

微型光电机械系统技术在光通信中的应用及展望

潘武¹ 钟先信² 党明瑞³

(1 重庆邮电学院电信工程系 重庆 400065)

(2 重庆大学光电工程学院 重庆 400044)

(3 重庆邮电学院光通信研究所 重庆 400065)

摘要 通信是微型光电机械系统技术的一个非常重要的应用领域。本文从光交换技术、光连接技术、光开关、光调制器、滤波器、微光学组装技术、微型激光器等多个方面介绍了微型光电机械系统技术在光通信中的应用情况,并对微光机电系统技术的发展作了展望。

关键词 微型光电机系统 光通信

1 引言

当今信息技术已走上多媒体、网络化和智能化的发展道路,微电子信息处理已向系统级芯片集成发展。最具有挑战性的是微型光电机械系统(MOEMS)在通信领域的应用^[1]。

近年来,随着集成电路制造技术的不断完善,利用集成电路技术生产的许多微光学元件也日益受到重视,器件的微型化使得许多光电系统发生了革命性的变化。微光学、微电子学、微机械的结合产生出一类新的应用范围很广的器件——微型光电机械系统(MOEMS),它也是机、电、光、磁、化学、自动控制、传感技术与信息处理等多种技术的综合,涉及电信、计算机、Internet、环保、保健、商业等许多应用领域。

电信系统中的传输功能利用了基本的电和光的传输特性,而在信号转换和连接方面大多需要物理的定位功能,尤其是在光通信领域,光功能器件与光波导或光纤的连接需要亚微米级的定位精度,这一方面微机械技术可提供这种高精度的定位;另外,光通信涉及的许多光有源、无源器件等都可利用MOEMS技术完成微光学系统的制造。

一个通信网络的物理层包括管道、电缆、光纤、无线基站、复用器、集线器、开关以及网络节点组成。目前本地交换网和长途通信网基本实现了光纤数字化通信,而且逐步增加多媒体通信(Multimedia Communication)和点播电视(Video on Demand)等新业务,系统需要高速率、大容量的传输条件,传统的电子技术的限制变得突出,而需要在多片组件的互连层次上利用光互连解决损耗和电磁干扰问题,并且系统的封装需要高速率、高封装密度、高功率密度,MOEMS可以提供强大的技术支撑。

本文就 MOEMS 技术在光通信领域中的应用作一综述,展示微型光电机械系统技术在通信中的应用前景。

2 微光机电系统在光通信中的应用

2.1 光交换技术^[2]

实现下一代通信网核心的宽带综合数字通信网(B-ISDN)是人们关注的问题之一,且期望迎来光纤到各家(fiber-to-the-home—FTTH)的时代。主分布结构(Main Distribution Frame)(简称 MDF)是用户和交换机进行光纤任意交叉连接的装置,是实现 FTTH 的关键装置之一,这种装置要求自保持性、波长无关性、双向性、低损耗、体积小、价格便宜、遥控自动化等。光开关器件为这种机构提供帮助,利用光交叉连接原理构造光 MDF 结构。以光交叉连接原理为基础构成一个光矩阵交换机。在以矩阵阵形式配置的光波导的各差点具有满足全反射条件的差点槽。当差点槽有与光波导相同折射率的匹配油时,则光穿透槽。无匹配油时,光在差点槽的壁面全反射进入交叉的光波导中从而达到光交换的目的。要实现这种光 MDF 的基本单元,需要有低损耗光矩阵交换机、控制毫微升注入量的微泵以及波导和光纤阵列的高精度连接技术,这些技术属于微光机电系统(MOEMS)技术范畴。

2.2 光连接技术

在半导体激光器和光纤的耦合连接中,半导体激光器、透镜以及光纤等部件的精确定位是一项复杂的调整操作,微机械技术可以较好地解决这一复杂操作,降低光组件的成本。利用光刻工艺在半导体激光器基板上集成微型透镜和波导光纤的连接器件的结构。

