

# 微光学机电系统的发展和应用

傅丹鹰 殷纯永

(清华大学精密仪器与机械学系精密测量技术及仪器国家重点实验室 北京 100084)

乌崇德

(北京空间机电研究所 北京 100076)

**摘要** 论述了微光学机电系统(MOEMS)的研究状况和已研制的系统的结构工艺与工作原理,对其发展和应用前景进行讨论。

**关键词** 微光学机电系统 微机械

## 1 引言

近年来 MEMS 技术高速发展,多种 MEMS 装置相继涌现,并已在光信息处理、生物医学、机器人、汽车、航空航天、消费电器等广阔领域得到应用。年销售额已超过十亿美元,并且预计在四至五年内达到一百亿美元。造成这一飞速增长的原因:MEMS 这一成长中的技术使研究人员和工程师可以建立不久以前依然不可实现或无法承受的微系统。MEMS 打破了宏观空间尺度这一固有思想框架,提供了解决问题的新途径,促进了思维发展变革。MEMS 将是复杂高技术系统未来进行发展的必须选择和需要。

MEMS 不仅在尺寸上,而且在人们制造机电系统的方式上也是一次革命。MEMS 是微米级的器件,由离散的单元或大规模阵列组成,用以在某一方式下对环境探测或与之相互作用,因此,通常可分为传感器和致动器两大类。MEMS 大量借用了 IC 制造技术,主要受益于三方面即微小化、大规模数量和微电子学。由于 MEMS 是采用 IC 技术制造的,因而很适于与微电子电路集成。

对于国际上 MEMS 研究的状况、发展趋势和在一些领域的应用,国内外已有多篇文献作了综述。本文论述 MEMS 中的微光学机电系统(MOEMS,或称 MOMS)这一分支发展现状,对其应用前景进行讨论。

## 2 微光学机电系统

顾名思义,微光学机电系统就是用于光学领域或采用光学原理进行工作的微电子机械系

统。MEMS 日益成为新的光学工具, 已经对许多基于光学的仪器显示出应用前景, 包括数字投影显示、微测辐射仪、自适应光学扫描仪、光学开关和光栅等。其中美国 TI 公司的著名的数字微镜器件(DMD) 在微小化、微单元大规模集成和与微电子学一体集成性等方面都集中了 MEMS 技术的固有优势, 已成功地 在投影显示等领域进入市场, 在某种意义上或从某一角度上说标志着 MEMS 技术的现今水平。

## 2.1 器件分类与基本工作原理

现有 MOEMS 器件大都是反射型的空间光调制器(SLM), 也有集成光学衍射器件。大多数器件采用静电力驱动产生变形的工作原理, 少数器件采用光寻址的驱动方式, 还有一些器件由电流通过产生热致变形的致动器驱动。

反射式可变形 SLM 可分为弹性体、变形单元、薄膜反射镜(图 1)。由于弹性体单元如 Ru-ticon 器件需要高寻址电压或偏压(100–200V), 且敏感度差, 故不适于与高密度硅基寻址电路集成。传统变形单元类器件通过微镜元的刚体运动对光进行调制, 主要有悬梁元(Cantilever Beam Pixel)、扭臂梁元(Torsion Beam Pixel)、弯扭组合柔性挠曲梁元(Flexure Pixel, 简称挠曲梁元)三种构造(图 2)。近年又发展出基于微铰链技术的 3D 结构(2(d)), 这类器件通常需要微装配设备进行制作后处理。

