

微电子技术的又一次革命 ——微电子机械系统(MEMS)发展展望

Prospects for the Development of the Micro Electro Mechanical System

李志坚

(清华大学教授、中国科学院院士 北京 100084)

一、引言

MEMS 一词由 Micro Electro Mechanical System 的 4 个字首组成,可译为微电子机械系统。MEMS 的起源可以追溯到 60 年代,1989 年后 MEMS 一词就渐渐成为一个世界性的学术用语, MEMS 技术的研究开发也日益成为国际上的一个热点。与 MEMS 一词同时流行的还有 Micro Machine(微机械)和 Micro System(微系统)。它们都以微小(Micro)为特征,有的强调机械,有的强调系统,但当前人们常不加区别地与 MEMS 通用。

一般地说, MEMS 具有以下非约束性的特征:

(1)尺寸在毫米到微米范围之内,区别于一般宏(Macro),即传统的、大于 1cm 尺度的“机械”,但并非进入物理上的微观层次;

(2)基于(但不限于)硅微加工(Micromachining)技术制造;

(3)与微电子芯片类同,可大批量、低成本生产,性能价格比比传统“机械”制造技术大幅提高;

(4)MEMS 中的“机械”不限于狭义的机械力学中的机械,它代表一切具有能量转化、传输等功能的效应,包括力、热、声、光、磁,乃至化学、生物能等;

(5)MEMS 的目标是微“机械”与 IC 集成的微系统——有智能的微系统。

用以上特征衡量,用微电子技术(但不限于此)制造的微小机构、器件、部件和系统等都属于 MEMS 范围,微机械和微系统只是 MEMS 发展的不同层次,有关的科学技术都可统称为 MEMS 技术。

当前,信息技术已走上多媒体、网络化和智能化的道路,微电子信息处理已向系统级芯片集成发展。无论从微型化或性能价格比发展看,信息获取(传感)技术和信息执行技术,即所谓“外部设备”技术都已成为发展的瓶颈;它们与“主机”的接口(HI)也成为阻碍处理速度的关键。MEMS 技术的目标是

把信息获取、处理和执行一体化地集成在一起,使之成为真正的系统,因此该技术对信息技术的革命意义是不言而喻的。对传统的“机械学”来说, MEMS 技术不仅打开了“微尺寸”新领域的大门,也是真正实现机电一体化的开始。MEMS 被认为是微电子技术的又一次革命,对 21 世纪的科学技术、生产方式和人类生活质量都会有深远的影响。

二、微机械加工和制造技术

MEMS 技术首先是在工艺制造技术上突破的,统称为微机械加工(Micromachining)。

微机械加工最初是从硅微(电子)加工技术发展起来的,故称之为硅基微机械加工;但后来又发展出一系列独立于硅微(电子)加工技术的各种新工艺,后者称之为非硅基微机械加工技术。

硅是具有极好机械性能(包括强度、硬度、热导和热膨胀等)的材料;此外硅对许多效应敏感,因此也是传感器的首选材料之一。加之硅基微加工与微电子微加工技术易于兼容集成为系统,所以,硅基微机械应成为 MEMS 加工技术的主流。

当前硅基微加工技术可分为表面微加工技术(Surface Micromachining)与体微加工技术(Bulk Micromachining)两个主流。

实际上,经过适当安排工序,硅表面微加工技术与硅体微加工技术是可以兼容的。用此方法已研制出表面积为 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的硅微麦克风。

硅基微机械加工技术的特点是与 IC 兼容,易于集成化,因此对工序的设计总是先从系统开始来安排,采取自上而下(Up Down)的方法,这是 MEMS 与传统机械加工不同的一个特点。

由于硅表面微加工的运动机构能做到的深(厚度)与宽度(横向尺寸)之比很小,故被称为准二维加工;硅体加工技术能设计的机件纵向尺寸最多也只能做到 $300 \sim 400\mu\text{m}$,也很小,所以叫做 2.5 维加工。从传统机械观点看,人们难于接受此类零件来

组合成系统(基于自下而上,即 Bottom Up 设计方法),因为这种零件没有足够驱动力去推动下一级。为提高驱动力矩,要求机械零件有一定的深宽比,因而所谓三维微加工受人注视,进而发展出了许多新的微机械加工技术。但如前述,作为 MEMS 技术,可低价、大批量生产仍是一个必要条件。

在非硅基微机械加工技术中,LIGA(Lithographie Galvano Formung and Abformung)技术是其中最重要的技术之一。LIGA 是 80 年代初由卡尔斯鲁尔核研究中心发明的。据报导用此技术已制造出包括具有较大力矩的微马达、加速度计等。

此外日本东京大学研制成功的微线放电机床已经生产,可加工微米尺寸的孔和进行其它精密制造;EB 加工、激光加工等加工材料不限于硅,所以也属于非硅基微加工技术之列。

非硅基微加工的主要问题是与硅 IC 集成的困难,及由 Bottom Up 传统设计思想带来的微装配的困难。我们认为,既然 MEMS 的最后目标是系统集成化,则不同技术最后要以此为目标做到相互扬长避短,并达到兼容;从这一点出发可能硅基微加工技术发展是更为重要的。

