

微机电系统的发展及其应用*

林忠华, 胡国清, 刘文艳, 张慧杰

(厦门大学机电工程系, 厦门 361005)

摘 要: 微机电系统是在微电子技术基础上产生和发展起来的多学科交叉的前沿科学研究领域, 是面向 21 世纪的高新科技. 介绍了微机电系统产生的背景影响、组成特征和基础研究内容, 综述了微机电系统技术基础所涉及的材料、微机械设计和模、微细加工技术以及微封装与测试等领域, 并对微机电系统的应用、典型的微器件、国内外的发展现状及前景进行全面分析. 在此基础上, 论述了 MEMS 技术目前存在的问题和未来发展的趋势.

关键词: 微机电系统; 基础研究; 微加工技术; 微型传感器; 现状及展望

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A 文章编号: 1672- 6030(2004)02- 0117- 07

Development and Application of Micro-Electro-Mechanical System

L IN Zhong-hua, HU Guo-qing, LIU Wen-yan, ZHANG Hui-jie

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Micro-Electro-Mechanical System(MEMS) develops on the basis of microelectronics. It is a scientific researches frontier of multi-disciplines and a high technology in the 21st century. This paper presents the background, characteristics and basic research. The principal techniques of MEMS such as material, design and simulation, micromachining, packaging and testing are reviewed, Typic microapparatus, application prospect and the state-of-art of MEMS are also discussed in this paper. Furthermore, some points of view of developing on MEMS in the future are put forward.

Key words: micro-electro-mechanical system; basic research; micromachining; microsensor; state-of art and prospect

1 MEMS 的产生背景和特点

由于硅材料微制造技术的迅速发展, 早在 20 世纪 70 年代末期斯坦福大学就开发出硅微加工的气相色谱仪^[1], 随后人们又提出了制造微传感器、微处理器的构想. 20 世纪 80 年代初, Middelhoek^[2]著文预示微系统的出现和发展前景, 对微系统的研究起着重要的推动作用. 美国在 1987 年举行的 IEEE Micro-robots and Tele-operators 研讨会的主题报告标题为 small machines, large opportunities, 首次提出了微机电系统(micro electro-mechanical system, MEMS)一词, 标志微机电系统研究的开始^[3]. 美国在该领域标志性的研

究成就就是加州大学伯克利分校用硅片刻蚀工艺开发出静电直线微电机和旋转微电机, 引起世界极大轰动, 对微机电系统研究产生很大的鼓舞. 由此可见, 美国有关微系统的研究是由微电子技术发展而来. 在欧洲, 1989 年在荷兰特文蒂(Twente)以 Micro Mechanics 的名称首次召开有关微系统的研讨会. 1990 年, 在柏林召开的研讨会改称为 MST (micro system-technology). 此后, 多沿用此名称. 欧洲在该领域的重要贡献是开发出扫描隧道 951. 关于微机电系统研究——显微镜和原子力显微镜以及 LIGA 工艺. 与其他国家相比, 日本关于微系统的研究, 在材料、制造技术和工业应用等方面都强调机械背景, 对该领域的研究采用 Micro-Machine 一词, 并于 1988 年正式建立微机械研

* 收稿日期: 2004- 03- 03.

作者简介: 林忠华(1975 —), 男, 主要研究方向为微机电系统技术、自动控制、机电一体化.

究组织^[4].

MEMS 系统主要包括微型传感器、执行器和相应的处理电路三部分. 作为输入信号的自然界的各种信息, 首先通过传感器转换成电信号, 经过信号处理后(包括模拟/数字信号间的变换)再通过微执行器对外部世界发生作用. 传感器可以实现能量的转化, 从而将加速度及热等信号转换为系统可以处理的电信号. 执行器则是根据信号处理, 控制电路发出的指令自动完成人们所需要的各种功能. 信号处理部分可以根据控制电路进行信号转换、放大和计算等处理. 这一系统还能够以光、电、磁等形式与外界进行通信, 并输出信号以供显示, 或与其他系统协同工作, 构成一个更完整的系统. 图 1 给出了一个典型的 MEMS 系统与外部世界的相互作用示意^[5].

