

微系统研究的思考和单芯片 RF-MEMS 研究进展

钟先信, 余文革, 李晓毅, 巫正中, 刘积学, 陈 帅, 邵小良

(重庆大学教育部光电技术及系统开放实验室, 重庆 400044)

[摘要] 微光机电一体化系统简称微系统, 是当今技术发展的前沿领域之一。微系统技术的发展将大大地促进许多产品或装置微型化、集成化和智能化, 成倍地提高器件和系统的功能密度、信息密度与互连密度, 大幅度地节能降耗, 有广阔的应用领域和市场。文章阐述了微系统研究的意义以及微系统基础研究的重要性, 概述了用于无线通信设备的 MEMS 器件的性能, 指出了 MEMS 技术是最终实现单芯片机电一体化无线收发系统的根本途径之一, 介绍了用于无线通信网络的单芯片机电一体化的微系统研究进展情况。

[关键词] 微系统; 集成; 单芯片; 无线通信系统

[中图分类号] TN4; TN92 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)07-0021-05

1 微系统既是功能系统又是信息系统

现代科学技术的发展, 迫切需要把机械、声、光、电、磁、热、化学、生物等功能器件高度精密地组合, 探索新原理、新功能的器件和系统, 通过微型化、集成化, 不仅减小了尺寸, 而且具有单一器件无可比拟的新功能。微系统技术的功能取决于整个产品和系统的优化和提升, 是与系统和产品密不可分的高技术。近年来, 继微电子技术的快速发展, 微机械和微光学发展迅速崛起, 在“三微”基础上出现的微系统技术, 是多学科交叉和多种技术综合的高技术前沿^[1] (如图 1), 它把功能系统和信息系统结合起来, 显示了强大的生命力。

在多媒体、网络化和智能化高速发展的今天, 微电子信息处理已向系统级芯片集成发展, 从微型化或价格比来看, 信息获取技术(传感器)和信息执行技术(执行器)已成为瓶颈。为此, 亟需把信息获取、处理和执行加以集成, 特别是光机电一体化集成技术。一种新的微型装置是在微电子、微机械和微光学等基础上把传感器、驱动器、执行器和信号处理器等集成在一起并具有一种或多种功能的

微型装置, 称作微光机电系统(MOEMS)、微机电系统(MEMS)或微系统。它既是一个功能系统, 又是一个信息系统。微系统的发展将大大促进许多产品或装置的集成化、微型化和智能化, 成倍地提高器件和系统的功能密度、信息密度与互连密度, 大幅度地节能降耗^[2], 因此具有广阔的应用领域和市场。

微系统技术自 20 世纪 70 年代在汽车和机械制造业开始应用以来, 取得了大量成果。其中的成功例子如汽车防撞安全气囊加速度计, 以及在汽车上应用的集成测控温度、压力等的微系统器件, 成为国际市场汽车竞争的强有力因素。还有一些微系统产品也已进入实用化, 如电脑磁存储器的读数头、喷墨打印头、数字微反射镜显示器、微型光谱分析仪、微型医疗诊断仪、微化学分析实验室和生物基因芯片, 等等。

用微系统技术创新产品; 改造和提升传统工业, 当今研究的热点在通信技术, 汽车制造、机械制造、化学及医疗技术, 以及环保等相关领域, 对研发具有自主知识产权的新产品和增强传统工业的竞争力具有重要的战略意义。

[收稿日期] 2004-01-01; **修回日期** 2004-02-25

[基金项目] 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999033105)

