

综述与评论

微光电子机械系统技术及其应用

李红光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要: 概述微光电子机械系统(MOEMS)技术发展历史,分析其现状。以美国陆军研究开发和工程指挥部的“战略研究规划”中的7个研究领域为例,分析MOEMS技术应用潜力和未来发展趋势。提出现在MOEMS工程遇到的技术挑战:MOEMS加工工艺,达到全反射的光学表面的加工工艺,可与电子线路和MOEMS集成兼容的CMOS半导体材料,MOEMS器件的组装。

关键词: 微光电子机械系统; 微电子机械系统; 微系统; 微结构; 小型系统

中图分类号: TN256; TN252; TN491 文献标识码: A 文章编号: 1000-9787(2011)11-0001-03

Micro-opto-electro-mechanical systems technologies and applications

LI Hong-guang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: History and current status of advanced MOEMS technologies is presented. Potential applications and future trends on MOEMS are analyzed based on the strategic research projects in “Strategic Research Program” made by US Army Research Development and Engineering Command. Current challenges on processing of MOEMS chip, processing of optical surface of micromirrors for high resolution imaging, developing a CMOS processing to be able to integrate the electronic circuit with the MOEMS chip, bulk micromachining process and packaging of MOEMS devices are given.

Key words: micro-opto-electro-mechanical system(MOEMS); MEMS; microsystems; microstructures; miniature system

0 引言

微光电子机械系统(MOEMS)是大规模集成电路制造技术深入发展的产物。国际光学和光子学会(society of photo-optical instrumentation engineers, SPIE)在1997~2009年之间举办有关MEMS, MOEMS专题学术会议128次,现已出版有关会议论文集和专著638本。2002年,创刊Journal of Micro/Nano Lithography, MEMS and MOEMS。2007年,创刊了Journal of Nanophotonics。由此可见, MEMS和MOEMS领域的研究和开发十分活跃^[1]。

MOEMS技术与快速发展的计算机技术相结合带来一场信息革命。然而,20世纪90年代末,MOEMS发展速度放慢。投资者寻求MOEMS新的应用领域,同时也会伴随着新的技术挑战。

1 MOEMS技术发展历史

40多年前,随着电子集成电路技术的发展,同时也开

创了表面微机械加工技术研究与开发领域。美国西屋实验室(Westinghouse Research Lab)最早采用光刻和薄膜技术研制成功共振悬臂梁与电子传感器集成在硅片上的振荡器。

1993年,美国加州Revoltech Microsystem(RM)公司的Motamedi博士首次提出微光电子机械系统的英文全称和缩写,即(micro-opto-electro-mechanical systems, MOEMS),同时给出微光学、微电子学和微机械学之间的关系,见图1。

最初的MOEMS是用于自适应光学(adaptive optics, AO)系统的激光扫描器和动态微反射镜。早在20世纪80年代初期,美国Texas Instrument(TI) Inc.公司已经研制了微反射镜器件。这些微反射器成为数字化微反射镜器件(digital micromirror device, DMD)的基础。20世纪90年代DMD首先投入市场。

20世纪90年代末,MOEMS应用研究发展很快。潜在的应用包括宽带宽光通信、远距离通信、数据通信、数据传

收稿日期:2011-09-07

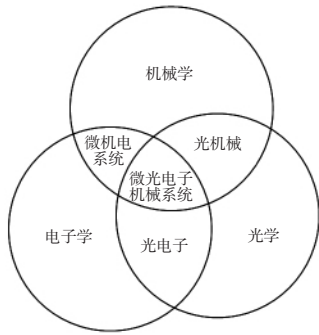


图1 微光电子机械技术之间的关系

Fig 1 MOEMS-interactions of micro-optics and micromechanics with electronic integrated circuits