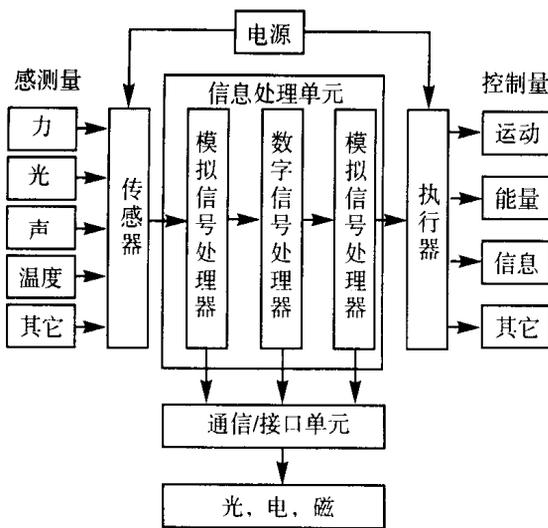


图 1 MEMS 系统与外部世界的相互作用示意

MEMS 具有如下特点^[6~8].

(1) 微型化

MEMS 器件体积小, 重量轻, 耗能低, 惯性小, 谐振频率高, 响应时间短. 在 $6.45 \text{ cm}^2 (1 \text{ in}^2)$ 大小的硅片上可以实现 32×32 的光交叉连接(OXC), 这样就可以节省空间, 使系统结构小型化和微型化, 使系统更加紧凑. MEMS 与一般的机械系统相比, 不仅体积缩小, 而且在力学原理和运动学原理, 材料特性、加工、测量和控制等方面都将发生变化. 在 MEMS 中, 所有的几何变形是如此之小(分子级), 以至于结构内应力与应变之间的线性关系(虎克定律)已不存在. MEMS 器件中摩擦表面的摩擦力主要是由于表面之间的分子相互作用力引起的, 而不是由于载荷压力引起^[9], 即牛顿摩擦定律 $f = \mu \cdot N$ 已不适用于 MEMS 系统.

MEMS 器件以硅为主要材料, 硅的强度、硬度和杨氏模量与铁相当, 密度类似铝, 热传导率接近铜和钨, 因此 MEMS 器件机械电气性能优良.

(2) 批量生产

MEMS 采用类似集成电路(IC)的生产工艺和加工过程, 用硅微加工工艺在一硅片上可同时制造成百上千个微型机电装置或完整的 MEMS, 使 MEMS 有极高的自动化程度, 批量生产可大大降低生产成本; 而且地球表层硅的含量为 2%, 几乎取之不尽, 因此 MEMS 产品在经济性方面更具竞争力.

(3) 集成化

MEMS 可以把不同功能、不同敏感方向或致动方向的多个传感器或执行器集成于一体, 或形成微传感器阵列和微执行器阵列, 甚至把多种功能的器件集成在一起, 形成复杂的微系统. 微传感器、微执行器和微电子器件的集成可制造出高可靠性和稳定性的微型机电系统.

(4) 方便扩展

由于 MEMS 技术采用模块设计, 因此设备运营商在增加系统容量时只需要直接增加器件/系统数量, 而不需要预先计算所需要的器件/系统数, 这对于运营商是非常方便的.

(5) 多学科交叉

MEMS 涉及电子、机械、材料、制造、信息与自动控制、物理、化学和生物等多种学科, 并集中了当今科学技术发展的许多尖端成果. 通过微型化、集成化可以探索新的原理、新功能的元件和系统, 将开辟一个新技术领域.

2 MEMS 基础研究内容

2.1 理论基础研究

理论基础研究^[10, 11]是围绕着微尺度和学科渗透这些核心问题进行和展开的. 当构件或系统的尺寸缩小到一定范围内时, 许多物理现象与宏观世界相比有很大差别, 甚至发生质的变化, 显著特征表现在力性质的改变、理化反应、摩擦等方面.

在微小尺度领域, 与物体基本尺寸成高次方(三次方)的惯性力、电磁力会随着基本尺度的减小而快速下降, 与基本尺寸成低次方的粘着力、弹性力、表面张力、静电力等减小的速度会慢得多, 比高次方的力相对增大, 在许多情况下体积力可以忽略, 表面力成为对系统性能起主导影响作用的因素. 如表面基本尺寸 L 为 1 mm 的构件, 当基本尺寸减小到 $1 \mu\text{m}$ 时, 体积

力(L^3)变成 10^{-9} 力单位,表面力(L^2)仅为 10^{-6} 力单位,两者相差1000倍,而且基本尺寸减得越小,两者相差得越显著.系统常用静电力或表面张力为驱动力,尺度的变化还会引起构件的理化性能的改变,随着尺寸的减小,构件表面积对体积的比例快速膨胀,构件与外部接触面积增大,所以微构件的热传导速度和化学反应速度比宏观条件下快得多.构件尺度缩小,使得构件由多晶体变为单晶体,晶体内的缺陷如晶格畸变、位错等基本消失,材料的固有缺陷减小,弹性模量、屈服极限等机械性能得以明显提高,构件相对运动时,表面摩擦力、润滑膜粘滞力表现突出.因此需要进一步对微动力学、微流体力学、微热力学、微摩擦学、微光学、微结构学、微电子学和微生物学等进行研究.