用于计算机间连接的并列光互连组件、半导体激光器(LD)阵列、光电探测器(PD)阵列以及单模光纤阵列间的光耦合用的微透镜阵列,都可使用微机械技术制造出来,而且基本上达到实用水平。微透镜通常指直径从几毫米到十微米的微小透镜,把几十个微透镜规则排列起来就是微透镜阵列。用微透镜阵列进行光耦合解决了以往与单模光纤阵列、LD 阵列和 PD 阵列直接耦合时存在的问题,可以改善耦合效率和降低封装的难度。阵列间的连接一次完成,因此并列光互连具有节省空间和高密度的空间分割多重化等许多优点。微透镜的制作方法有:球透镜可用研磨的方法、在多组分玻璃基板上用选择性离子交换法、在结晶化玻璃基板上采用光热法、在 Si 基板上用离子束蚀刻法、光学玻璃和树脂热压成形等多种方法制作。

2.3 光开关^[3]

微机械技术的迅猛发展,使光开关的设计和制造重新受到重视。一个简单的例子是在光波导路径上采用悬梁方式的光开关。利用体微加工技术作出悬臂梁后,在其上淀积和成形波导,通过控制悬臂梁的工作状态达到对光进行开和关的功能。这种光开关有一定缺点,如工作电压

高(达 50V), 可获得的隔离度不大。

另外一种 1×2 热驱动的光纤开关^[4], 它由一厚的镀 Ni 热驱动执行器来移动单模光纤, 在硅片上各向异性刻蚀出 U 或 V 型槽, 用以输入光纤与接收光纤之间的对准。这种设计不需要耦合光波导或透镜, 并能达到理想的低损耗开关功能, 如图 1 所示。

利用微机械技术与磁力效应实现 $1 \times n$ 的光开关^[5], 这种开关采用了一种具有“燕尾”连接的移动微平台, 平台上刻蚀出 V 型槽

用以固定输入和输出光纤。输入光纤的移动平台上淀积一层磁材料, 磁场的作用将这个微平台沿着“燕尾”连接机构移动, 实现输入光纤和输出光纤之间的对准。这种开关的开关时间小于 10ms, 插入损耗达到 1dB。也有一种 2×2 微机械光开关, 其插入损耗小于 3.1dB, 串音小于 -40dB, 工作电压为 100V, 开关速度可达 0.5ms 左右^[6]。

另外, 利用表面微加工技术制造 PDDI (fiber data distribution interface) 光旁路开关, 在光纤局域网中这种开关很有用。它可以增强光纤网络的可靠性, 避开故障点。这种自由空间光学机械开关提供许多超出常规波导开关的优点, 可以获得低插入损耗和低串音。开关安装后, 不需要备用电源。利用硅体加工和片连接技术, 可以实现这种自由空间光学机械开关, 开关可以做得很小、很轻, 可以和光源、探测器以及其它电子器件集成在一起。如图 2 所示, 开关由一个三维可移动反射镜和四根由刻槽支撑和尾纤构成。

利用热光效应和聚合物波导制造技术可以制作空间开关, 如 2×2 方向耦合器 (Directional Coupler) 型开关 (简称 DC 开关)、基于开关矩阵的 4×4 DC 开关以及数字光开关^[7]。

有人尝试利用微机械技术制造超小型光矩阵开关。这种开关采用静电驱动微透镜阵列来改变自由空间传输的光束的方向, 以进行光输入与输出之间的多个转换。它与采用非线性光学效应的固体式光开关相比, 长度、宽度尺寸要小 1/10 多, 消光比提高, 串音减少。而且机械式光开关具有不影响波长和偏振面、自稳定性、高消光比、低串音以及无光损耗等特点。过去的光开关采用大型驱动和定位机构, 开关转速度慢、尺寸大, 而限制了它的使用。利用适合于光控制的半导体技术制作来研制小型廉价的机械开关、可望用于光纤通信网络传输线路的切换或线路试验用开关矩阵, 也可扩展应用到计算机间的光互连。在 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的硅基板上将 $0.6\text{mm} \times 0.3\text{mm}$ 的微型反射镜置于四个正方形各顶点上的 2 输入、4 输出的器件, 这种反射镜由宽 $16\mu\text{m}$ 、长 $320\mu\text{m}$ 、厚 $0.4\mu\text{m}$ 的细横杆支撑, 如果施加静电, 则向下旋转 90° ; 前端带有球透镜的

