化来探索新原理、新功能的元件和系统, 开辟一个新技术领域, 形成批量化产业。它涉及电子、机械、材料、信息与自动控制等多种学科并集约了当今科学技术的许多尖端成果, 可以完成大尺寸机电系统所不能完成的任务。例如: 尖端直径为 $5\mu\text{m}$ 的微型镊子可以夹起一个红血球, 尺寸为 $7 \times 2 \times 2\text{mm}$ 的微型泵流量可达 $250\mu\text{l}/\text{min}$, 已做出能开动的 3mm 大小的汽车、在磁场中飞行的机器蝴蝶、以及集微型加速度计、微型陀螺和信号处理系统为一体的微型惯性测量组合(MIMU)。美国加州理工学院在飞机翼面粘上相当数量的 1mm 左右的微梁, 控制其弯曲角度以影响飞机的空气动力学特性。利用硅微加工在一片硅片上可一次制造成百上千个微型机电装置, 或制造出数个完整的微型机电系统。图4为美国某公司大批量生产的硅微加速度计, 它把微型传感器(机械部分)和集成电路(电信号源、放大器、信号处理和自校正电路等等)一起集成在硅片上 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的范围内, 图5为清华大学精密仪器系在2英寸硅片上制作的16个微型泵。

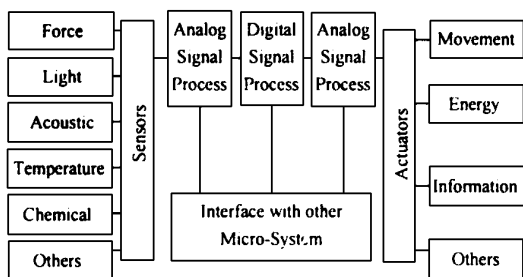


Fig. 2 Model of MEMS

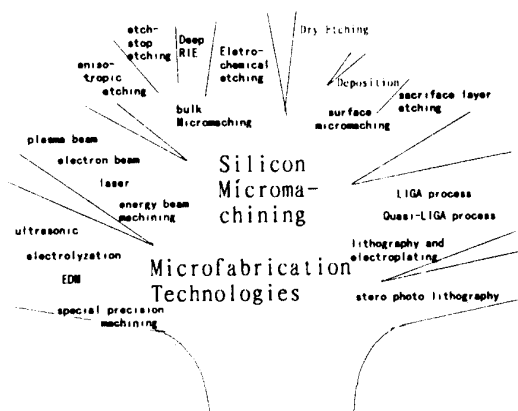


Fig. 3 Micro fabrication technologies

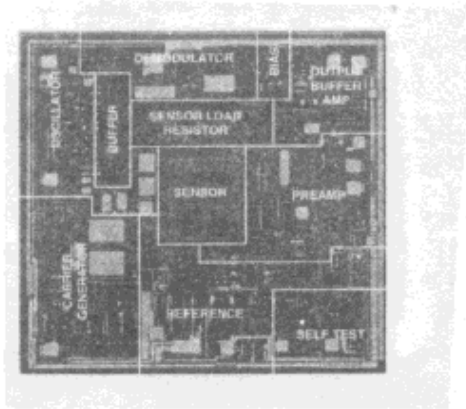


Fig. 4 Silicon micro-accelerometer of AD Inc.

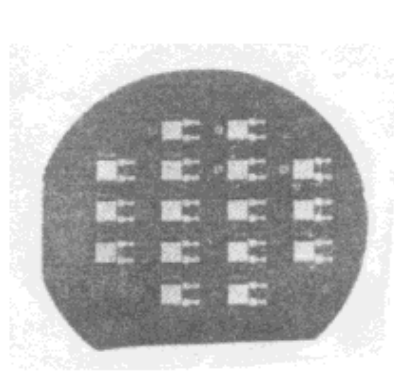


Fig. 5 16 micro-pump on a 2-inch silicon wafer

MEMS 作为一新的研究领域面临许多研究课题, 包括:

1. 理论基础: 微小型化的尺寸效应和理论基础, 如: 力的尺寸效应、微结构表面效应、微观摩擦机理、热传导、误差效应、微流体特性和微构件材料性能, 微型机械的细观力学基础等等。微型系统的基本设计理论有待研究。

2. 技术基础: 涉及基本技术如: 设计技术、微机械材料、微细加工(高深度比多层微结构加工)、微装配和封接、表征和测量、微能源、微系统控制和集成等等关键技术。

1) 微型系统设计技术: 微结构设计数据库、有限元和边界元分析、CAD/CAM、仿真和拟实技术、微系统建模等。

2) 微细加工技术: 包括硅表面加工和体加工的硅微细加工、利用 X 射线光刻、电铸的 LIGA(德文 Lithograph Galvanformung und Abformung 简写) 和利用紫外光刻的准 LIGA 加工、能束加工(包括电火花加工的特种精密加工, 立体光刻成形加工) 和微系统的集成技术。图 3 为微细加工技术树状表示。