最后,在制造技术中,MEMS 的封装和装配技术也是特别引人注目的。正如上面所述,如果从上而下设计,装配技术较易于解决;对于硅基,现在常用硅-硅直接键合、硅-硼玻璃静电键合和胶粘等技术;对于非硅基的由下而上设计工序,微小零件的装配就会遇到许多麻烦,所以今天用这种技术研制出的系统,其尺寸一般比较大,MEMS 的封装技术显然要比 IC 封装复杂和困难。

三、MEMS 器件、系统及应用

MEMS 研制已取得很多成果。多种尺寸为毫米到微米量级的微机械零部件,如微梁、微探针、微齿轮、微凸轮、微弹簧、微沟道、微喷嘴、微锥体、微轴承、微阀门和微连杆等等都已研制出来,因而,有可能装配出种种微机械。MEMS 器件包括微传感器,如压力传感器、生物传感器、化学传感器(PH 值,气体等),温度、磁场、光强等传感器和流量计、加速度计等很多已实用化。这些器件有的与 IC 集成在一起形成组件,称为灵巧传感器(Smart Sensor)。微执行器是另一类 MEMS 器件,已见诸报导的有:微泵、微马达、微麦克风等等。此外用微阀、微管道和微泵已组成微化学分析系统和 DNA 反应室。还有微小型机动车,乃至磁场中可以飞行的小蝴蝶等系统在实验室中也已研制成功。但是真正已形成产业或即将投入大量生产的可能要数微加速度计、微陀螺和微数字转镜器件阵列(DMD)。它们都是由硅基微加工技术制造,且与 IC 集成在一起,所以被认为是真正的

MEMS 系统。用于汽车防撞的硅加速度计,例如 AD 公司的 ADXL50,在 2 年前已商品化;TI 公司的 DMD 不久也要推向市场。DMD 是一种大屏幕彩色 TV 投影显示的优质器件,2048×1152 高分辨率 DMD 正在研制中。用类似加速度计原理或用几个加速度计组合,即可制成微陀螺,接着便能组成微惯性测量系统(MIMU),这是当前航天和军事部门十分重视的 MEMS 器件。

MEMS 的应用领域十分宽广,其影响十分深远。下面对几个主要领域举些例子。

1. 信息

我们在引言中已经提到过 MEMS 对今天信息技术发展的革命性意义。现在再介绍一些它们在现行技术中的应用。大屏幕显示对虚拟现实、电视会议的意义是不言而喻的。从多媒体人机介面(HI)看,微麦克风在语音输入方面、微摄像系统在图形输入方面都有宽广市场,如今正在大力研制的微型智能机器人更是控制系统的最高目标之一。除此之外,已提出将微陀螺用在鼠标上以稳定其运行,把微机械及其控制电路集成的微器件装于磁头上可使其在磁道上运行精度大大提高($<0.1\mu\text{m}$),从而使磁盘的磁道密度从今天的 5 000 道/英寸,提高到 25 000 道/英寸,这些也都是十分诱人的。至于像微喷头用于油墨打印等则早已有所报导。

2. 航天、航空

MEMS 在航天、航空领域也极具应用前景。由于卫星本体及其发射的高成本,航天科技工作者早已提出小卫星、微小卫星、微卫星和纳米卫星的概念和设想。所以作为导航的主要部件,发展 MEMS 的意义十分明显。在去年的国际会议上已有人正式提出研制全硅卫星的概念,即整个卫星由硅太阳能电池板、硅导航模块、硅通信模块等组合而成;这样可使整个卫星的重量缩小到以公斤计算,从而使卫星的成本大幅度降低,使较密集的分布式卫星系统成为现实。真正的全球卫星定位(GPS)今后将不仅用于航空、航海,而且对于汽车、行人也将成为现实可行。GPS 若用于汽车,由于地面上存在的各种障碍物,可能会出现暂时盲区,但只要在车上装上 MIMU 就可以实现间隙性自动导航,走出盲区后再以 GPS 进行校正。

MEMS 对航空器性能的改善也值得一提,今后在飞机的诸要害部位都可装上各种 SMART 传感器,包括力学、声学、气流类传感器,可及时提供信息,实现各种执行部件的实时控制,从而使飞行更加平稳,噪声被大大抑制并节省燃料。

