

集成微光机电系统研究^{*}

关键词 微光机电系统, 传感器, 基础研究

1 首席科学家

王跃林 中国科学院上海冶金研究所研究员, 博士生导师。1989 年获清华大学博士学位。1985 年—1998 年在浙江大学信电系工作, 1998 年至今在上海冶金研究所工作。

长期从事微机械和传感器研究, 对硅/硅键合技术在传感器方面的应用、压力传感器、加速度传感器、微机械谐振器和光通信用 MEMS 器件等方面成绩显著, 在 *IEEE Transactions on Electron Devices*、*Proceedings of The IEEE* 和 *Sensors and Actuators* 等刊物和会议上发表论文百余篇, 申请和授权专利 12 项。

2 科学内涵和意义

尺寸更小、功能更强、价格更低的信息系统是人们不断追求的目标。在此目标牵引下, 电子信息处理系统的微型化取得了飞速发展。但从一个完整的信息系统来看, 仅电子信息处理系统微型化还不够, 须有相应的信息获取、高密度存储和信息执行(应用)系统的微型化。这些系统中有大量非电的机械、光学、化学、生物等元件, 其微型化比较困难, 进程明显落后于电子信息处理系统, 已成为信息系统技术进一步发展的“瓶颈”。

集成微光机电系统(简称微系统)以批量化的微电子技术为基础, 制造出各种微光机电器件, 并将之与集成电路集成, 组成可完成信息获取、处理及执行功能的微系统。该技术的发展将是信息系统微型化的一条有效途径。

除电子系统外, 多微系统由微米尺度的运动机械、光学元件或流体输运机构等基本单元构成, 其基础理论问题也与上述基本单元相关。电子系统主要通过电子的运动来完成信息处理等功能, 其科学基础主要是电子在固体中运动, 其理论体系已相

当完整。微系统则是一个新领域, 包括信息获取、处理和执行功能, 不仅与电子在固体中的运动有关, 而且还涉及到微尺度下的力学、热学行为、机械运动规律、光学问题、流体运动、荷电粒子在流体中输运等新的基础问题。在微系统出现之前, 这类问题大多在宏观尺寸下遇到, 已有完整的理论体系来解决。微系统出现后的实践表明, 已有的这些理论体系较难解决微米尺度下的这类问题。另从技术角度看, 微电子技术已使微米乃至纳米加工技术非常成熟, 但微系统往往要三维加工(微电子是平面加工), 至今还不够成熟。

总之, 目前微系统的理论体系仍未建立, 技术还不够成熟。因此, 该项目根据我国未来微小卫星网络需求, 以硅固态卫星等空间飞行器中的微系统为目标, 针对微系统中关键的基本单元运动机械、光学元件和流体输运机构的理论与基础技术问题, 进行微米尺度机械结构力学、近波长光学、流体力学理论和基础技术的研究, 逐步建立微系统的理论体系, 完善基础技术, 为我国微系统发展奠定基础。

3 研究进展及创新点

(1) 光通信系统中的关键器件微机械光开关引起企业兴趣。在解决了可动微镜的理论分析与基础技术问题后, 提出了一种新颖的可动微镜与光纤对准机构于一体的微机械光开关, 在电压控制下可实现微镜 $30\mu\text{m}$ 的位移和光路的切换, 可方便地实现 $N \times N$ 微机械光开关阵列, 引起华为、飞通和 Oplink 等国内外通信公司的兴趣, 为共同研究打下了基础。

(2) 医用微流体器件已有需求意向。微推进系统中的多数器件为微流体器件, 在医疗方面有重要

^{*} 收稿日期: 2001 年 10 月 10 日

应用。项目组研制出了微型喷药器、流体缓释系统样机和医用微小型自吸泵,已有企业对微小型自吸泵提出了批量需求意向。

(3) 相关微米尺度理论研究有所创新。提出了一种稀薄空气阻尼的新模型,该模型利用能量法代替传统的 Christian 模型的动量法计算系统的 Q 值,同时考虑了振动体的几何尺寸和邻近电极对空气阻尼的影响,比传统的 Christian 模型更合理。利用新模型,可更准确地描述微米尺度机械运动时的动力学特性,为微米尺度机械的设计提供理论依据。