2.2 技术基础研究

MEMS和其他器件一样^[5, 10, 12, 20, 24, 33],也要经过设计、模拟、加工、封装和测试等一系列生产步骤,这些步骤决定MEMS的性能和价格,也是MEMS器件的关键技术,它们的成熟程度决定了MEMS产品的商业化过程.

2.2.1 MEMS的CAD与模拟技术

过去许多复杂的产品在CAD出现之前就已经进入了市场,例如汽车,甚至早期的集成电路等.但CAD和模拟技术发展到现在已对各种新型器件进行研究,包括对MEMS产品的研发都具有十分重要的意义:可以优化MEMS结构和工艺,减少试制成本;可以缩短设计周期,增强市场竞争力;对MEMS器件的模拟有助于理解微小范围内的力、热、电、磁等能量之间的相互作用. MEMSCAD技术经过过去十多年的发展,现在已有针对MEMS技术的商业化MEMSCAD软件.这些软件分三类:第一类是由微电子技术发展而来的Tanner TOOLS VLSI软件;第二类是由机械工程发展来的软件,如ANSYS;第三类是专门为MEMS发展而研制的软件.专为MEMS开发的CAD/模拟软件包括电子、机械和热效应,有一些还包括其他物理机理.实用的MEMSCAD/模拟软件公司主要有CFD Research Corporation, Coventor(以前Microcosm Technologies), Integrated Systems Engineering等.用户可根据需要选择某一个公司的软件,但是使用MEMSCAD模拟仍然是相当复杂的工作.

2.2.2 材料MEMS的分类

MEMS材料分为结构材料和功能材料两种.

(1) 结构材料

目前研制生产MEMS的衬底材料主要是硅,但也有公司使用石英玻璃、陶瓷、聚合物等.使用的其他半导体材料还包括:SOI(硅在绝缘体上)主要用于高性能的传感器和执行器以及低功耗的便携式系统;GaAs适合用于无线和数据通信;SiC适合高温部件;InP适合高速度光纤部件和高频率无线应用.聚合物在MEMS中的使用是欧洲一些国家最近开始的,主要研发机构有德国的Microparts公司.

(2) 功能材料

功能材料有能量变换能力,可以实现敏感和致动功能,可应用在执行器中.形状记忆合金已经用在几个类型的MEMS的执行器中,如微流量泵和阀.氧化锌和PZT等压电材料对MEMS有极大的吸引力,因它有电和机械互相转换性能,即加电到压电材料上会使其变形,相反加应力会使其产生电压.磁致伸缩材料、光敏、气敏、生物敏和电流变体等也是目前MEMS所使用的重要的功能材料.

2.2.3 MEMS加工技术

(1) 体微机械加工工艺

体微机械加工是制造MEMS的重要工艺,加工就是通过对硅衬底内部进行腐蚀得到在衬底内部所要求的结构,如悬臂梁、沟、槽等.腐蚀方法可以是湿法腐蚀或者是干法腐蚀(等离子腐蚀).体微机械加工的优点是获得的结构几何尺寸较大,机械性能好,缺点是与集成电路工艺不易兼容.现在体微机械加工有两个重要的数据要注意.其一,湿法化学腐蚀单晶硅时,对于KOH腐蚀剂的典型值是:(111)(参考基准)=1,(100)=300~400,(110)=600,一个方向比另一个方向的腐蚀速率可高600倍,这个特性在压力传感器加工中特别有用.其二,使用基于等离子腐蚀工艺——深反应离子刻蚀(DRIE)腐蚀最佳硅晶面时深宽比可达到10倍.