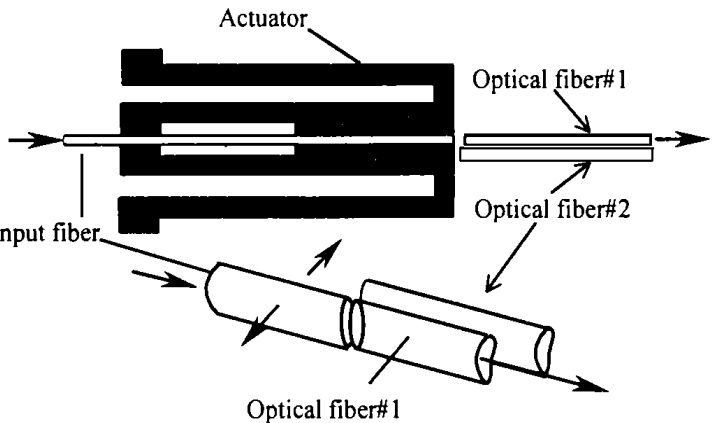


Fig. 1 A micromachined 1×2 optical fiber switch. The actuator is a bimorph heater.

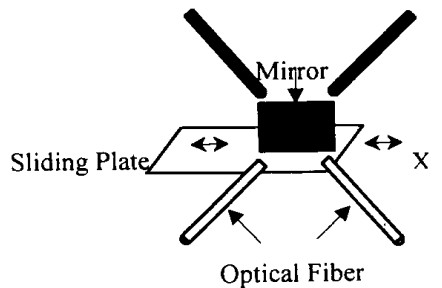


Fig. 2 Principal diagram of micromachining FFDI optical bypass switches

6 根光纤, 进行开关控制和准直, 使处于适当位置的反射镜旋转 90° ; 可对来自输入光纤的光束反射引入到所希望的输出光纤, 转换速度约 100 次/s, 插入损耗小于 7.7 dB, 消光比大于 60 dB。为了减小插入损耗需要研究更小型的开关^[12]。

2.4 光调制器与滤波器

Fabry-Perot 调制器可以通过采用硅微加工技术制造, 它由双支承的多晶硅片、气隙分隔的多晶硅电极构成了 Fabry-Perot 腔的镜面, 静电驱动改变两镜面间的光程, 从而调制反射率。这种调制器最大开关速率达 9 dB, 最大调制速率达 2.8 Mb/s, 它作为反射调制器用于光纤回路中。如果在网络用户端采用 Fabry-Perot 调制器, 就会大大减少网络中零部件数目; 若用单根光纤和一束激光可实现双向传输。从激光器向另一端发送数据, 激光二极管直接调制, 另一端的光检测器接收到调制信号的密度, 从另一端向激光器端发送数据, 入射光由反射式调制器调制返回激光器端。在反向传输速率允许比正向传输速率低很多时, 这种调制器是有用的, 能满足需要。

光纤通信正向高速率、大容量方向的发展, 需要采用波分复用(WDM) 技术, 需要多种功能的波长选择元件进行波长信号的分组切换和选择接收。其中多采用诸如 Fabry-Perot 滤光器、电光滤光器、声光可调滤光器和半导体有源器件等器件。如图 3 所示的波导声光可调 TE-TM 模式转换滤光器^[8], 采用微光机电系统技术, 将偏振起偏器、检偏器和声光器件集成在一个基片上, 提高了器件的稳定性, 这类滤光器调谐范围宽、覆盖 $1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波段, 而且可以多个波长同时选择, 具有插入损耗低, 易于集成的优点。特别是集成化偏振无关型的声光可调滤光器, 增强了其用于光纤通信回路的适应性, 有利于拓宽其在 WDM 网络中的功能。如图 4 所示的短程透镜—光栅型集成波分复用器^[9], 是由在玻璃上制备的两个相同焦距的短程透镜和一个深蚀刻光栅构成, 是一种成本低廉, 复用波长数目多的单片集成波分复用器。