输和处理、传感器、显示系统、扫描系统和成像系统等^[2,3]。

由于通信网络不断增加,光互连开关阵列 1000×1000 ,控制数据速度达 $10 \sim 40 \text{ GB/s}$,这是下一代网络要求的中等开关速度。在此期间,研究工作的重点是系统的可重复性、可靠性、坚固耐用性。这种系统通常要求硅基微反射镜能承受 45×10^9 开关工作周期,实现 0.1° 光偏折角的重复性。光源、探测器、滤光片和其他组件都需要可调选择波长元件,这些元件用 III-V 族元素半导体技术制造,包括波长选择探测器和磷化铟半导体基法布里-珀罗标准具等。

另外,在可大量生产的微型光谱仪中,用的可调标准具很重要。在环境分析中,探测 CO 的精度可达百万分之几水平。环境分析用 2 种小型傅里叶变换光谱仪,其一,是采用普通小型技术的光谱仪。另一种是用硅基片微细加工制造的 MOEMS 小型光谱仪,见图 2。两种光谱仪的分辨率均为几纳米^[4,5]。

在微系统产品高度轻型化的先进技术方面,提出微系统高精度混合集成的可能性,并指出开发先进包装技术的重要性。继续解决普通硅基片问题以保持产品的高质量。微系统组装仍然是 20 世纪 90 年代末 MOEMS 生产的挑战性问题的。

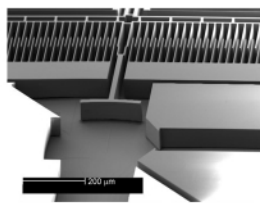


图2 傅里叶变换光谱仪 MOEMS 结构

Fig 2 MOEMS components for micro-Fourier transform spectrometer

2 现状——21 世纪最初十年技术发展和应用

2001 年,远距离通信工业泡沫破裂。投资者寻求 MO-EM 新的应用领域,力争保持公司的活力。研发人员则积极研究新材料,先进微加工工艺,设计结构新颖的微系统,推动新一代微系统工程快速发展。

2.1 MOEMS 应用和市场

由于互联网信息量越来越大,现有的网络信息量和传输速度将受到限制。现在已注意考虑开发新一代远距离通信用的 MOEMS 系统。远距离通信产品市场仍然是美国经济的重要组成部分,是推动光开关和微反射镜技术发展的动力。与互联网相关的放大器、控制器、分析器等系统也会随之而发展。未来开关和线路必须是全光的,即光信号输入,光信号输出。用微反射镜阵列、快门阵列、开关阵列以及用 MOEMS 组成的各种系统实现全光互联网络。除了互联网和远距离通信应用 MEMS/MOEMS 外,还有其他仪器和系统应用,诸如 MOEMS 传感器、微流体传感器、光存储器、显示器和自适应光学器件以及军用微导航系统、跟踪用的微传感器、侦察和环境监测、信息处理和控制在小型流体分析仪(包括气体和液体微流体分析仪)、推进器燃烧控制、武器系统、安全识别系统等^[6-8]。

美国 TI 公司是生产 MOEMS 产品的最大公司,据 2007 年 6 月报道,仅此领域产品年收入接近 10 亿美元。Hewlett Packard 公司年收入约 5 亿美元。Robert Bosch 公司年收入约 3.74 亿美元。显而易见,此领域应用和市场前景广阔。

TI 和其他大公司,仅 2010 年 MEMS/MOEMS 销售额达 30 亿美元,投影和显示领域占其总量的 50%。TI 公司仅前投影和背投影电视的市场超过 18 亿美元^[9]。

在此领域从事研究的顶尖大学和研究机构有:麻省理工学院(Univ. of Cal. Berkeley, Boston Univ., Stanford Univ., MIT) 和德国的 Fraunhofer Institute。此外还有:Univ. of Cal. Santa Barbara, Univ. of Michigan, Univ. of Delaware, Univ. of Wisconsin, Montana State Univ 以及日本的 Univ. of Tokyo 等。

2.2 制造技术

MEMS 和 MOEMS 是大规模集成电路制造技术的产物。借用集成电路生产技术派生出微加工技术、微制造技术和微系统技术。MEMS 和 MOEMS 展现一个先进的“芯片制造世界”。

现在 MEMS 和 MOEMS 用的主要材料有硅、氧化硅、碳化硅、单晶硅、多晶硅、玻璃、各种金属半导体材料,各种金属材料、合金材料、陶瓷、聚合物等。总之,要根据应用选择适合材料^[10,11]。