(2) 表面微机械加工工艺

表面微机械加工现在仍然是制造MEMS的重要工艺之一.表面微机械加工是利用薄膜淀积、光刻和腐蚀方法在衬底表面组建微机械结构,其关键是腐蚀掉牺牲氧化层,形成三维的微机械结构.此工艺的牺牲层通常是 SiO_2 ,位于运动部件下面,使用氢氟酸腐蚀 SiO_2 ,使该部件作为运动部件.这种MEMS工艺与集成电路兼容,便于与集成电路集成和大批量生产.MEMS微加速度计和MEMS角速度传感器就是表面微机械加工的实例.

(3) 第三代微机械加工技术

第三代微机械加工技术包括激光感应腐蚀和材料

淀积技术、电解刻蚀及电镀技术、超声和电子放电铣技术、inkjetting 法、模压法和浮调技术等。MEMS 设计时可以采用以上各种方法去加工 MEMS。另外圆晶片键合和真空封装 MEMS 技术也是 MEMS 目前采用的重要加工工艺,而 LIGA 微机械加工工艺由于需要昂贵的同步辐射 X 射线源,且掩膜制作工艺复杂,因此目前很难推广。

(4) MEMS 标准加工线 (foundry)

MEMS 的生产加工除在 MEMS 产品工厂实现外,也和集成电路一样有许多代加工线,为 MEMS 设计公司及其他公司提供 MEMS 代加工服务,有一些著名的 MEMS 商品化产品或样品就是在 foundry 线实现。现在国外 MEMS foundry 线主要有以下公司: BF Good rich Advanced Micro Machine、CMP 等。多数 MEMS foundry 具有加工 MEMS 全套设备的能力,然而由于 MEMS 种类繁多,材料和工艺范围很宽,不可能包含全部设备。美国国防远景研究计划局(DARPA)两年前建立了一个新的 MEMS 代加工服务组织,称作 MEMS-Exchange。这个组织与各个工业和产品加工商签订合同,为 MEMS 加工提供广宽的服务范围, MEMS 设计师设计的产品可在 MEMS-Exchange 协调下到各个生产线加工。

2.2.4 封装技术

封装技术是 MEMS 产品中最关键的技术之一。

与集成电路一样, MEMS 需要环境防护、电信号引出端、机械支撑和热量通路。但 MEMS 封装更复杂,还有许多与集成电路不同,有时需要与周围环境隔离,有时则需要与环境接触,以便对指定的理化参数施加影响或测量;有的 MEMS 封装要求在特殊的环境下进行,如加速度计;有一些封装则需要真空条件下进行,避免振动结构的空气阻尼或热传导作用。现在人们已经认识到 MEMS 封装的重要性, MEMS 封装比集成电路复杂得多,而且 MEMS 封装需要随产品要求而定,封装和测试费用占 MEMS 产品成本的 70% 以上。目前有多种形式的 MEMS 封装可满足 MEMS 商品化的需求。随着人们对 MEMS 封装的日益重视,新型的封装技术不断出现,其中较有代表性的是采用倒装焊技术的 MEMS 封装^[21]、上下球栅阵列封装技术和多芯片模块封装技术^[22]。Cincinnati 大学的光电 MEMS 器件采用倒装焊封装^[23]。

2.2.5 测试技术

MEMS 的测试技术是 MEMS 开发与生产中的重要组成部分。

通过对 MEMS 测试可以获得微机械结构及整个

MEMS 系统的各项参数,包括几何量、力学量、光学量、电磁学量、声学量等。MEMS 的测试与集成电路相比困难更大,除需测量电信号之外,还包含许多机械特性及其他物理参数。

3 MEMS 的应用

MEMS 技术的应用范围广泛^[24~28], MEMS 技术是一种典型的多学科交叉的前沿研究领域,几乎涉及到自然科学及工程技术的所有领域,如电子技术、机械技术、物理学、化学、生物医学、材料科学和能源科学等。与不同的技术结合,往往便会产生一种新型的 MEMS 器件。

3.1 微型传感器

微型传感器是 MEMS 最重要的组成部分。1962 年,第一个硅微型压力传感器的问世开创了 MEMS 技术的先河,并一直是推动 MEMS 技术不断进步的动力,同时 MEMS 技术的应用又使传感器的性能提高了几个数量级。现在已经形成产品和正在研究中的微型传感器涉及领域有压力、力、力矩、加速度、速度、位置、流量、电量、磁场、温度、气体成分、湿度、pH 值、离子浓度和生物浓度、微陀螺、触觉传感等。现在,微型传感器正朝着集成化和智能化的方向发展。

