

# 微系统集成技术研究的动向

钟先信 李建蜀 肖沙里 徐涛 朱维安

(重庆大学微系统研究中心 重庆 630044)

缪秀娥

(华南理工大学机电工程系 广州 510641)

**摘要** 在微电子、微机械和微光学的基础上,集成传感器、执行器和信号处理单元于一体的微系统技术,是现代技术发展的一个新动向。微系统技术在微传感器、微执行器、微光学和专用集成微型仪器等方面有较大发展。微系统在一些工业中获得应用。

**关键词** 微系统 微光学 微传感器 微执行器 专用集成微型仪器

## 1 引言

近年来,继微电子之后,微机械、微光学的发展越来越引起人们的关注。在以上“三微”基础上出现的微系统技术是多学科交叉的前沿领域,已经显示出了强大的生命力。微系统是在微电子、微机械和微光学的基础上,把传感器、执行器的信号处理单元集成在一起的工程系统,也是一个信息系统(图1)。微系统(Micro-

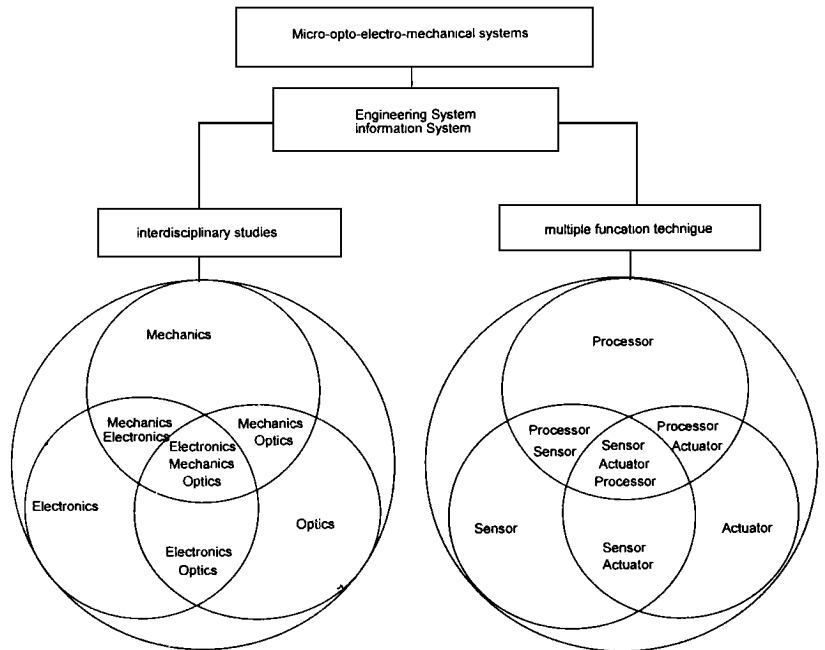


Fig. 1 Illustration of Micro-opto-electro-mechanical systems

opto-electro-mechanical systems 或 Microsystems) 技术是高新  
技术, 受到许多国家政府部门、学术界和工程技术部门的高度重视。

在政府支持, 市场牵引和技术推动下, 微系统技术发展十分迅速。据统计 1995 年全球传感器市场有 60 亿美元, 从业人员 6 万人, 大约 25% 的传感器市场属于微系统。主要市场是用于生产过程控制、工业控制、航空航天、军事、运输、汽车、医疗和家电等。

## 2 微光学

集成光学象集成电路一样, 单片集成光学是将各种光波导器件都制作在同一种材料的衬底上, 譬如以半导体作为衬底, 把光源、探测器和光放大器等都集成在一起。但是, 各种半导体材料特性不同, 如 Si、GaAs、InP 的电光和声光特性远不如铁电晶体  $\text{LiNbO}_3$  (铌酸锂) 等电介质材料。因此, 可用不同材料作衬底制成性能最佳的器件或组件, 然后组合之后做成完整系统, 即混合集成光路。

光学工艺采用半导体集成电路改进技术, 产生了光学工艺革命制造了微光学装置, 例如制作微衍射和微反射镜, 二元光学和塑料微型复制技术等。应用微光学装置导致许多电光系统的革命, 从摄像机、可视电话和高密度数据存储到机器人视觉、光学扫描和高分辨物体显示等。现在用的光束分光, 图像焦平面的增强, 激光二极管的扩束和液晶显示增强等, 它可用于常规光学系统不能使用的地方。