对国际上薄单晶硅力学特性参数少的情况做了重点研究,获得杨氏模量、切变模量和破坏强度等力学特性参数,为微米尺度机械的设计和制作提供了实验依据。在材料的力学特性尺度效应方面,以 LPCVD 多晶硅薄膜为对象,在纳米压痕实验中发现了“multi pop in”现象(“pop in”现象曾被认为是对于位错的形核和发射),得到了硬度的尺度效应和应变率效应,提出了“应变率梯度理论”框架。

对于微米尺度的光学元件来说,通常的标量算法难以保证设计精度,而矢量算法计算复杂。为此,我们采用标量算法设计,矢量算法验证的方法,为设计和制作微透镜列阵提供了十分有用的参考依据;采用数值方法研究了无光束整形的微透镜光学性能,为解决光阑的加工困难,设计任意弯曲界面的光件元件提供了一条十分有用的途径。

对于 RF-MEMS 器件来说,现有计算方法存在计算量较大或精度不足等问题。我们将电磁场理论和电路分析理论相结合,提出了新的部分等效元快速算法,并建立了一批 RF-MEMS 器件(开关、电感和滤波器等)的参数模型,为深入研究 RF-MEMS 器件打下了坚实的基础。

通过微尺度下的传热研究,对热驱动式数字微推进器进行了分析,认为“非定常热传导”非线性效应将成为热驱动式数字微推进器微型化过程中的主要限制因素,指出了 CIT 等提出的超高密度阵列热驱动式数字微型推进器从理论上是不可实现的,首次给出了热驱动式数字微型推进器的理论极限。

(4) 三维加工技术和设计软件研究有特色。高深宽比硅台阶结构形成技术。提出了复合掩膜和

单一材料台阶掩膜两种掩膜方案,并成功地实现了三层高深宽比硅台阶的刻蚀,该技术的研究成功使硅微加工技术不仅能够在二维平面内做出变化结构,在三维也能够实现可控的折线加工。

RIE lag 效应是限制硅深刻蚀线宽的主要原因,通过对硅深刻蚀中 RIE lag 效应形成机理的研究,成功地使 lag 效应从大于 23% (刻蚀 $50\mu\text{m}$ 深时宽度分别为 $5\mu\text{m}$ 和 $50\mu\text{m}$ 硅槽的深度差) 减小到小于 4%,达到国际先进水平。

(5) 关键器件、子系统研究具有自主知识产权。除上述微机械光开关和医用微流体器件外,还对其它关键器件及子系统进行了探索,并有自己的知识产权。

目前国内外大部分微机械振动陀螺需在真空中工作,给器件封装带来了困难。针对这一问题,利用微尺度阻尼及动力学研究的成果,研制出一种可在大气下工作的新型微机械陀螺——栅型结构电容式微机械陀螺,并具有较高灵敏度。

针对目前光波导不能大角度拐弯问题,采用 MEMS 技术在光波导上制作微反射镜,实现了光波导直角拐弯,为解决光波导大角度拐弯提供了一条有效的技术途径。利用这一思想,提出了新型直角紧缩型 AWG,并实现了分光功能。