3.2 微型执行器

微型执行器主要有微电机、微开关、微谐振器、微阀门和微泵等。把微型执行器分布成阵列可以收到意想不到的效果,如可用于物体的搬送、定位。微型执行器的驱动方式主要有静电驱动、压电驱动、电磁驱动、形状记忆合金驱动、热双金属驱动、热气驱动等。微型电机是一种典型的微型执行器,可分为旋转式和直线式两类。

在 MEMS2000 年会上,瑞士的 Dellmann L 等人报道了一种用于手表的微型机械加工压电弹力电机(Elastic Force Motor),力矩高达 $1 \mu\text{N} \cdot \text{nm}$,而功耗仅 $10 \mu\text{W}$ 。EFM 的工作原理是定子产生垂直振动,然后由转子转换成转动。定子由 ZnO 压电层在谐振频率下产生垂直运动,工作频率为 20 kHz,典型激励电压为 4 V,转子弹性束将垂直运动转换成转动。与过去的定子相比,这种新型设计使模片振动的第一种模式得到应用,从而提高了振动的机械幅度。

3.3 微型光电器件和系统

随着信息技术、光通信技术的发展,宽带的波分复用光纤网络将成为信息时代的主流,光通信中光器件的微型化和大批量生产成为迫切的需要。MEMS

技术与光器件的结合恰好能满足这一需求.由 MEMS 与光器件融合为一体的微型光机电系统(MOEMS)将成为该领域中的一个重要研究方向.2000年,美国加利福尼亚大学电气工程学院的 Guo-Dung J Su 等人得到美国 DARPA 支持,使用表面微机械技术研制了高性能单晶硅反射镜二维(2D)光扫描器,反射镜在厚的(大于 $10\ \mu\text{m}$)绝缘硅(SOI)上形成,而且连接到表面微机械驱动器.

3.4 微型机器人

随着电子器件的不断缩小,组装时要求的精密度也在不断增加.现在,科学家正在研制微型机器人,能在桌面大小的地方组装如硬盘驱动器之类的精密小巧的产品.日本通产省的10年计划就是一例.军事部门对这种微型机器人表现了浓厚的兴趣.日本已制作出利用太阳能电池的微小机器人,它只有钱币大小.太阳能电池产生的电力驱动马达使机器人向着光亮的地方前进.

3.5 微型飞行器

微型飞行器一般是指长、宽、高均小于 $15\ \text{cm}$,重量不超过 $120\ \text{g}$,在成本可接受的情况下,研制的一种有军事用途的飞行器.这个飞行器的设计目标是 $16\ \text{km}$ 的巡航范围,并能以 $30\sim 60\ \text{km/h}$ 的速度连续飞行 $20\sim 30\ \text{min}$.美国陆军把这种微型飞行器装备到陆军,它被广泛地用于战场侦察、通信中继和反恐怖活动.MIT(麻省理工学院)新设计的微型飞行器,预计其飞行速度为 $30\sim 50\ \text{km/h}$,可在空中停留 $1\ \text{h}$,具有侦察及导航能力.

3.6 微型动力系统

微型动力系统以电、热、动能和机械能的输出为目的,以毫米到厘米级尺寸产生 $1\ \text{W}$ 到 $10\ \text{W}$ 级的功率.MIT从1996年开始了微型涡轮发动机的研究.它们研制的涡轮发动机利用 MEMS 加工技术制作,主要包括空气压缩机、涡轮机、燃烧室、燃料控制系统(包括泵、阀、传感器等),以及电动机/发电机.该校已在硅片上制作出涡轮机模型,其目标是 $1\ \text{cm}$ 直径的发动机产生 $10\sim 20\ \text{W}$ 的电力或 $0.05\sim 0.1\ \text{N}$ 的推力,最终达到 $100\ \text{W}$.MIT正在研究一种微型双组火箭发动机,它由 $5\sim 6$ 片硅片叠在一起组成.硅片上制作有燃烧室、喷嘴、微泵、微阀及冷却管道等.整个发动机约长 $15\ \text{mm}$ 、宽 $12\ \text{mm}$ 、厚 $25\ \text{mm}$.使用液态氧和乙醇作燃料,预计能产生 $15\ \text{N}$ 的推力,推力重量比是目前大型火箭的 $10\sim 100$ 倍.美国 TRW 公司、航空航天公司和加州理工学院(CIT)组成的研究小组提出了一个“数字推进概念”方案.在这个方案中,将有 $104\sim 106$

个微推进器被集成到一块直径为 $10\ \text{cm}$ 的硅片上,并已研制出了 $3\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$ 的微推进器阵列.