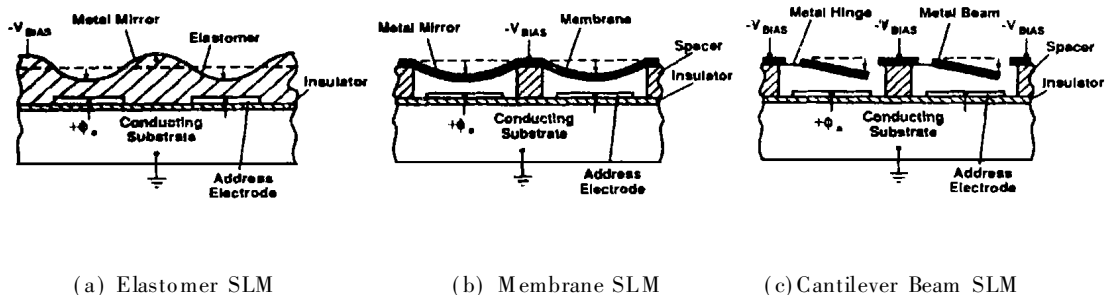


Fig. 1 Deformable-mirror SLMs

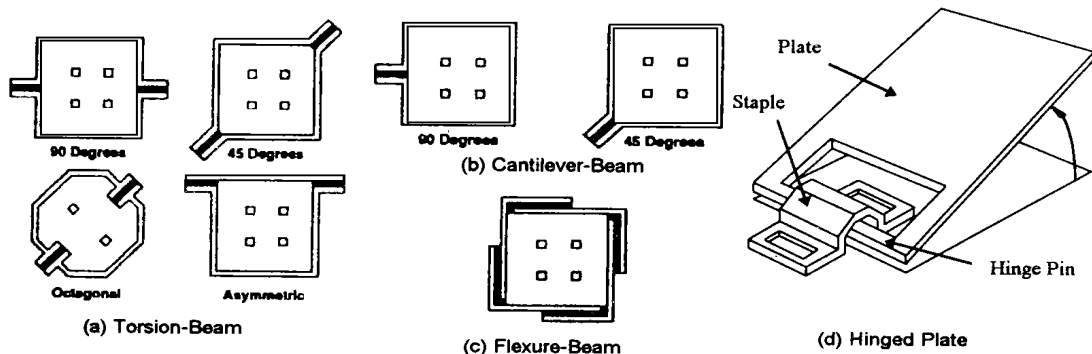


Fig. 2 Pixel architectures

## 2.2 工艺与结构

现有各种 MOEMS 采用的加工工艺有标准 IC 工艺, LIGA 工艺, 离子蚀刻 (RIE) 等。从截面加工深度可分为体硅微加工 (Bulk micromachining) 和表面微硅加工 (Surface micromachining) 两大类, 后者比前者工艺过程复杂, 难度大。前者象雕刻一样常常蚀去硅晶块的大部分而以剩余硅晶体成为最终结构, 其最常用蚀刻剂为 KOH 的乙烯—双胺—邻苯二酚 (EDP), 其中采用 KOH 时由于离子污染会破坏绝缘, 因而不能用于与电子电路集成的工艺。后者在硅晶片上用多种标准 IC 制造工艺沉积膜层, 然后用蚀刻剂蚀去多余部分和牺牲层以形成各种结构, 其蚀刻剂有氢氟酸 (HF) 等, 结构材料为多晶硅, 弹性元件、触点、电极为金属, 绝缘物或牺牲层为磷硅玻璃 (PSG) 或  $\text{SiO}_2$ 。通过采用这种混合工艺, 同时在 MEMS 器件功能设计与制造工艺能力两者间进行妥善权衡, 许多新结构器件打开了通向应用的大门, 并证明了 MEMS 不采用特殊工艺所带来的固有优势。

### MUMPS 工艺:

由于 MEMS 技术的制造工艺必须在大量投资建立的专门设备下进行, 且制作过程的费用昂贵 (一个简单的 MEMS 原型通常高于 \$ 75,000), 许多好的构思不能制成原型, 难以进入市场。

MUMPs 是通过大批量从而降低 MEMS 费效比, 和使各种用户都能实现其独立构思以研制 MEMS 的一种表面微加工工艺。1992 年, 美国国防高级研究计划局 (DARPA) 与北卡罗来纳微电子研究中心 (MCNC) 达成共识, 为使 MEMS 变成广泛的技术增长点, 必须克服上述障碍。双方制定计划决定在 MCNC 向美国全社会提供低成本、概念验证型 MEMS 的制造服务。这一计划称为多用户 MEMS 工艺 (Multi-User MEMS Processes), 简称 MUMPs。1992 年 12 月开始运行, 目的是向研究者提供第一个此类多用户制造服务, 而费用只是整个模型阶段过程的几分之一。目前 MUMPs 每年提供 6 次流程服务, 面向全北美 (美加) 的任何人。MUMPs 是 MCNC 的 MEMS 基础计划, 目标是使大量和多种用户的 MEMS 可行化且费用合理化, 并帮助工艺和政府部门将 MEMS 技术从研究转化成商品。一些单位研制的 MEMS (包括现有的许多 MOEMS) 都是采用 MUMPs 工艺完成的。