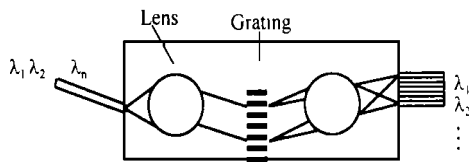
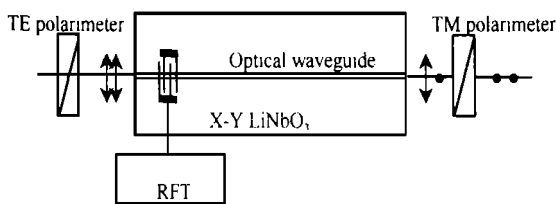


Fig. 3 A waveguide acoustic-optic tunable filter based on TE-TM conversion

Fig. 4 Integrated optical wavelength division multiplexer

一种可用于密集波分复用(WDM)的长谐振腔微机械可调谐滤波器^[10]。其 Fabry-Perot 谐振腔的腔长约为 $30 \mu\text{m}$, 采用静电调谐, 可调节谐振腔长约 $4 \mu\text{m}$, 谐振腔的两镜面分别作在两片 GaAs 基板薄膜悬臂片上, 两基板间由间隔条隔开, 由 Ni-Cr 电阻器加热($V = 2.7$

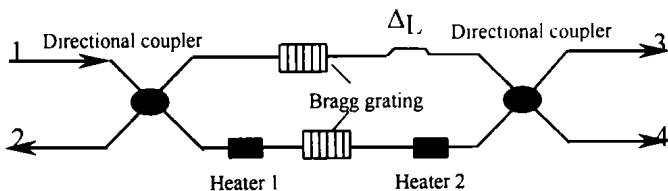


Fig. 5 Mach-Zehnder interferometer wavelength division multiplexer with heater and Bragg grating

V) 控制谐振腔腔长。

微机械 Fabry-Perot 谐振腔还有其它类型, 如采用深度干法刻蚀制作的垂直单晶体微机械硅谐振腔、硅片表面微机械膜以及用外延生长法制作的 GaAs/AlGaAs 悬臂片来作谐振器等。

图 5 为一种在硅基片上制作的带有光致 Bragg 光栅的平面波导(PLC)非对称 Mach-zehnder 干涉仪型波分复用器^[1]。

2.5 微光学组装技术

微光学器件, 通常是指光纤及半导体激光器、光探测器等光敏器件之间具有良好匹配特性的微型光学元件, 主要包括微型折射率分布型透镜和菲涅耳透镜、利用光纤加工成的光纤型无源元件以及集成在玻璃基板上的微光学线路和微透镜等。微光电机械系统技术考虑将目前的松散分离型光学元件作成集为一体的微光学元件作为今后实现光集成化的突破口。