[作者简介] 钟先信(1935-), 男, 重庆市人, 重庆大学教授, 博士生导师

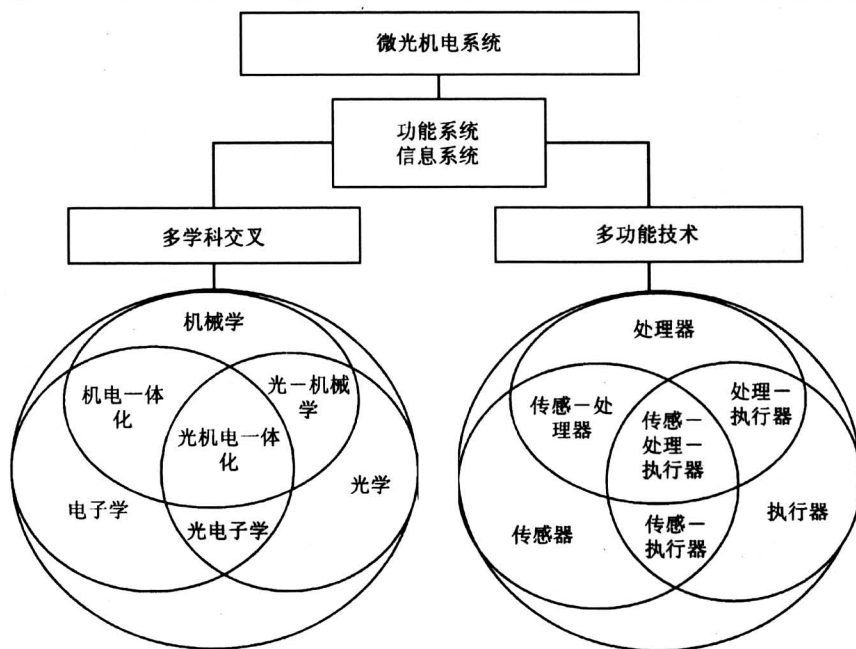


图1 微光机电系统框图

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

2 微系统基础研究是创新的突破口

微系统技术是在传统理论和技术的基礎上发展的。要冲破传统技术，有所创新和突破，取得有自主知识产权的原创性科研成果，成为高新技术的生长点、面向市场的新的经济增长点，促进创新成果迅速转化，更新传统工业并开辟新的就业领域，就必须重视微系统技术的基础研究。

在工业革命进程中，蒸汽机的发明和应用，产生了巨大的生产力，为人类做出了重大贡献，迎来了一场史无前例的工业革命，推动了人类的科技发展和文明。它所创立的科学和技术基础至今仍占有重要的地位。在一般的运动机械中，惯性力是主导力，因此在设计、加工、制造和应用中成为研究的重点。而在微系统中，由于涉及微米/纳米尺寸领域，在惯性力、重力、弹性力、摩擦力、表面强力、粘性力、静电力、电磁力等诸多力的作用下，其主导力的作用、转化规律和理论成为技术基础研究的重点。例如在一般马达和传动系统中，根据牛顿定律，物体一旦运动起来，就会保持惯性运动，而对于直径仅几百微米的马达来说，当尺寸减小时，其质量减轻、惯性减弱、表面摩擦力增大将最终占主导地位。因此，与一般马达相比，高速旋转的微马达能耗高、磨损大、寿命短，一旦去掉外力作用就会停止运动。但是运用它惯性小的特性，依

据材料的弹性特性，设计成梳状谐振马达，改进运动方式，将会大大改善运动性能。在两个零件之间增加或减小表面间的作用力，可能有完全不同的性能，例如微电触点或微阀会粘住电子插接件，会改变操作；两个薄片表面间的摩擦力和粘性需要很大的力量才能分开，等等。为此，可根据其特性设计新型结构，比如非接触式电磁开关。

在微光机电系统中，微光学、微电子、能源的供给、光机电一体化 的构筑理论和 CAD 等都是研究的内容，也是创新产品和应用的基础。

3 单芯片机电一体化无线通信系统

当今无线通信技术发展迅猛，RF-MEMS 技术的发展和 应用日益迫切和广阔。研究 RF-MEMS 技术是解决通信系统小型化、低功耗、低成本、高性能、更便捷等的基本途径，也是微光机电系统研究的前沿。

目前，在手机、无绳电话等无线通信设备中，仍然有一部分分离元器件作为片外组件，比如晶振、滤波器、开关和天线等，在电路板上与其他电路元件间必须有接口，占据相当大的空间，阻碍了便携式无线收发器的微型化及稳定性，成为便携式无线收发系统的瓶颈。现在，正研究用 MEMS 技术制作低损耗、高选择性带通滤波器，压控振荡器 (VCO)，微机械相控低通开关和 MEMS 谐振器

等, 这些器件不仅 Q 值高, 且便于同 IC 集成。图 2 为超外差无线收发器的结构框图, 片外分离器件可通过 MEMS 技术实现小型化, 最终和其他电路元件集成为单芯片收发系统^[3]。