(1) 二元光学是应用亚微米级微工艺和微机械技术创造的新颖的光学装置, 应用于各种光学聚焦镜, 光学分光镜, 双焦点自作用透镜, 袖珍式光盘头和抗反射表面等。二元光学透镜阵列从一大块材料的制造用光致抗蚀剂成型和顺序反应离子刻蚀法成型。柱状微透镜可采用成形玻璃纤维拉制, 先预制加热到控制温度, 拉制玻璃到符合所需断面尺寸, 用各种方法制造为椭圆柱微透镜, 长度可达 15cm, 当  $\lambda = 0.85\mu\text{m}$  时数值孔径大于 0.6。另外, 微折射镜一种价廉物美成批生产的好方法, 是低温复制方法, 即模压或注塑等, 一种新型的光学多晶硅材料能用于压制亚微米级二元光学结构, 宽/深比达 1:20 等。现在微光学已从自聚焦微透镜、微折射镜和二元光学进一步向下列的三个方向发展: ①折射微透镜阵列和折射-衍射混合式微光学; ②微机械三维集成微光学; ③光机电微透镜系统。

### (2) 折射微透镜阵列和折射-衍射混合式微光学

由于变折射, 自聚焦透镜的波长范围及质量不易控制, 二元光学衍射存在色差, 所以近年来大力发展热技术成形、激光成形、激光固化成形的折射微透镜阵列, 这种技术与 LIGA 技术或 Sol-gel 技术结合, 就可以大批量生产廉价优质的微透镜, 因此折射-衍射微光学系统得到发展。微光学在光电一体化技术用于光学成像传感器中取得了较好进展, 它不仅能使光电集中处理, 如放大、像扫描、彩色可视、在建筑造型探测和图像预处理上都大有用处, 可实现光学图像输入/电子图像输出。

近年来, 在新理论、新工艺、新原理、新方法、新技术方面, 正在不断发展, 如 Merit fun 函数优化设计, 可根据系统的初始校正来确定其高能像差, 实现参数最优化设计; 又如半频掩模法, 这是一种新的光刻法, 不需要配置一套掩模和对准就可以进行高衍射效率(80%以上)的衍射光学元件的制造。

### (3) 微机械三维集成微光学

微机械加工技术应用于制造三维微光学装置,光学元件的光轴平行于基底,把三维光学系统集成到一个基片上。微 Fresnel 透镜、反射镜、分光镜、光栅和精密光学台等集成制造在一起,而且可旋转可平移的微定位器同光学元件用兼容的表面微机械加工技术制造,还可把光学准直和光机械开关,甚至把半导体激光器混合集成制造在一起。这种新型三维微光学技术可大大降低尺寸、重量和绝大多数光学系统的成本,对光开关、光传感和光学数据存储系统,以及光电子元件的封装有重大的影响。

### (4) 微光源

微光源是集成微光机电系统中的关键器件之一。微光学系统中要求多种微光源,要有足够的光功率和波长,譬如中红外到兰色波段,以适应各种不同的需要。要求尺寸小,还要有合适的空间相干性,以满足微系统中光学元件聚焦的要求等。七十年代 GaAs 半导体激光器问世,这种亚微米的点光源激光二极管可发出数毫瓦的光功率。它体积小,效率高、谱线窄、功率高、可获得高增益、低阈值、频率稳定性高的基模输出,已成为许多光学系统的关键器件。它还可作成尺寸紧凑的半导体激光器件阵列,但是线阵半导体激光器的光束发射角大,而且各方向发散不同,有很大的像差,光强分布不均匀。采用新型的二元光学器件,对光束整形、准直、消像差,可得到光斑截面为矩形且光强均匀度较好的准平行细光束。

80 年代末,有新的固体微激光,有新的光波段,有非常好的时间相干性和空间相干性,而且功率也很大,例如微型 Q 开关激光,峰值功率达几 kW,脉冲时间少于 1ns。新型的垂直腔表面发射激光器,是一种平面光学器件,对三维微光学成批制造十分匹配,对微光学系统十分有用。

## 3 微传感器和微执行器

微传感器是研究最早,技术较为成熟,实用化程度高,市场占有率最大的,譬如压力传感器、差压传感器、加速度传感器、陀螺、力传感器、触觉传感器、接近传感器、温度传感器、湿度传感器、空气流量传感器、气体传感器、生物传感器、电荷传感器等等。微执行器在马达、开关、继电器、阀门、流量控制器、微型泵、光开关、光探测器、动态自聚焦镜、光斩波器、光扫描器等取得了一些成绩。

研究微传感器和微执行器的新原理、新材料、新结构和新的制造方法,至今仍然是研究的热点之一。但是,随着市场需求和技术发展,近年来对集成微传感器和微执行器装置的研究,在智能化、集成化、高性能、可靠性、多功能、多样性等方面有很大发展,例如带自检查和闭环作用的传感器和执行器,微型大阵列器件,多功能智能传感器,传感器、执行器和微电子处理线路集成制造在一起的测控系统功能部件等。微传感器和微执行器发展的动向主要表现在以下几方面:

### (1) 提高性能

目前,多数微传感器和微执行器还处于实验室研究阶段,尚未形成微传感器和微执行器生产体系,在生产和使用中占的份额较小。主要原因是多数器件的性能还不能满足市场的要求,譬如稳定性、灵敏度、使用寿命、机械强度以及市场价格高等。例如以加速度计和陀螺仪为例,

如果陀螺仪稳定性、可靠性改善,与加速度计集成在一起制造成惯性测量系统,作为交通工具导航的一部分则市场扩大,对社会的影响也大。

用于神经信息处理研究的微机械测头,这个装置有集成在片上的信号处理的10个通道,这些通道用于同时发生的记录神经的反映,测头非常小,可以穿过针孔。

用传感器获取信息,从点到线,从线到面,从三维到多维空间,检测的综合参数越来越多,获取的信息量越来越大,性能不断提高,与此同时,信号处理部分随大规模集成电路集成度增加,飞速向高速和高密度化,发展信息处理能力成倍增长,传感器智能化水平越来越高。单片图像传感的智能传感器是在半导体基片上把电源驱动部分、光电转换部分、信号处理部分、记忆存储部分和传送部分等集成制造在一起,实现高度智能化的图像传感器。日本三菱电机公司开发出人工网膜基片,它是可用于机器人的一种智能图像传感器。在14mm见方的砷化镓衬底上排列 $64 \times 64$ 个光敏元件,控制多元件的电压,能瞬间处理光电器件可获取的信息,提取图像特征,存储和识别文字。如果在基片上的像素达 $1000 \times 1000$ 个,就可构成人工视网膜当作机器人眼睛用。该公司还研制成能够认识手写文字的大规模联想神经网络,能够选择和取舍输入的信息的神经光传感器,具有接近人脑的信息处理功能。它是一种高级智能传感器。

#### (2) 传感器和执行器集成制造在一起

从技术发展来看,采用兼容制造技术把传感器、执行器和电路、光路等集成制造在同一芯片上,传感器也可带有自校正和自检测的执行器和线路,可以降低基准的偏移,改善灵敏度和带有报警功能等。与此类似,执行器也可带有传感器和信号处理线路,测量执行器的输出、通过闭环控制系统,消除偏差、干扰和非线性。例如,一个压力传感器可用一个静电执行器检测和校正灵敏度,当我们需要提高输出线路的增益时,可调整传感器的性能。又例如一个流量执行器可通过流量传感器测出输出流量与额定值进行比较,然后调整阀门的大小,这样就可消除非线性、偏差和执行器的不精确性。

#### (3) 阵列器件、嵌入器件和功能部件

同一种类型或不同类型的集成阵列器件,可以满足多种不同需要,传感器阵列可提高可靠性和稳定性,执行器阵列可增加冗余度和操作的可靠性。器件嵌入到材料、产品、装置、结构、车辆和飞行器中,监控材料和零部件的工况,以防事故发生。不同传感器和执行器阵列复合制造在一起则性能更佳。这种部件可以包含许多器件,目的是为了实现在一定的功能,而不是为了测量。

#### (4) 分布式部件,机敏材料和机敏结构

阵列器件分布到材料和结构中,实现一定的功能,可构成机敏材料和机敏结构,例如,由一个阵列微系统功能部件,含一些传感器、执行器和光纤构成飞行器的可变机翼控制系统,达到最佳的飞行效果。

## 4 专用集成微型仪器(ASIM)

单个传感器功能提高是有限的,多种传感器的组合及传感器集成,加上自动修正补偿,自诊断和判断功能,具有多点、多维、成像、特征提取、频谱分析、模式识别等功能,做成专用集成微型仪器对复杂的测量对象能有效地提取信息和数据处理,能输出测量结果等。专用集成微型

仪器是微系统集成技术的发展方向之一。在化学分析仪和生物医疗分析仪方面获得了很好应用。早在 1970 年美国斯坦福大学在基片上制造的全集成色谱分析系统就是出色的成果之一。近年来,又开展了一些新的专用集成微型仪器的研究,例如微质谱仪、微重金属检测仪、微血液分析系统、微聚合酶链反应器、微轮廓测量仪等等。

### (1) 片上集成微型仪器系统

硅片上的集成技术近年来达到可以在硅片上集成微型仪器系统。集成微仪器系统包含,诸如传感器、信号处理电路、模数转换和接口电路总线等等,需要时执行器也包含进去。传感器在微仪器系统中只是一个器件,而微仪器系统是仪器测量和控制的一部分。微仪器系统也可做成功能部件,它可更换传感元件和修正补偿系统,而电子信号处理和读出电路兼容,构成一种微型虚拟仪器系统。