微系统的组装技术: 使用粘接材料的粘接、硅玻璃静电封接、硅硅键合技术和自对准组装技术等。

3) 微型机械材料: 用于驱动和敏感元件的功能材料, 适合微细加工的新材料技术。材料与加工技术有密切关系。

4) 微系统的测量和控制技术: 材料特性、微小物理量、微型元件和系统的测试。微系统和多微系统的控制。

3. 应用研究:

1) 微型构件、微型传感器和微执行器是微型系统的基础单元。三维的微型构件有: 微膜、微梁、微探针、微齿轮、微凸轮、微弹簧、微沟道、微喷嘴、微锥体、微轴承、微连杆等等。它们不仅是微型系统的重要组成部分, 还可能有单独的用途; 微型传感器有: 压力、力、力矩、加速度、速度、位置、流量、磁场、温度、气体成分、湿度、pH 值离子浓度和生物浓度等等。集成化和智能化的

微型传感器,已有不少产品;微型执行器有:阀、泵、开关、扬声器、谐振器和微电机等等。微执行器是复杂微系统的关键,难度大。

2) 医疗及外科手术设备:人造器官、用于生物医疗研究的微探针阵列、诊断治疗导管、进入体内的微量施药和取样微型泵以及能进入体内或血管的微型手术机器人等。

3) 仪器、设备和系统:微型集成仪器(微气相色谱仪、微型分析系统等)、微光学系统、微型惯性导航系统、微型车船、微型飞机、微型卫星等在国防及民用都有应用前景:微量流体控制系统可用于IC、制药工艺的微量元素供给、控制和分析,计算机内芯片的冷却系统。新型汽车发动机的电子燃料喷嘴、高分辨率的微型喷墨元器件等。

国内近十年的微型机电系统研究,取得一定成效,亦有不足。从国家经济和国防的发展需要,需要有国家级的战略性研究计划,应当加强:

- 微型系统的机理研究;
- 微型机电系统的设计制造基础和相关的纳米级测量与控制技术的研究;
- 有实用价值的典型微型机电系统研究开发,重视实用化微型传感器和微型执行器,特别是集成微型传感系统的研究开发;
- 在微型机电系统的技术前沿——微小型移动载体的研究,关注微型机器人、微型车船和微型卫星的进展。

5 结 语

微米/纳米技术关系到国家科技发展、经济和国防建设的未来,是国家和国防的关键技术,应制定相应的高技术发展规划。微米/纳米技术的特点是:多学科交叉、多种加工技术的应用、新原理和新设计的探索、科研和产业化的衔接、军民两用等等,是一个非常重要又非常活跃的技术领域,它将会带动许多相关学科的发展;从目前的技术基础分析,由大到小的途径可能是我们主要采用的途径。我国的微米/纳米技术首先应把微型机电系统作为发展的重点,其优先发展领域为生物医学、环境监控、航空航天、工业与国防等领域;在微米/纳米技术中,技术基础是关键,要重点开展材料、微米/纳米加工、测量与控制技术的研究,建设好几个具有世界先进水平的纳米加工、纳米测量与控制的开发研究基地,同时亦应重视纳米尺度上的新物理现象、新效应的基础研究,加速我国微米/纳米技术的研究与开发,迎接21世纪技术与产业革命的挑战。

参 考 文 献

- 1 Proc of the 8th Int Conf on Solid-State Sensors and Actuators/ Eurosensors . Swenden, June 1995
- 2 Proc of IEEE Micro Electro Mechanical Systems. the Netherlands, January 1995
- 3 周兆英,白春礼,尤政,李德孚. 微米/纳米技术,机械工程学科前沿. 北京:机械工业出版社,1995
- 4 周兆英. 第八届国际固态传感器和执行器会议暨第九届欧洲传感器会议. 中国仪器仪表, 1995(10): 8~12
- 5 周兆英,叶雄英,胡敏,尤政. 微型机电系统进展. 仪器仪表学报, 1996, 17(1): 20~25
- 6 孙曦庆. 清华大学博士论文. 1993

7 杨 岳. 清华大学博士论文. 1996

8 江小宁. 清华大学博士论文. 1996

Microtechnology/Nanotechnology and MEMS

ZHOU Zhaog-Ying, YE Xiong-Ying, CUI Tian-Hong, ZHANG Lian

(Dept. of Precision Instruments and Mechanology of Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

MEMS and micro-machine technology is a developing field. This paper deals with the process of microtechnology/nanotechnology, micro-machining, the concept and main topic of MEMS and other fields.

Key words: MEMS, Micrometer and nanometer machining technology

周兆英 男,教授,博士导师,清华大学机械工程学院副院长,微米/纳米技术研究中心主任。长期从事精密仪器领域的教学与科研工作。在精密测试、动力学系统建模和自适应控制等方面有较大成绩,主持参加科研任务十余项,获国家发明二等奖和国家级优秀教学成果奖各一项,国家教委、北京市科技进步奖和省科技大会奖等6项,发表论文约200篇,有译著和专著4册,发明专利5项。目前正在进行精密测控技术、微型机电系统和生物医疗仪器的研究工作,是精密机械仪器学科学术带头人。