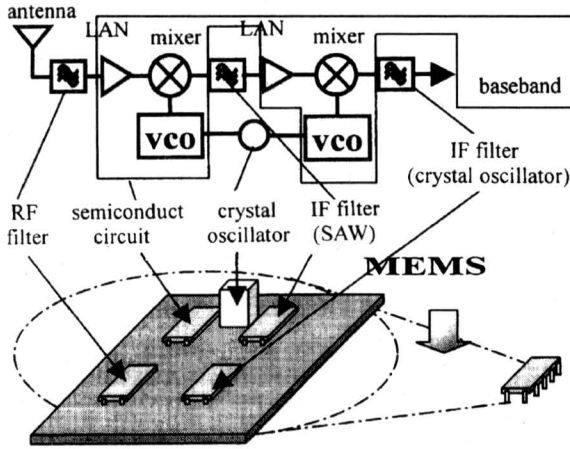


图 2 超外差无线收发器的结构框图

Fig.2 Block diagram of superheterodyne transceiver

3.1 MEMS 开关

使用 MEMS 技术, 采用标准互补 MOS 半导体技术可制造电路内的集成高性能射频 (RF) 开关, 满足了高可靠性、低功耗、低驱动电压和 SoC 制造技术兼容性等 4 项主要标准, 开关内的活动元器件由一个极小的氮化硅横梁 ($400 \times 50 \mu\text{m}$) 组成, 横梁两端被固定。这个横梁的两端都含有氮化钛加热电阻器、静电保持电极和一个铝块。最初, 横梁与在横梁下面 $3 \mu\text{m}$ 空隙内运行的射频信号线路保持分离状态, 当在电阻加热器上施加一个 2 V 电压时, 铝和氮化硅发生不同的热胀, 由于双压电晶片效应, 导致横梁变形, 直到与射频线路上的一个金质凸缘机械接触, 使开关闭合。一旦开关被接通, 在保持电极上会被立即施加一个电压, 产生一个静电应力, 使横梁保持在适合位置, 并允许加热电流关断。通过这种方式, 新的结构兼有低压电源和热驱动带来的高可靠性以及静电钳位的低功耗等优点。与 PIN 开关相比, 微机械开关没有使用 PN 结或肖特基结, 因而具有良好的线性度和插入损耗低的优点。目前, 还有一种在结构上与接触型 MEMS 开关稍有不同的电容耦合型 MEMS 开关。但是, 同 PIN 和 FET 二极管开关相比, MEMS 开关的响应速度较慢 (前者为 $4 \sim 20 \text{ ns}$, 后者为 $4 \sim 40 \text{ ns}$), 执行电压更高 (前者为 $3 \sim 5 \text{ V}$, 后者高于 20 V), 金属和金属电极直接接触型 MEMS 开关易

于出现粘贴现象, 在电极间有氮化膜的 MEMS 开关又存在介质击穿的问题。因此, 从实用方面对 MEMS 开关尚需做进一步研究, 如降低执行电压、提高响应速度等。

3.2 MEMS 可调电容及电感

目前, 已经用 MEMS 技术来提高无线通信系统现有器件的性能, 如压控振荡器和可调电容。基于 MEMS 技术的双层平行板可调电容, 其可调范围为 16%。由于是在硅基底上制作的器件, 因此用改进的 IC 制造工艺可以与其他电路元件集成在一起。同固态变容器相比, MEMS 可调电容具有损耗低、可调范围大、互连损耗和噪声小于片外 RF 组件等优点。用 MEMS 工艺容易制作平行板可调电容, 由于牵引效应的限制, 其可调范围的理论限制为 50%, 实际上由于寄生电容的存在, 可调范围要小得多, 现在能够达到的可调范围为 16%。也有三层平行板可调电容, 其调节范围更广, 但必须有两层以上的牺牲层, 工艺过程更复杂。一种新型的 MEMS 静电可调电容设计方案既保持了常规双平行板可调电容的简洁性, 又能将电容调节范围拓宽, 且只需一层牺牲层。另一种新颖的结构是在电感线圈下面衬底上腐蚀出一个深腔, 在深腔底面和侧壁上镀铜, 这样可大大减小电感线圈与衬底间的寄生电感和电磁耦合, 同时由于存在空腔, 减小了感应涡流, 从而增大了 Q 值。这种制作方法使 10 GHz 时电感的 Q 值达到了 30。