根据设计的结构和复杂程度,微系统可加工成一维、二维和三维结构。加工技术包括深反应离子刻蚀(DRIE)、电子束刻蚀(EBL)、X 射线深刻蚀及纳米压印刻蚀(nanoimprinting lithography)和光刻电铸成型(LIGA)等技术,还有镀膜和组装技术。总之,微制造技术、微光刻技术、微系统组装技术都非常复杂,由于涉及的技术领域多,本文不加赘述。

3 未来的 MEMS 和 MOEMS 技术和应用

下一代宽带宽、高速信息传输和处理的全光学网络,特别希望研究和开发新一代的 WDM、DWDM 和 HDWDM 组件。虽然已经有某些公司投资 MOEMS 产品的研究和开发,由于研究和开发 MOEMS 的公司不断努力,估计到 2012 年就初步可生产新一代远距离通信用的 MOEMS 组件。据分析在未来 7~8 年时间,下一代 MOEMS 组件性能将达到挑战级水平。VOA 衰减可达到 0.1 dB,串扰性好于 75 dBm,开关速度达到 ms 级^[12]。

光学可调滤光片(OTF)组件极需像 DWDM 和 HDWDM 组件那样投入市场。除了在远距通信 20 世纪 20 年

代达到宽带宽、高速信息传输和处理全光网络水平,实现通信技术的彻底革命外,它将广泛用于航空和航天、武器系统、预警系统、捕获、跟踪和瞄准系统、国土安全、生物/医学和民用。本文仅列举 MOEMS 在未来美国陆军战略研究领域涉及的项目,见表 1。

从美国陆军战略研究 7 个主要领域的研究项目可以看出其总的目标是军事装备小型和轻型化,坚固耐用,灵活灵巧自动化,快速反应智能化,能耗超低下。这些目标的实现,只有采用 MOEMS 和 MEMS 技术不仅能实现上述目标,而且还大大降低成本。在未来军事应用领域可能展现一个“芯片时代”^[13]。

表 1 美国陆军战略研究领域和项目

Tab 1 Research projects on strategic research program of US army R&D and engineering command

研究领域	研究项目	目的和具体研究内容
电源和能量	<ul style="list-style-type: none"> • 微系统和传感器 • 战士装备和军用品 • 未来的各种平台 	采用微系统和传感器,减轻战士负荷和后勤重量,延续执行任务用的装备,满足支持先进设备的电源要求。
材料	<ul style="list-style-type: none"> • 多种材料(multi-scale) • 多功能材料 • 纳米/生物材料 	研究先进的材料,包括计算机材料科学,多种材料科学和多种功能研究,仿生材料、敏感材料和机械材料,提高材料处理能力和特有技术现代化程度。
神经科学	<ul style="list-style-type: none"> • 识别能力 • 神经识别测试 • 智能机器人系统 	先进的成像技术,识别信息的基础知识,先进的认知分类算法,先进的操作神经认知测量,MEMS/MOEMS 和纳米神经传感,智能机器人系统设计,神经自适应系统。
网络科学	<ul style="list-style-type: none"> • 识别系统 • 信息系统 • 通信系统 	高性能计算机、高保真度建模和模拟、信息收集和保险度研究,活动的 Ad Hoc 战场指令网络、交叉训练网络、各种战场传感网络、无人系统网络全球跟踪目标。
未来的电子系统	<ul style="list-style-type: none"> • 灵巧的电子系统 • 宏观电子系统与 MEMS/MOEMS 集成 • 纳米电子系统 • 量子 and 分子电子系统 	灵巧的电子系统坚固轻型、大型阵列、高保真度显示;小型传感器和电源,先进的传感和执行元件组成的 MEMS/MOEMS 与宏观电路集成;纳米电子系统要求的超低功率高频传感和快速通信技术;量子 and 分子电子系统要求用化学和生物技术对恐怖物质识别,研究高速计算密码术。
自动化系统技术	<ul style="list-style-type: none"> • 自动战术导航系统 • 移动灵巧的操作系统 • 高级(scalable)的自动化系统 	在战场上,战士使用便携式导航系统;自动灵活地操作观察和武器系统;采用先进的机器人技术作为战场上支撑机动力量;用微自动化系统技术制造一种全新的士兵用的装备。
先进的计算机,计算技术	<ul style="list-style-type: none"> • 商用计算机算法 • 高级算法 • 量子计算技术 	分级算法、海量并行计算技术、 10^{12} flops/s 运算速度的计算机、商用计算机算法、多芯片计算机;量子计算技术、独特的小型计算机算法、 10^{15} flops/s 级运算速度的计算机等。