对应于一个标称费用, MUMPs 的参加者可以得到  $1\text{cm}^2$  面积以完成其自己的设计方案, 除了设计规范外没有限制。如果参加者没有 CAD 技术手段, MCNC 提供方案出图支持。整个工艺过程需要约十周时间, 届时用户会得到约十五个含有其微器件的芯片。

MUMPs 的制作工艺是一种三层多晶硅表面微加工工艺, 这一工艺是从加州大学伯克利传感器与致动器研究中心的研究成果中发展出来的。提高 MUMPs 环境的工艺灵活性, 进行了几个方面的改进。MUMPs 工艺包括七个膜层 (一个低应力氮化硅隔离层, 两个氧化物牺牲层, 三个多晶硅层和一个金属层) 和八个辐射光刻层级以排布各层。图 3 显示一个 MUMPs 器件的截面, 在此为一个微型电机, 其氧化物牺牲层已经由氢氟酸浸蚀掉。

MEMS 技术的关键要素之一是其与微电子电路

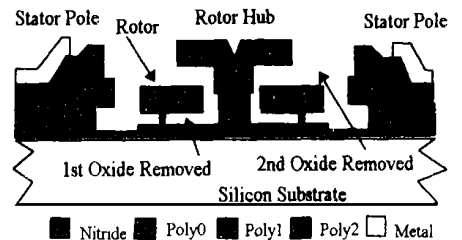


Fig. 3 Three-layer polysilicon MUMPs process after sacrificial oxide removal

的集成性。现有方法有混合杂交与单片整体式或埋置法。MCNC 发展出第三种方法,采用的是倒装片 (flip-chip) 技术,该方法综合了前两种方法的优点,依靠快速发展的多芯片组件和先进的管壳封装技术,以保证 MEMS 与 IC 部件的集成。

### 3 现有几种典型 MOEMS 系统

#### 3.1 微光学衍射平台

图 4 所示为加州大学洛杉矶分校(UCLA)的 M. Wu 研制的微光学衍射平台,由竖起式微光学衍射器件(右侧)和混合集成的半导体边缘发射激光器组成,采用 MUMPs 工艺制造,是一种微型集成光学信息处理系统。其中的衍射器件实际上是一个微型菲涅耳透镜,因为器件与激光器都由翘起式定位板定位(精度  $1\mu\text{m}$ ),因此系统自准直。

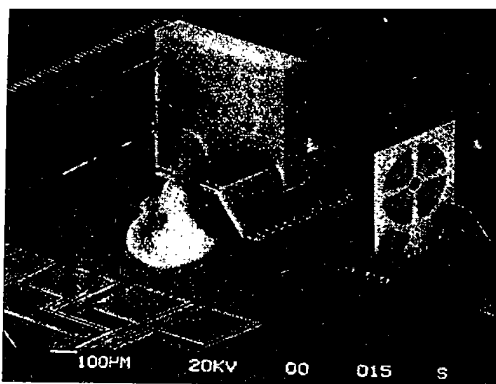


Fig. 4 Pop-up micro-optical bench with hybrid-integrated semiconductor edge-emitting laser

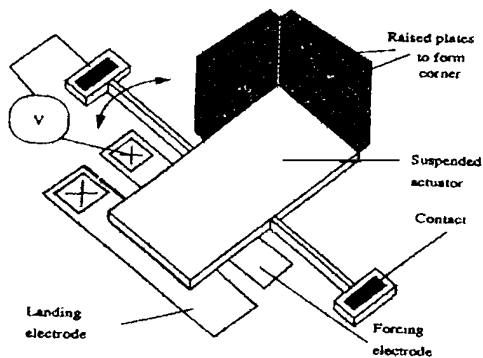


Fig. 5 Schematic diagram of the top view of the corner cube reflector

#### 3.2 角锥反射器(CCR)

图 5 为 UCLA 的 D. Gunawan 等人利用 MUMPs 工艺研制的角锥反射镜器件(Corner cube reflector),反射镜尺寸约  $100 \sim 200\mu\text{m}$ ,结构材料为多晶硅板,材料反射率 24%,结构反射率  $> 1\%$ ,镜面垂直正交误差  $< 8\text{mrad}$ ,用低电压 ( $< 8\text{V}$ ) 静电力驱动,平置基板(翘翘板式悬置),可产生最大约 1.6 的转角,就此对反射光进行反射式调制,以传输数字信号(微结构基频  $302\text{kHz}$ )。图 6 为通讯原理图,探测器与光源同轴或同平台,器件可置于通讯对象上。