如何来作到良好的系统组装效果? 需要利用诸如微机械的高精度对准工艺的光学元件、光波导、机械元件、电子线路及元件等多结构集成的技术。

在光源连接系统和平行光束连接系统中, 需要如图 6、7 所示的连接。

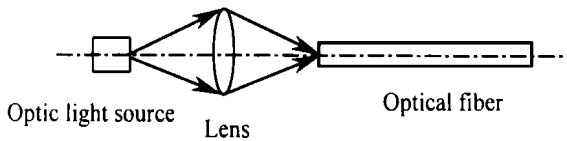


Fig. 6 Optic light source connection system

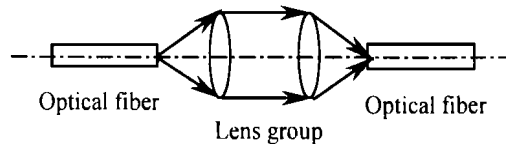


Fig. 7 Parallel light connection system

这样的连接需要精确的定位技术, 才能使元件的光耦合达到最佳状态, 恰好微机械技术能够作到高达微米甚至亚微米量级精度的对准。

基板上具有多个孔径的微透镜阵列可以形成与分离的微光学系统不同的独特的光学系统。采用选择性离子交换的光刻技术, 利用耐离子交换的金属薄膜在玻璃基板上预先形成具有图形开口的掩模图案, 借助于此开口进行离子交换, 在基板上便会产生三维折射率分布, 以超微细结构在基板上高精度配置微透镜。半导体激光器和光探测器从分离型向阵列型方向发展, 并将其应用于并行光回路中。阵列型光发射、光接收元件相连接的耦合光学系统需要阵列型透镜, 将半导体阵列元件密封起来, 利用微透镜的窗口和透镜功能实现耦合光学系统, 在确保透镜阵列精度的情况下, 只需将阵列两端的元件对齐便可将整体调整好并固定住。透镜阵列与光纤的组装问题可以利用微系统技术中的自对准工艺得到很好的解决。在透镜基板的连接面上形成聚酰亚胺膜, 实际上是指从光纤入射光, 以其光点的光强度曝光, 在微透镜的连接处形成凹凸的方法, 而光纤的尖端部预先经化学刻蚀已形成凹凸, 这样制成的凹凸吻合, 轴的重合非常容易。这是微光电系统(MOEMS)中作为低成本高性能组装的被动对准的最佳方法。当然, 在微系统组装技术中, 主动对准的方式也在采用。微系统技术的发展, 促进对准工艺的提高, 促进了光通信装置的组装工艺的不断改善, 使它们更趋微型化、低成本化, 促进光纤网络的快速扩展。

2.6 微型激光器^[10, 11]

微光电机械系统技术用于激光器的最突出的例子是制造垂直腔表面发射半导体激光器

(VCSEL), VCSEL 是光通信中的革命性的一项光发射技术。这种激光器在与 p-n 结垂直的方向上发射激光,它与发光二极管(LED)一样容易制造,但性能却优于端面发射(沿 p-n 结方向)的半导体激光器,是一种廉价、高性能、多信道的光发射器。

微机械调谐具有潜在的低制造成本和大而连续的调谐范围、低阈值电流以及它的表面对称布局和易于耦合进光纤的圆模式发射等特点。微机械可调垂直腔表面发射激光器使用非常简单的调谐方案,只要求一个调谐开关和微瓦量级的调谐功率。

在悬臂片结构中,利用 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}-\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 分布式布喇格反射器(DBR)作为可动镜面。文献[10]中的微机械调谐垂直腔表面发射激光器获得了 31.6nm 的调谐范围,它是一个在顶部分布式布喇格反射器中具有可调空气层的典型侧面注入垂直腔表面发射激光器,通过中间 p^+ 层和 n^+ 衬底进行电子泵浦。顶部分布式布喇格反射器由一个刻蚀成悬臂片形状的 n -DBR、一个可调空气隙以及四对 p -DBR 构成,通过对 n -DBR 和 p -DBR 之间的 p-n 结施加反偏压获得波长的调谐。当反偏压上升时,悬臂片顶部被吸向下面的 p^+ 层,从而减小空气隙的厚度以及从空气悬臂片界面反射的位相,这就相当于降低这种结构的 Fabry-Perot 波长,其最大的调谐范围是该结构的有效腔长决定的自由谱宽(FSR)。

众所周知,端面发射的半导体激光器发出的激光束发散角较大,光束截面近似为椭圆形;发光二极管发射的是非相干光,发散角非常大。而 VCSEL 发射的是相干光,发散角小,光束截面成圆形,还具有高的电-光转换效率(约 10%),驱动电流可低于几 mA,驱动电压约几 V,发射光功率可达几 mW,这些特性在光通信应用中非常重要。

利用 MOEMS 技术和标准的 GaAs 外延生长法可在 3 英寸直径的材料上制造具有几千个 VCSEL 的激光器阵列。实际需要更多的是希望把光发射器、光接收器与标准的电子线路连接的接口。利用微光电机系统技术,可以把光发射器、光接收器、接口及数据传输器件组合起来,作为一个整体面向应用,为光通信提供先进的设备。