例如用微机械加工制造的加速度计,带有集成电路,可用于汽车安全气囊打开系统。

### (2) 多片集成组合式混合集成微仪器系统

分片加工可采用相对简单的设备和容易实现的技术,实现更高性能的微仪器系统功能。

例如集成光谱仪把功能不同的片子分开制造,例如光栅和光电二极管阵列制造在一个片上,采用一般半导体平面工艺,另外二片多个工作表面要求非常光滑、反光性好,用改进的半导体工艺加工镜面,三片对中后用接触焊达到设计要求。

### (3) 微仪器平台

集成微仪器系统可设计制造硅平台,可在平台上布置智能传感器、数据总线、自控自检电路和电源部件等,这个仪器系统由微控制器,或数字信号处理器根据数据处理要求进行控制,传感器件和平台可分开制造,数字信号处理器用线焊或倒装焊接在一起,可以保证片间集成和混合达到很高的可靠性。

## 5 展 望

半导体集成制造技术可把上百万个晶体管集成在一块硅片上,而使复杂的电子装置成为现实,当今质优价廉的电子芯片在人们生产和生活中到处都在发挥作用。同样的道理,微光机电系统技术可以把上百万个极小的元器件制造在一块硅片上。

美国的德克萨斯仪器公司(TI)用 VLSI 技术和表面微机械加工技术制作了大规模集成的微系统,称为数字化微镜器件。它是显示录像画面的器件。这个器件的主要部分由  $768 \times 576$  个比头发丝直径还小的铝反射镜和与之对应的  $768 \times 576$  位静态存储器构成,是一种上下对应的二层结构,每个铝镜呈方形,每个对角线的两端各有一个梁支承,铝镜下面存储器的状态决定施加于铝镜的静电力,因而决定铝镜的偏转状态。将一个强光源经过一个旋转彩色轮依次将红兰绿三色光投射到这个器件上,芯片上的电路系统可以使每一块镜面发生倾斜,从而把光反射到 12 英尺的大屏幕上。该公司正在研制用于高分辨率的数字微镜器件,其像素为  $2048 \times 1150$ 。

微系统在微机器人、微型卫星、微型雷达、微型光纤光谱仪等都取得一些新进展。

微系统集成技术具有划时代的意义。它利用先进的微细加工技术将微电子、微机械和微光学集成在一起来完成常规的和特殊的功能,可优质高产低耗,大大地提高其可靠性和智能化功

能。微系统有潜在的市场,有量大面宽的应用领域,微型化是现代科学技术的一个发展趋势,可能引发新一轮工业革命。

### 参 考 文 献

- 1 Bryzek Janusz. Impact of MEM S technology on society. *Sensors and Actuators*, 1996, A56: 1~9
- 2 Motamedi M Edward. Micro-Opto-electro-mechanical Systems. *Optical Engineering*, 1994, 33(11): 3505~3516
- 3 Tum mala Rao R. Multichip integration for revolutionary electronics in the 21st century. *Micro system technologies '94*, 1994: 64~76
- 4 Wu M C, et al. Micromachined free-space integrated micro-optics. *sensors and Actuators*, 1995, A50: 127~134
- 5 KO Wen H. The futune of sensor and actuator systems. *Sensors and Actuators*, 1996, A56: 193~197

## Progress in Microsystems Integrated Technology

ZHONG Xian-Xin, LI Jian-Shu, XIAO Sha-Li, XU Tao, ZHU Wei-An

(*The Microsystems Research Center of Chongqing University, Chongqing 630044*)

MIAO Xiu-E

(*The Mechatronic Engineering Dep artement, South China University of Technology, Guangzhou 510641*)

### Abstract

Based on microelectronics, micromechanics and microoptics, the microsystems technolgy integrated sensors, actuators and processors, which are a technolgy progress. Recently, the micro sensors, microactuators microoptics and application specific integrated microinstrument (ASIM) gain some technology achievement. The microsystems are becoming accepted divesces for many industrial applications.

**Key words:** Microsystems, Microoptics, Microsensors, Microactuators, ASIM

钟先信 男, 1935年生, 1957年毕业于重庆大学, 1996年到美国科罗拉多大学作访问学者, 现任重庆大学教授、博士生导师, 智能微系统研究中心主任, 中国仪器仪表学会精密机械学会副理事长, SPIE、AAAS和IEEE会员。长期从事智能仪器及机械、传感器新技术和智能微系统研究。主持和主研完成科研项目近20项。荣获国家科技进步二等奖和三等奖共二项, 省部级奖五项, 申请专利一项, 发表论文90余篇。