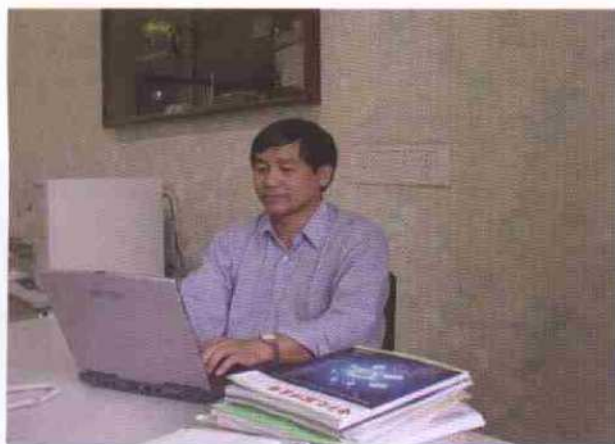
RF-MEMS 开关存在开关速度、工作电压和隔离度的矛盾,以往常采用牺牲隔离度来提高速度,或者牺牲速度来提高隔离度。我们采用极高介电常数(500—1 000)的 PZT 薄膜,成功地解决了这一困难。为提高微推进器的效率,提出利用牺牲层工艺,将电阻电热式微推进器的加热电阻做在悬浮结构上,隔绝了通过衬底的热传导所造成的热损耗。研制出的简易型电阻电热式微推进器的推力达 $25\mu\text{N}$,冲量达 $0.2 \times 10^{-6} \text{Ns}$ 、芯片尺寸为 $7 \times 7 \times 1\text{mm}^3$,达到国际水平。

经过近两年的努力,项目在基础理论、基础技术及关键器件和子系统等均取得了重大进展。截至 2001 年 6 月,项目组授权和受理申请专利 30 项,为项目成果的转化和促进我国微系统的产业化提供了知识产权保障。

(相关图片请见彩插三)

国家重点基础研究发展规划项目

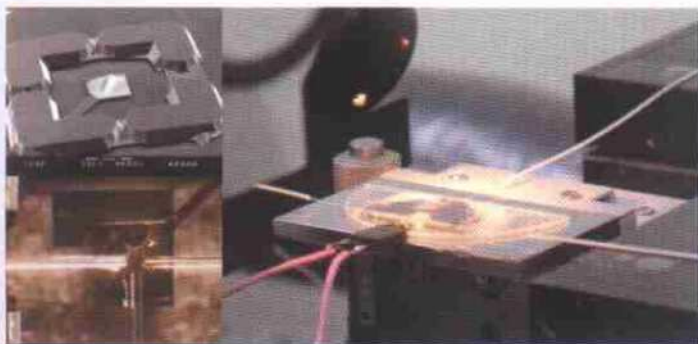
集成微光机电系统研究



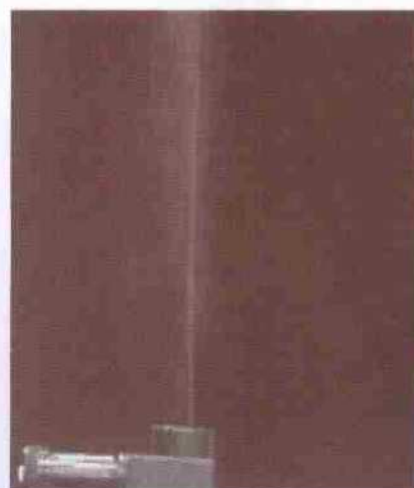
首席科学家王跃林



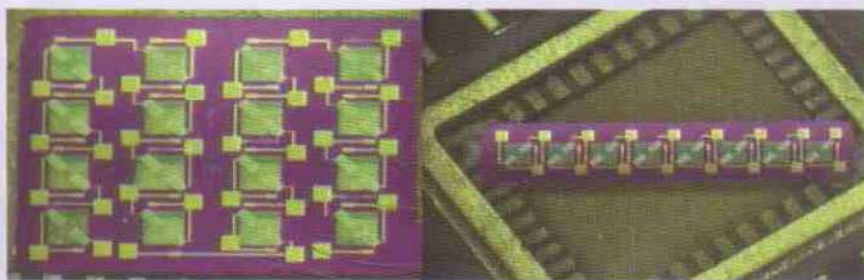
AWG 关键结构



微机械光开关



阵列微喷工作状态



微机械红外敏感器



复杂三维微硅结构刻蚀

(详细内容请见本期 446 页)