4 国内外 MEMS 技术的状况

综合分析文献[29~35],可知国内外 MEMS 技术的发展状况.

4.1 国外 MEMS 技术的发展现状

工业发达国家对影响 21 世纪社会经济发展和国家防务的 MEMS 技术的发展十分重视,在原有将传感器列为优先发展的关键技术基础上,又制定了继续把 MEMS 作为关键技术发展的政策.美国确定军事应用为其主要方向,侧重于以惯性器件为代表的 MEMS 传感器的研究;日本重点发展进入工业狭窄空间微机器人、进入人体狭窄空间医疗微系统和微型工厂;欧洲则重点发展 uTAS(Micro Total Analysis System)——全微分析系统,制定了 Eurimus 计划和 Europractice 计划.重视基础技术建设的同时十分重视设计、材料、加工、封装、测试等技术的发展;美国除在研究单位建立独立的加工实验室外,还特别建立了专门为研究服务的加工基地,如 MCNC、SANDIA 国家实验室等;德国也建立了 BOSCH 实验室.

MEMS 的市场需求上升.目前部分器件已经实现了产业化,如微型加速度计、微型压力传感器、数字微镜器件(DMD)、喷墨打印机的微喷嘴、生物芯片等,应用领域十分广泛.据统计,1995年美国传感器市场销售额中,微电子机械传感器销售额为 15 亿美元.2002年的销售额达到 380 亿美元,相关市场将达到 1 万亿美元.最近,美国朗讯公司开发的基于 MEMS 光开关的路由器已经试用,预示着 MEMS 发展的又一高潮来临.

国外 MEMS 技术的发展已有 30 多年历史,其发展的特点如下.

(1) 国外现已形成三种类型的生产规模,大型企业大批量生产 100 万只/年以上产品,有的企业批量生产能力在不断提高,年生产能力超过 1000 万只以上;中等规模的企业生产能力为 $1\sim 100$ 万只/年;一些研究所根据特殊要求生产小批量产品,年产量在 1 万只产品以下.欧洲在第四和第五框架计划中为加强 MEMS 的深入发展,根据地域特点和市场需求建立了 6 个加工中心和 1 个竞争中心.

(2) 产品功能进一步扩展和完善, MEMS 器件正在向微电子部件和系统演变,不仅具有信息转换的功能,而且具有自检、自校、量程转换、远程设定和无线

通讯等智能化功能,更能适应多种测量的控制需要。如汽车压力传感器已不再是单独分立的元件,它和其它部分共同构成压力检测系统,如 Motorola, NT Sensor 等公司,其中 Motorola 公司量程为 100 kPa 系列的压力传感器性能为 4.487 ~ 4.813 V 满量程输出,精度 $\pm 1.5\%FS$,线性 $\pm 0.3\%FS$ 。

4.2 国内 MEMS 技术的发展状况

中国的 MEMS 研究始于 1989 年,在国家“八五”、“九五”计划期间,得到了国家自然科学基金委员会、科技部、教育部、中国科学院和总装备部的积极支持,经费总投入约为 1.5 亿人民币。经过十几年的发展,我国在多种微型传感器、微型执行器和若干微系统样机等方面已有一定的基础和技术储备,初步形成了几个 MEMS 研究力量比较集中的地区。包括京津地区,如清华大学、北京大学、中科院电子所、信息产业部电子 13 所、南开大学等;华东地区,如中科院上海冶金所、上海交通大学、复旦大学、上海大学、东南大学、浙江大学、中国科技大学、厦门大学等;东北地区,如信息产业部电子 BF 所、哈尔滨工业大学、中科院长春光机所、大连理工大学、沈阳仪器仪表工艺研究所等;西南地区,如重庆大学、信息产业部电子 24 所、44 所和 26 所等;西北地区,如西安交通大学、航空 618 所、航天 771 所等。在微型惯性器件和惯性测量组合、机械量微型传感器和致动器、微流量器件和系统、生物传感器和生物芯片、微型机器人和微操作系统、硅和非硅制造工艺等方面已取得一定成果。现有的技术条件已初步形成 MEMS 设计、加工、封装、测试的一条龙体系,为保证我国的 MEMS 技术进一步发展提供了较好的平台。“十五”期间, MEMS 正式列入 863 计划中的重大专项,加上教育部的教育振兴计划、中国科学院的知识创新体系、基金委和科技部新的立项以及地方和企业的投入,预计总经费可达 3 亿人民币以上。针对国际 MEMS 发展趋势和未来的产业化前景,结合国家竞争前核心技术发展战略,围绕生物化学分析、工业自动化、信息技术等行业的社会经济发展需要,以发展我国 MEMS 产业化基础的关键技术作为切入点,掌握 MEMS 相关的设计、加工、测试、封装、装配和系统集成等方面的具有自主知识产权的理论方法和关键技术;开发出若干小批量、多品种、高质量的 MEMS 器件及系统;逐步建立起我国 MEMS 研发体系和产业化基地,提高我国在 MEMS 领域的核心竞争力,为推动 MEMS 的可持续发展和产业化打下良好基础,并在某些方面进入国际领先水平。