3.3 MEMS 谐振器和滤波器

在机械式振荡器件中, 最常用的是石英晶振和 SAW 器件, 但这些器件都是片外分立元件。随着 MEMS 技术的发展, 出现了薄膜体声波谐振器和微机械谐振器/滤波器。在谐振器的研究中出现了一种在硅基底上制作薄膜的技术, 用以制作小型化的机械式谐振器, 图 3 为两种薄膜体声波压电谐振器 (film bulk acoustic resonator, FBAR) 的设计方案^[4], 其原理是在两层电极间淀积一层压电层, 并与基底悬置分离, 由电极和压电材料构成谐振器。图 3a 由氮化铝作压电材料的 FBAR 其 Q 值达 1 000 以上, 频率范围为 $1.5 \sim 7.5 \text{ GHz}$, 这是一种很有发展前途的技术。该方案可获得较大的 Q 值, 但薄膜易碎; 图 3b 的方案用多层声阻抗材料将谐振器和基底介质隔离开, 但 Q 值大大降低, 可以通过改进工艺, 使 2 GHz 时 FBAR 的 Q 值达到 1 000 以上。

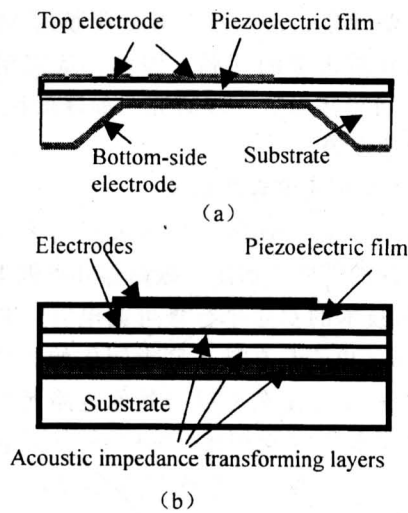


图3 两种薄膜体声波压电谐振器

Fig.3 Two thin-film bulk acoustic resonator

近10年来,由于在多晶硅材料的性能控制和微机械技术等方面取得了长足进步,与IC完全兼容的微机械谐振器受到重视,工作频率从低频到甚高频,用表面微机械工艺制作的多晶硅谐振器的Q值(真空中)达到了80 000,插损小于1 dB。这些滤波器可采用弯曲振动模态和横向振动模态特性,易于与CMOS器件集成,构成振荡器。

3.4 MEMS 天线

BICOMS, MEMS 等新兴微加工技术,使得不仅是数字、基带电路模块,甚至连射频模块也已成功地实现了微型化、芯片化的设计和生产。与此同时,天线作为重要的射频前端器件,其指标要求也日益苛刻。小型化、内置化、多频段、智能化是移动终端电小天线的发展趋势。目前研制有多种微机械天线,如双C型、S型、W型、倒F型等。其中有的结构可以直接印刷在电路板上,无需特殊工艺,适合与电路集成在一起。

在通信收发系统中,IC电路在放大、混频、数字处理等方面非常理想,但在频率选择和高稳定性方面非常差。由于MEMS器件和IC电路均适合于批量生产,都是在硅片或硅材料上腐蚀、淀积、光刻等,因此,这两种技术易兼容。利用MEMS技术,预计在不久的将来会出现比现在的超外差收发系统尺寸更小、功能密度更高的芯片级收发系统。

3.5 蓝牙无线网络化微传感器及嵌入式系统

“蓝牙”(bluetooth)是按短程无线连接的最高

要求设计的,其优点是体积小、使用成本低、能耗低、频率跳转速度快、可实现单芯片等。目前,蓝牙无线网络化微传感器、RF-MEMS天线及嵌入式系统的关键技术是蓝牙无线通信技术研究的前沿,是最终实现单芯片机电一体化蓝牙无线通信的基础。着眼于器件的演示和应用,将RF-MEMS天线与蓝牙芯片相结合,采用微机械蓝牙天线,研制了蓝牙点对点计算机通信实验系统,实现无线数据传输。借助自适应跳频与自配置蓝牙组网等新思想,设计蓝牙无线网络化微传感器嵌入式系统,选用了适当型号的嵌入式处理器和uClinux操作系统,实现无线远程图像监控^[5-7](图4,图5)。