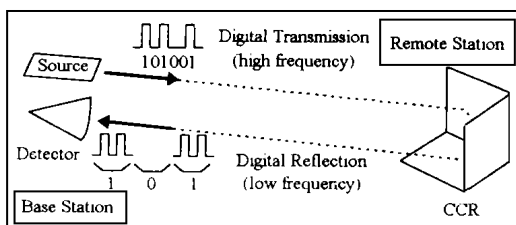


Fig. 6 Scheme of communication

### 3.3 双模态柔性器件

图 7 为 UCLA 的 E. Kruglick 等人研制的双模态柔性器件 (Bimodal compliant flip mirror) 的第一代器件的单元。铰接竖起组装盒式结构, 上表面窗形部分为可动反射器, 必须经过后处理 (翻转、搭接) 方可工作。其第二代器件已制成与 CMOS 集成阵列, 且经简单后处理即可工作。图 8 为工作原理, 先用 20V 使其超过弹性极限, 成为图 8b 形状, 工作电压 4~8V。采用  $\text{XeF}_2$  气相蚀刻。

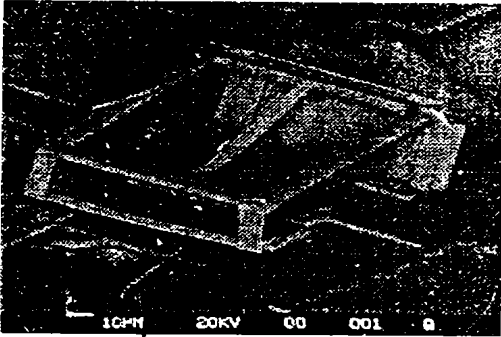


Fig. 7 Box structure after assembly

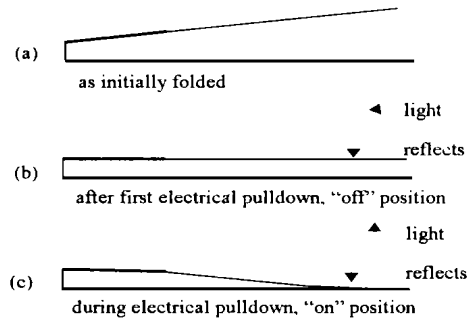


Fig. 8 Operation of the flip-mirror

在低频率下工作时其 on/off 周期人眼可辨, 高频率下工作便产生灰度。表面镀铝膜, 反射率达 70%。此项目是由美战略导弹防御局、NASA、NSF、ARPA 联合资助的, 具有强烈的军用背景, 明显用于目标光信息处理。突出优点是自准直、高频响 ( $\sim 10\text{kHz}$ ) 和低能耗, 此时能耗与频率、电容、及电压的平方成正比。

### 3.4 热致动反射镜

美空军技术学院 (AFIT) 的 J. Comtios 和 V. Bright 等人曾在两年内 (1993 - 1995) 用 MUMPs 工艺完成了 25 批次 200 多种器件的概念性和单元性试验结构, 为建立微型系统进行了元件级基础研究准备。图 9 为 V. Bright 等人用 MUMPs 工艺最新研制的热致动反射器件, 左为竖起式热步进电机驱动的反光镜, 右为热致动 CCR 阵列。

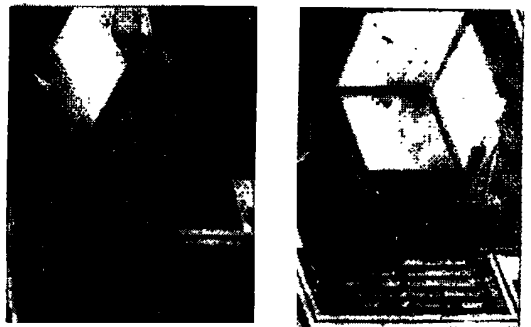


Fig. 9 Pop-up mirror on thermally actuated stepper motor and CCR with thermal actuator array to position and modulate hinged plate mirror

### 3.5 集成微反射镜阵列器件

可变形反射镜可用来对光进行空间调制和对有象差的光学波前进行修正。国外十多年来研制了近 20 种集成反射镜阵列器件, 研制单位有美国 Texas Instruments (TI) 公司、Boston