5 MEMS 技术的展望

5.1 研究方向多样化

MEMS 技术的研究日益多样化,涉及的领域主要包括惯性器件如加速度计与陀螺、AFM(原子力显微镜)、数据存储、三维微型结构的制作、微型阀门、泵和微型喷口、流量器件、微型光学器件、各种执行器、微型机电器件性能模拟、各种制造工艺、封装键合、医用器件、实验表征器件、压力传感器、麦克风以及声学器件等 16 个发展方向。内容涉及军事和民用等各个应用领域。

5.2 新材料的研究与开发

MEMS 的材料发展,今后的重点是研究开发将普通材料合成用于 MEMS 的技术,开发两种以上材料的合成,如在玻璃和金属中加入无机纤维;具有金属和半导体纳晶分布的聚酯玻璃基材料,以及响应快及发射特性好的光材料等。

5.3 加工工艺多样化

加工工艺多种多样,如传统的体硅加工工艺、表面牺牲层工艺、溶硅工艺、深槽刻蚀与键合工艺相结合、SCREAM 工艺、LIGA 加工工艺、厚胶与电镀相结合的金属牺牲层工艺、MAMOS(金属空气 MOSFET)工艺、体硅工艺与表面牺牲层工艺相结合等,而具体的加工手段更是多种多样。

5.4 系统单片集成电路化

一般传感器的输出信号(电流或电压)很弱,若将它连接到外部电路,则寄生电容、电阻等的影响会掩盖有用的信号,因此采用灵敏元件外接处理电路的方法已不能得到质量高的器件,只有把两者集成在一个芯片上,才能具有较好的性能。

5.5 MEMS 器件芯片制造与封装应统一考虑

电气机械封装是商品化 MEMS 产品的关键因素,封装成本约占产品总成本的 20% ~ 90%,封装形式取决于它的类别和用途。MEMS 器件与 IC 芯片的主要不同在于, MEMS 器件芯片一般都含有运动部件,比较脆弱,在封装前不利于运输,所以 MEMS 器件芯片制造与封装应统一考虑。

5.6 目前 MEMS 技术存在的问题

笔者认为,在微观领域,不能完全采用宏观情况下的各种定律与公式,如虎克定律、牛顿摩擦定律、弹性力学相关定律、材料力学的相关定律、流体运动定律、N-S 方程等。作者认为这些公式必须修正才能用到 MEMS 技术中;还有其他参数,如材料力学的杨氏模

量、泊松比等,这些参数必须根据实际情况进行修正。目前在计算中一直沿用这些公式和参数,主要原因是目前的实验设备和实验经费不能满足,不能对这些公式和参数进行一一修正,是不得已而为之。希望通过科学工作者共同努力,将 MEMS 技术中的各种参数、公式逐步修正,逐步完善,成为指导科学实践的工具。

参考文献:

- [1] Terry S C, Herman J H, Angel J B. A gas chromatograph air analyzer fabricated on a silicon wafer[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 1979, ED-26:1880.
- [2] Middelhoek S, Audet S A, *Silicon Sensors* [M]. New York: Academic Press, 1989.
- [3] Fluitman J. Microsystems technology: objectives[M]. *Sensors and Actuators*, 1996, A56: 151—166.
- [4] Hirano T. Japanese activities in micromachining[J]. *MST News*, 1995, 14: 14—17.
- [5] 张威, 张大成, 王阳元. MEMS 概况及发展趋势[J]. *微纳电子技术*, 2002(1): 22—27.
- [6] 上海科技在线学习[Z]. <http://www.stcsm.gov.cn/fuwuzhinan/ff/fa/know/mue/200107024nr1.htm>.
- [7] 李炳乾, 朱长纯, 刘君华. 微电子机械系统的研究进展[J]. *国外电子元器件*, 2001(1): 4—8.
- [8] 徐小云, 颜国正, 丁国清. 微电子系统(MEMS)及其应用的研究[J]. *测控技术*, 2002, 21(8): 1—5.
- [9] 赵淳生, 陈启东. 微型机械的特点、研究现状和应用[J]. *振动、测试与诊断*, 1998, 18(1).
- [10] 刘军营, 褚金奎, 朱向荣, 等. 微机电系统的发展[J]. *山东理工大学学报*, 2003, 17(1): 107—110.
- [11] 李德胜, 王东红, 孙金玮, 等. MEMS 技术及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.
- [12] 王阳元, 武国英, 郝一龙, 等. 硅基 MEMS 加工技术及其标准工艺研究[J]. *电子学报*, 2002, 30(11): 1—8.
- [13] [德] Menz W, Mohr J, Paul O. 微系统技术[M]. 王春海, 于杰等译. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [14] [美] Stephen A, Campbell. 微电子制造科学原理与工程技术[M]. 曾莹, 严利人, 王纪民等译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [15] Marc Madou. *Fundamentals of Micro Fabrication* [M]. CRC Press, 1997.
- [16] Jack W Judy. *Microelectromechanical systems (MEMS) fabrication, design and applications*[J]. *J of Smart Materials and Structures*, 2001(10): 1115—1134.
- [17] 王志越. IC & MEMS 制造技术及其发展趋势[J]. *电子工业专用设备*, 2003(3): 12—16.
- [18] 李拴庆, 付士萍. 微电子机械系统[J]. *半导体技术*, 2001, 26(8): 1—5.
- [19] 温诗铸. 关于微机电系统研究[J]. *中国机械工程*, 2003, 14(2): 159—164.
- [20] Tong Q Y, sele G. *Semiconductor wafer bonding*[J]. *A Wiley-Interscience Publication*, 1999.
- [21] 王海宁, 王水弟, 蔡坚, 等. 先进的 MEMS 封装技术[J]. *半导体技术*, 2003, 28(6): 7—10.
- [22] 田斌, 胡明. MEMS 封装技术研究进展与趋势[J]. *传感器技术*, 2003, 22(5): 58—60.
- [23] Boustedt K, Persson K, Stranneby D. Flip chip as an enabler for MEMS packaging [A]. In: 2002 *Electronic Components and Technology Conference Electronic Components and Technology Conference* [C]. 2002.
- [24] 杨友文, 王建华. MEMS 技术现状及应用[J]. *微纳电子技术*, 2003(3): 29—32.
- [25] 童志义, 赵晓东. 国内外 MEMS 器件现状及发展趋势[J]. *电子工业专用设备*, 2002, 31(4): 200—206.
- [26] 刘晓斌. 微机电系统的进展分析与研究[J]. *机械研究与应用*, 2003, 15(1): 72—75.
- [27] 赵正平, 杨拥军. 信息 MEMS 技术[J]. *微纳电子技术*, 2002(3): 6—11.
- [28] 刘文耀, 杜君文, 应济. MEMS 的概念及其国内外的研究状况[J]. *机械工程师*, 2001(2): 8—10.
- [29] 亢春梅, 曹金名, 刘光辉. 国外技术的现状及其在军事领域中的应用[J]. *传感器技术*, 2002, 21(6): 4—7.
- [30] MEM Technology[Z]. http://www.stcsm.gov.cn/earnring/lesson/gao_xin/200/0724/200/07024m-5.asp.
- [31] Lang W. Reflexions on the future of microsystems[J]. *J of Sensors and Actuators A*, 1999, 72: 1—15.
- [32] 王立鼎, 罗怡. 中国 MEMS 的研究与开发进程[J]. *仪表技术与传感器*, 2003(1): 1—3.
- [33] 王宏. 微电子机械系统(MEMS)发展研究[J]. *微处理机*, 2002(3): 4—7.
- [34] 孙立宁, 周兆英, 龚振邦. MEMS 国内外发展状况及我国 MEMS 发展战略的思考[J]. *机器人技术与应用*, 2002(1): 2—4.
- [35] The development tendency of MEMS technology[Z]. <http://mnri.sytu.edu.cn/info/info-1.html>.