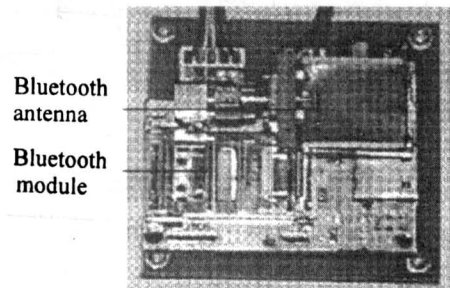


图4 蓝牙计算机通信演示装置

Fig.4 Bluetooth computer communication demo device

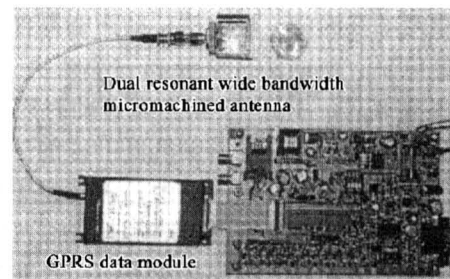


图5 无线远程图像监控系统
GSM/GPRS数据单元模块

Fig.5 GSM/GPRS data unit board for wireless remote image surveillance system

蓝牙技术把各种便携式电脑、移动电话和家用电器等用无线链路连接起来,将计算机与通信更加密切地结合起来,使人们能随时随地进行数据信息的交换与传输。蓝牙技术将掀起无线连接与通信的革命。但蓝牙仍然是一项发展中的技术,目前正处于起步阶段,要真正达到大规模进入商用市场并在用户中普及,还有大量应用技术细节需要解决,例

如不同公司生产蓝牙产品的互操作性、多功能单一芯片集成、不同场合的抗干扰与安全保密性、大幅度降低成本等。

4 结语

近年来, 微光机电系统的研究在世界各国正如火如荼地展开, 在很多方面取得了突破性进展。在微传感器研制方面已取得较大成就, 占有一定的市场; 在非传感器方面, 很大程度上还是新的领域, 技术难度大。但是, 微系统技术的前沿研究势头强劲, 正面临新的突破, 一旦技术成熟, 将会对信息、通信、机械、自动化、医疗、生物医学和环保等领域产生重大影响。“小东西”推动大世界, 可能引发新一轮的工业革命。

参考文献

- [1] 钟先信, 李建蜀, 肖沙里. 微系统集成技术研究的动向[J]. 光学精密工程, 1998, 6(4): 1~6
- [2] 钟先信. 微系统研究展望[J]. 中国工程科学, 2000, 2(1): 81~84
- [3] Nguyen C T C, Katehi. Micromachined devices for wireless communication [J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 97(9): 324~329
- [4] Krishnaswamy S V, Rosenbaum J. Compact FBAR filters offer low-loss performance [J]. Microwaves RF, 2002, 86(8): 127~136
- [5] Zhong Xianxin, Li Xiaoyi, Wu Zhengzhong, Yu Wenge. Wireless networked microsensor and its embedded system [J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(3): 227~233
- [6] Li Xiaoyi, Zhong Xianxin, Wu Zhengzhong, Yu Wenge. Bluetooth-enabled wireless sensor and corresponding integration design & fabrication techniques [A]. Pacific Rim Workshop on Transducers and Micro/Nano Technologies [C]. Xiamen, China, 2002. 801~804
- [7] Li Xiaoyi, Zhong Xianxin, Wu Zhengzhong. Interface techniques for Bluetooth wireless sensing system [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2001, 23 (Suppl): 425~427

Research of MEMS and Development of One-chip RF - MEMS

Zhong Xianxin, Yu Wenge, Li Xiaoyi, Wu Zhengzhong, Liu Jixue, Chen Shuai, Shao Xiaoliang

(Key Lab for Optoelectronic Technology & Systems of Ministry of Education,

Chongqing University, Chongqing 400044, China)

[Abstract] Micro-electro-mechanical integration system, called microsystem for short is one of forefront technologies at present. The development of microsystem technologies will advance enormously micromation, integration and intelligentize of a lot of products and devices, double the function density, information density and interlinkage density of apparatus and system, save energy and reduce wasts greatly. It has quite wide application and market prospects. The significance of MEMS and its basic theory are expounded in this paper. Performances of MEMS devices used in wireless communication are summarized, and then a proposition that MEMS technology is one of the ultimate resolutions for one-chip wireless communication equipment is concluded. The evolvment status about one-chip mechanical electronic integration microsystem for wireless communication net is introduced.

[Key words] microsystem; integration; one-chip; wireless communication system