大学、AFIT、JPL、海军研究实验室、荷兰 Delft 工业大学、汉城国立大学/三星公司等, 研制目

的有: 光学信息处理、投影显示、非相干光-相干光图像转换、自适应光学与主动光学元件、光学相关处理、未来灵巧集成装置、图像处理与光学同步探测、人工神经网络与模式识别、频谱分析、地空制导、相干分析与相干光整形、集成光纤、开关系统、印刷、光纤通讯等。已有文献对它们进行了综述, 对其特点和性能进行详细评述与比较分析。

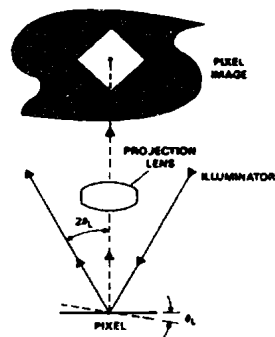
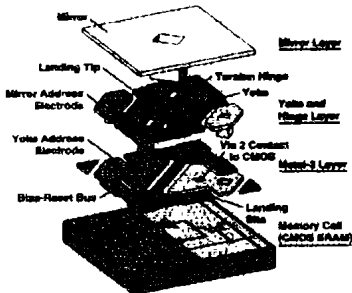
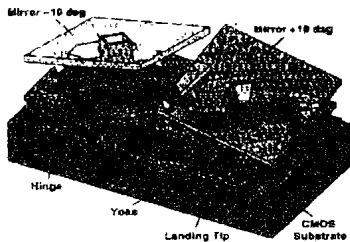


Fig. 10 Two DMD pixels(mirrors are shown transparent) and the exploded view of a DMD

Fig. 11 Bistable DMD dark field projection system

最有代表性的可变形反射镜是 TI 近期研制的扭臂梁元 HHDMD 器件(结构如图 10), 通过铰链技术已达到很高的有效反射面积比即填充因子。最有吸引力的是已经实现数字信号控制, 且驱动电压为标准 CMOS 电路的 5V(偏压 16V), 具体方法是采用脉宽调制(PWM)技术控制微镜在某一转角的停留时间, 图 11 所示为采用 HHDMD 的暗场投影显示系统原理。DMD 思想的核心实质是在空间域和时间域上同时对视场光束进行数字化离散和调制, 调制的像经接收器件(人眼)的积分达到预期效果。采用该器件的投影仪已由十余家与 TI 有约的公司生产上市, 近来国内已有 DMD 投影仪市售, 称为数码光输投影机。

广义上的 MOEMS 或用于光学的 MEMS 还应包括蚀刻光纤传感器、光波导、光栅、各种二元光学器件、纳米测量探针等等, 本文不对其进行论述。

## 4 MOEMS 应用前景与展望

与其它新发展的领域一样, 微型光学器件潜在的应用是非常广阔的。但必须强调的应用概念是: 微型机械系统对现有系统通常起到补充和加强的作用, 而非取而代之。在现有系统力所不能及的领域起到填补空白和开拓应用的作用。

在 MOEMS 器件上建立的微光学设备将可以完成由普通光学设备完成的各种基本光学功能(折射、反射、衍射、散射、偏转), 有可能减小许多光学系统的成本、尺寸和重量, 特别是在一些特殊环境条件下使用的光学仪器, 如航空航天、核生化、机器人、汽车、生物医学等领域。

微型光学技术近期内在商业上的应用例子将包括: 双焦双目透镜, 光纤通信用的二元光学透镜, 光栅和滤光片, 远紫外系统, 小型折叠式照相机中的观景镜, 平板三维显示器, CD 和 VCR 中的微型光学头, 低成本的医学内窥镜, 数据存储器等。

在某些领域的应用前景有:

### 1、用于军用光电侦察装备

军用光电侦察装备要求重量轻, 作用距离远, 探测与分辨能力强, 全天候性能好, 功耗低, 抗干扰性能好, 环境适应性和生存能力强, 价格合理等, 采用 MOEMS 系统可以同时满足多项要求。

### 2、使采用大型光学孔径的航天器实现小型化

用分立式或阵列式微型透镜可制成折射微光学器件; 利用二元光学技术可制成非球面衍射器件, 利用折射-衍射混合系统改进系统性能, 提高分辨力和带宽, 减小对热感应像差的灵敏度; 用 MOEMS 技术制造子孔径阵列的波前传感器(埋入于光学元件中)和微可变形反射镜阵列器件, 建立星载相机的自适应光学系统, 校正由视轴抖动、重力场改变与温度场变化甚至大气扰动造成的像差与相位畸变。