4 结束语

MOEMS 工程遇到如下几方面的技术挑战:其一,微反射的光学表面要求超高水平度,反射镜表面接近全反射,用这种反射镜可获得高分辨率成像;其二,研究和开发互补型金属氧化物半导体(CMOS),能使电子线路与 MOEMS 集成的可兼容加工技术;其三,开发增加晶片尺寸的工艺,整体微机械加工最好,避免机械组件在组装中表面产生失配问题,在加工工艺上是一个特别严格的挑战。其四,具有窗口的 MOEMS 芯片需要新的封装设计思想,要求设计方案低成本和高效。

参考文献:

[1] SPIE digital library. [DB/OL]. [1990-2010]. <http://spiedigitallibrary.org>.

[2] Sanku H O, Motamedi M E. Microoptic development in the past decade [C]// Proc of SPIE 2000.

[3] Motamedi M E. MOEMS: History current status and future trend—An interview. [DB/OL]. SPIE digital library (SPIE Newroom) [2007-06-05]. <http://spie.org>.

[4] Tortschanaff A, Kende A, Kraft M, et al. Improved MOEMS-based ultra-rapid Fourier transform IR spectrometer [C]// Proc of SPIE on next generation spectroscopic technologies II 2009.

(下转第 7 页)

- 进展[J]. 半导体技术 2007, 32(3): 188 - 192.
- [7] Qiao Xueguang, Zhang Lei, Jia Zhenan. Research on FBG calibration demodulation system based on tunable fiber Fabry-Perot filter[J]. Transducer and Microsystem Technologies 2008, 27(1): 12 - 14.
- [8] 孟宪玮, 张青, 史彦新. 光纤布拉格光栅波长解调系统的研制[J]. 吉林大学学报 2009, 39(2): 342 - 346.
- [9] 王久玲, 烧云江, 朱涛. 截面折变非对称型长周期光栅高灵敏度应变特性[J]. 中国激光 2007, 34(3): 389 - 392.
- [10] 朱涛, 莫秋菊, 烧云江. 基于超长周期光纤光栅的高灵敏度扭曲传感器[J]. 物理学报 2006, 55(1): 249 - 253.
- [11] Liao Xian, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Simultaneous measurement of high-temperature and strain using a combined long-period fiber grating/ Fabry-Perot sensor fabricated by laser pulses [J]. Chinese Journal of Lasers 2008, 35(6): 884 - 887.
- [12] Li Yi, Sun Junqiang. A new method to analyze the shift of resonant wavelengths of long period fiber gratings [J]. Journal of Optoelectronics Laser 2004, 15(3): 378 - 380.
- [13] Allsop T, Earthrow T, Reeves R. The interrogation and multiplexing of long period grating curvature sensors using a Bragg grating based derivative spectroscopy technique [J]. Measurement Science and Technology 2004, 15(1): 44 - 48.
- [14] 陶珺, 穆磊, 杜平. 基于光电探测器阵列的光纤布拉格光栅传感系统解调方法[J]. 中国水运 2008, 8(4): 246 - 248.
- [15] Li Zhiquan, Li Yaping, Zhu Dandan. Demodulation scheme for filtering method based fiber Bragg grating sensing [J]. Journal of Applied Optics 2006, 27(4): 327 - 331.
- [16] 王宏亮, 张晶, 乔学光. 光纤光栅传感解调系统的研究进展[J]. 半导体技术 2007, 32(3): 188 - 192.
- [17] 张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京: 科学出版社 2009: 177 - 206.
- [18] 赵洪霞, 鲍吉龙, 丁志群, 等. 基于 F-P 扫描干涉仪的长周期光纤光栅解调系统研究[J]. 光电子技术 2008, 28(3): 174 - 176.
- [19] 李景义, 烧云江, 牛昌永, 等. 基于新型长周期光纤光栅的低成本应变传感系统[J]. 光子学报 2005, 34(3): 431 - 433.
- [20] Chiang Chiachin, Shin Chowshing, Liaw ShienKuei. An intensity modulation based high-speed and high-resolution long-period fiber grating sensor interrogating system [C]// SPIE, Boston, 2006: W1 - W8.
- [21] Guo Honglei, Xiao Gaozhi, Yao Jianping. Interrogation of a long period grating fiber sensor with an arrayed-waveguide-grating-based demultiplexer through curve fitting [J]. IEEE Sensors Journal 2008, 8(11): 1771 - 1775.
- [22] 李志全, 汤敬, 许明妍, 等. 分布式光纤光栅传感网络的复用解调技术[J]. 光电子技术与信息 2005, 18(2): 53 - 58.
- [23] Wu Hongwei, Li Jie. Designing distributed temperature sensor system based on fiber Bragg grating [J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(9): 139 - 141.
- [24] Ying Chaofu, Peng Baojin, Ren Zhijun. Demodulation method of distributed fiber Bragg grating sensor using blazed fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(11): 2891 - 2895.
- [25] 陈清海, 林玉池, 王为, 等. 基于 Michelson 干涉解调技术的光纤光栅传感系统[J]. 光电子技术 2006, 26(1): 45 - 47.
- [26] Huang Chong, Cai Haiwen, Geng Jianxin. Wavelength interrogation based on a Mach-Zehnder interferometer with a 3 × 3 fiber coupler for fiber Bragg grating sensors [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(10): 1397 - 1400.
- [27] Zhou Xuefang, Fan Bing. Dynamic demodulation technology of fiber grating with high resolution based on cantilever beam [J]. Journal of Transducer Technology 2005, 24(4): 54 - 56.