3. 科学仪器

MEMS 将以其灵巧、高灵敏度、智能化及多功能化大大改变科学仪器的面目,各种微小型专用仪器(ASIM)的出现就是例证。由于多种微传感器可以集

成(单片或混合)在一起,其测试精度可以大大提高;由于传感器体积小,价格便宜,可把大量传感器布置在一些部位(例如压力传感器布置在风洞各部位)从而测出某种参数的分布;在化学和生物实验中由于 MEMS 传感器所用试样小、灵敏度高(如在微化学分析中)、实时性强,通过测试可反映出更为深层的科学问题。MEMS 仪器除综合性外,还具有可平行处理的能力,这样便使测试反映出更为本质的科学过程。实际上除了传感以外,今后的 MEMS 仪器还可以包含微执行器件,也就是在观察现象的同时,可对对象进行一些微操作。例如利用尖头尺寸只有几微米的镊子,人们可以操作血球和 DNA 等大分子,这样在仪器分析的同时就可进行必要的“手术”。现在的 ATM 和 STM 若利用 MEMS 技术把探针制成阵列,加以集成的信号处理部件,即可对图像进行并行处理,这样不仅可观察到表面静态图形,而且可取得实时时变信息。

今天,内科大夫出诊只带一个血压器,其它都靠他的“望、闻、问、切”和取血样送检,这对危急病人往往造成诊治延误。行医如此,其他许多科技工作由于仪器缺乏实时性,往往也造成信息的延误和损失。所以袖珍、高速、综合仪器(对内科医生是指包括血压、血脂、血糖、血球分类以及其它生化分析实时综合仪器)的进一步发展均寄厚望于 MEMS 技术的发展。

4. 医疗

MEMS 在医疗中的应用前景最引人瞩目。除应用于上述的医疗仪器外,当首推介入治疗医学。目前已实施的各种介入治疗,如心导管、各种内窥镜等,不仅价格昂贵、器件体积大、手术时病人不易忍受,还会因缺乏足够精度而影响预后。存在的另一个根本问题是操作者“手、眼”与“脑”分离,即探测与操作器件进入体内后,而观察、决策和操作者——医生却远在体外。这种分离结果必定是大大增加误差。MEMS 技术不仅使传感器、执行(手术)器件做到很小、很灵敏,可以进行局部操作(局部注药、切除和修补等),而且其智能特点,可以使之自动执行,只需医生在体外进行必要的辅导。这样便可使介入治疗和检查的精度、可靠性大大提高。同时由于体积小, MEMS 可以进入过去不能进入的器官部位进行工作(如清除沉积于动脉血管壁上的脂肪),而病人不感到痛苦。

作为更现实的一个例子,可举出用血糖传感器与微泵结合的系统,“埋入”人的肌肉内用以注入胰

岛素。这种 MEMS 器件可随人体血糖水平状况实时自动地进行微量药物注入,从而不仅免除病人每天两、三次注射的皮肉之苦,并可免去血糖波动,大大提高疗效。

四、发展展望

MEMS 是当前世界上有极好前景的科技领域之一。80 年代后期以来,美国、欧洲、日本,以及近期的新加坡等对这一领域都加大了投入,制订了国家级的发展计划来加以推动。根据前一、二年的统计,美国现有 30 多个属于大学、国家实验室和公司的研究小组参加这项发展计划,有关政府部门把航空航天、通信和 MEMS 列为三大研究重点。日本通产省自 1991 年开始实施了为期 10 年投资 250 亿日元的“微机械技术”研究开发计划,共有高校、国家实验室和公司的 60 多个研究组参加。欧洲于 1990 年开始建立跨国的合作研究网,协调各国研究,截止 1993 年已有多达 31 个 MEMS 研究组加入。出于商业原因,近年来台湾地区的 MEMS 技术也已经起步。我国在 MEMS 技术研究方面虽已取得了一定进展,但规模和步伐太小,远远跟不上发展的形势。

当前 MEMS 正处于技术突破和高速发展前夕,21 世纪肯定会展现一个大发展的局面,它的广泛应用和效益将强有力地显示出来,它对信息、航空、航天、自动控制、医学、生物学、力学、热学、光学、近代物理和工程学等诸领域发展的影响将是深远的,人类的生产和生活方式也会因此而发生某种改变。

1995 年的 MEMS 世界市场达到 15 亿美元,约占半导体总市场的 1%,有人估计到 2000 年将达到 100 亿美元。显然,由于前面多次讨论过的原因,这只是开始,人们都对 21 世纪的 MEMS 市场寄予厚望。MEMS 技术是微电子技术的完善,但其内涵和发展前景更为深广,因此人们常倾向于用微电子芯片的发展过程(包括其市场的发展)来作类比和预测,这是有道理的。但正如本文以上诸节所讨论的,这一技术较之微电子 IC 技术远为复杂,更具有个性,要求的基础更广泛,也就是说,科技实力竞争将更为剧烈,因此也会有更多的机会。

如何集中力量,动员各个方面,组织好这一领域的科技工作,使之早日进入先进国家的行列,这对我国又是一个严肃的挑战。

(责任编辑 蔡德诚)

(上接第 17 页)

一个中医学者,寄希望于通过加强中医学与现代先进学科之间的渗透和移植,站在现代认识的水平上,探讨经络的本质与理论,提出经络的信息系统

假说,将传统中医学中的“精气神”理论,溶入经络的信息系统结构模式中,把人体经络作为一种通讯控制系统,加以认识和理解,以期阐明经络的本质与原理。

(责任编辑 蔡德诚)