### 2、光通信与光学信息处理

制造衍射与折射微型光学阵列, 可以把单一激光束分裂成许多部分, 可用于光互连计算、自主式航天交会。同样地这种阵列也可把激光二极管阵列产生的许多光束组合成单一光束对固体激光器进行泵浦, 这样就可用于激光通信、激光测距与激光雷达, 还可用于光束控制。

利用激光学技术制造无足细胞学传感器, 可以提高模式识别能力。MIT 林肯实验室正在研制的这种传感器将可执行类似于哺乳动物眼睛视网膜的无足细胞层所执行的功能, 处理视觉数据, 迅速在大量信息中探测出运动的轮廓位置信息, 有选择性地送到计算机处理, 这将大大提高模式识别能力和速度, 可用于制导、恒星传感器、卫星自主交会和预警监视系统。

由于把新技术用于航天系统一般要比技术开展落后 10 ~ 15 年, 因此预计在下世纪的头十年中将会有航天技术中普遍出现 MOEMS 的应用。文献[4]对目前提出的建议是:

开展技术跟踪;

着手系统集成;

从事突破性的内部研究与发展工作。

## 5 结 束 语

综合集成在工程技术最终转化为现实生产力过程中发挥着关键作用。小型化、集成化、模块化和多用途化是许多技术领域的重要发展方向。发展 MOEMS 的应用的关键是立足本国国情, 坚持走自己的发展道路。具体要突出重点, 强调简单实用, 设计指标针对性强并拥有技术上的强项。研制思想应是力求在技术上追踪和为今后发展建立好基础。

### 参 考 文 献

- 1 王立鼎, 崔天宏, 吕琼莹. 微型机械研究的现状及展望. 科技导报, 1993, 12: 42 ~ 45
- 2 干东英, 王立鼎. 微型机械的现状与发展. 机械工程学报, 1994, 30(2): 1 ~ 8
- 3 李路明, 王立鼎. MEMS 研究新进展——微型系统及其发展应用的研究. 光学精密工程, 1997, 5(1): 67 ~ 73
- 4 李德孚编. 微米/纳米技术在航天系统中的应用, 国防科技信息中心, 1994

- 5 Koester D, Hoch J. Enabling nature of MEMS technology gives optics new tools. OE Report, 1997, N164: 1
- 6 Pottenger M, et al. MEMS: The maturing of new technology. Solid State Technology, Sep 1997: 89 ~ 96
- 7 Kruglick E, et al. Three-dimensional structures for micro-optical mechanical systems in standard CMOS. Proc SPIE, 2642: 33 ~ 39
- 8 Gunawan D, et al. Micromachined corner cube reflectors as a communication link. Sensors and Actuators A, 1995, 45- 47: 580 ~ 583
- 9 Pister K. Microfabricated hinges. Sensors and Actuators A, 1992, 33: 249 ~ 256
- 10 Comtois J, et al. Thermal microactuators for surface-micromachining process. Proc SPIE, 2642: 10 ~ 21
- 11 Hornbeck L. Deformable-mirror spatial light modulators. Proc SPIE, 1989, 1150: 86 ~ 102
- 12 Hornbeck L. Digital Light Processing<sup>TM</sup> and MEMS: Reflecting the digital display needs of the networked society. Proc SPIE/ EOS, 1996
- 13 李育林, 傅晓理. 空间光调制器及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1996

## The Development and Applications of Micro Opto Electro Mechanical Systems

FU Dan-Ying, YIN Chun-Yong

(*Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084*)

WU Chong-De

(*Beijing Institute of Space Machine and Electricity, Beijing 100076*)

### Abstract

This paper summarizes the current research state of MOEMS. The sorts, structures, operational principles and fabrication processes are described. The future application and development are discussed and analysed.

**Key words:** Micro opto-electro-mechanical systems(MOEMS), Micromechanics

傅丹鹰 男, 1965年4月生, 高级工程师。1986年毕业于北京航空学院飞行器设计与应用力学系本科, 1989年毕业于北京空间机电研究所(工硕), 现在清华大学精密仪器与机械学系博士生。从事空间飞行器工程设计工作。