作者简介:

华 静(1985 -), 女, 浙江丽水人, 硕士研究生, 主要研究光纤光栅解调。

(上接第 3 页)

- [5] Grueger H, Heberer A, Zimmer F, et al. Miniaturized MOEMS spectrometer for NIR applications [C]// Proc of SPIE 2005.
- [6] Pai-Choudhury P. MEMS & MOEMS: Technology and application [M]. Bellingham, Washington: SPIE Press 2001: 170 - 185.
- [7] Leo O'Conner. Microtechnology with MACRO [DB/OL]. SPIE digital library (SPIE Newsroom) [2003-03-28]. <http://spie.org>.
- [8] Motomedi M E. MOEMS: Micro-opto-electro-mechanical systems [M]. Bellingham Washington: SPIE Press 2005: 211 - 276.
- [9] "MEMS4Display 06": Market analysis of MEMS based microdisplay. Report from Yole Développement [R/OL]. [2006-03-06]. http://www.meminfo.jp/whitepaper/WP43_M4D6.pdf.
- [10] Wang Yimin, Rhdes W H, Baldni G, et al. Lu₂SiO₅: Ce optical ceramic scintillator [C]// Proc of SPIE 2009.
- [11] Gallis S, Nikas V, Suhag H, et al. Strong photoluminescence at 1540nm from Er-doped amorphous silicon oxycarbide: A novel silicon material for photonic applications [C]// Proc of SPIE, 2008.
- [12] Huang Y R, Heritage J P, Mukherjee B, et al. Signal-quality consideration for dynamic connection provisioning in all-optical wavelength-routed networks [C]// Proc of SPIE 2003.
- [13] Hernandez A, Sevens R, Thorson K, et al. Overview of nanotechnology and its applicability to department of defense [C]// Proc of SPIE 2005.

作者简介:

李红光(1968 -), 男, 黑龙江佳木斯人, 高级工程师, 主要从事靶场测控仪器研究和结构设计。