3 展 望

微光电机系统技术是当今全球有很好发展前景的高科技之一。许多国家投入大量资金开发这项技术。人们也看到这项技术在通信领域的诱人前景,从而使通信成为微光机电系统的非常重要的应用领域:把下一代电话机和数据网络完全集中到微光电机系统上,用微光电机系统构成的无线电接收发射装置取代现在无线数据网络上使用的器件;带有内置无线电微米机电系统和全球卫星定位系统线路的便携式计算机和移动电话可以方便地确定其准确位置以及同最接近的主干因特连接,将光纤通信系统中的许多诸如波分复用器件、光发射与接收装置以及其它补偿器、调制器、耦合器、隔离器、光开关等许多重要器件集成于微型光电机机械系统中,开发新一代高速光纤传输系统,提高通信系统的容量、传输速率、信噪比。微光电机机械系统技术将推动通信技术的发展。

参 考 文 献

- 1 李志坚. 微电子技术的又一次革命——微电子机械系统(MEMS)发展展望. 科技导报, 1997, (4): 3~5
- 2 高晓萍摘译. 微机械在通信中的应用. 光机电信息, 1995, 12(7): 12~14
- 3 Tabib-Azar M, Assood, Beheim Glenn. Modern trends in microstructure and integrated optics for communi-

- cation, sensing and actuation. *Opt Eng*, 1997, 36(5): 1307 ~ 1318
- 4 Field Leslie A, Burriesci Diane L. Micromachined 1×2 optical fiber switch. *Sensors and actuator A*, 1996, 53: 311 ~ 315
- 5 Gonzalez C, Collins S D. Micromachined $1 \times n$ fiber-optic switch. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1997, 9(5): 616 ~ 618
- 6 Hogari K, Matsumoto T. Electrostatically driven micromechanical 2×2 optical switch. *Appl Opt*, 1991, 30(10): 1253 ~ 1257
- 7 Keil N, Yao Huihai, Zwardzki C. Polymer technology for cost integrated optical waveguide devices. 5th international conference on micro-electro-opto-mechanical systems and components. 1996, 531 ~ 536
- 8 Duchet C, Brot C, Maggio Di M. Interdigital transducer for acousto-optic tunable filter on Ti:LiNbO₃. *Electron Lett*. 1995, 31(15): 1235 ~ 1237
- 9 鲁平, 范俊清等. 短程透镜-光栅集成波分复用器. *发光学报*, 1997, 18(3): 237 ~ 240
- 10 Li M Y, Yuen W, Chang-Hasnain C J. Top-emitting micromechanical VCSEL with a 31.6nm tuning range. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1998, 10(1): 18 ~ 20
- 11 Harris J S. Simultaneous optimization of membrane reflectance and tuning voltage for tunable vertical cavity lasers. *Appl Phys Lett*. 1998, 72(1): 10 ~ 12
- 12 Lin L Y, Goldstein E L, Tkach R W. Free-space micromachined optical switches with submillisecond switching time for large-scale optical crossconnects. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1998, 10(4): 525 ~ 527

The Applications of Micro-electro-opto-mechanical System in Optical Communications and its Prospect

PAN Wu, DANG Ming-Rui

(*Department of Telecommunication Engineering,*

Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065)

ZHONG Xian-Xin

(*College of Optoelectronics Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044*)

Abstract

Communication is a very important application domain of micro-electro-opto-mechanical system(MOEMS). The paper introduces the applications of MOEMS in optical communications from optical switching, optical connection, optical switches, optical modulator, filter, microoptical assemblage and microlaser. The development of MOEMS is prospected.

Key words: Micro-electro-opto-mechanical system. Optical communication

潘武男, 1966年7月生, 1989年7月毕业于重庆大学应用物理系应用物理专业, 1995年4月毕业于重庆大学光学仪器专业, 获工学硕士学位。现在重庆邮电学院电信工程系工作, 并在重庆大学光电工程学院攻读博士学位, 主要从事光纤通信、光纤传感和微光电机械系统技术等方面的教学和科研工作。已在国内外期刊及会议上发表论文多篇。