

文章编号: 0253-2239(2003)09-1041-4

非硅基底 1×4 微机电系统光开关

曹钟慧 鲍俊峰 袁 野 吴兴坤

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室光及电磁波研究中心, 杭州 310027)

摘要: 设计研制了一种小体积、低成本、可扩展的低电压非硅基底 1×4 微机电系统光开关。开关单元由电磁驱动, 微反射镜绕直径 $100 \mu\text{m}$ 转轴转动, 驱动电压为 5 V , 开关时间小于 2 ms , 插入损耗小于 0.84 dB , 具有断电自锁功能。器件构造工艺采用微细电火花加工技术。用有限元法分析受力和磁场, 进行结构优化设计, 并着重介绍开关的实现及性能。

关键词: 光纤通信技术; 微型光机电系统; 光开关; 电火花加工

中图分类号: O438 文献标识码: A

1 引 言

微机电系统是当前最有希望的光开关技术之一^[1~7], 而我国目前此类产品主要依赖进口, 这与国内光通信的飞速发展、市场的紧迫需求不相适应。此外, 如何减小驱动电压, 降低制作工艺复杂性, 提高成品率也是当前微机电系统光开关技术追求的目标。

为此, 我们研制了一种非硅基底可扩展 1×4 微机电系统光开关, 开关时间小于 2 ms , 插入损耗小于 0.84 dB , 回波损耗 -49 dB , 与国内外同类器件 (例如, DiCon 1×4 微机电系统光开关, 驱动电压 $12 \sim 15 \text{ V}$, 插入损耗 1.2 dB , 开关时间 5 ms) 相比较, 它还具有以下突出优点: 1) 反射单元落地面积非常小, 仅为 $7 \sim 12 \text{ mm}^2$ (直径 $3 \sim 4 \text{ mm}$), 非硅基底可扩展。2) 驱动电压低 ($\leq 5 \text{ V}$), 能耗低。3) 具有多数微机电系统光开关不具有的断电自锁功能。4) 工艺简单, 成本低: 利用独特设计, 在非硅基底上采用微细电火花加工 (EDM)^[8] 技术, 摆脱硅微加工的生产工艺复杂性, 提高成品率, 并可大批量生产, 降低成本。

2 器件结构及制造

微机电系统光开关的设计关键在于: 1) 反射单元精确定位; 2) 反射单元落地面积微型化, 可扩展; 3) 易于低成本批量生产。

2.1 器件结构

该光开关如图 1 所示, 输入输出光纤准直器固定于上层, 微镜反射单元集成于下层 (基板)。当电磁驱动某个反射单元微镜进入光路, 则输入光经该微镜反射, 从相应输出光纤输出。

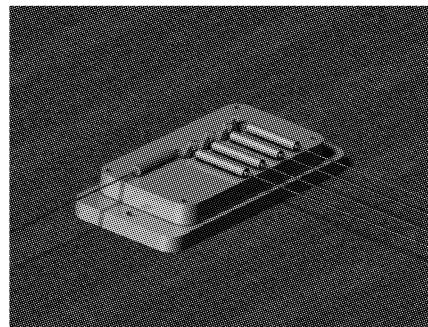


Fig. 1 Schematic drawing of the 1×4 micro electro-mechanical system optical switch

图 2 是反射单元结构示意图, 包括驱动机构和运动机构。驱动机构由线圈和线圈顶端极性相对安放的两块永磁铁构成。运动部件由摆杆、 $\phi 100 \mu\text{m}$

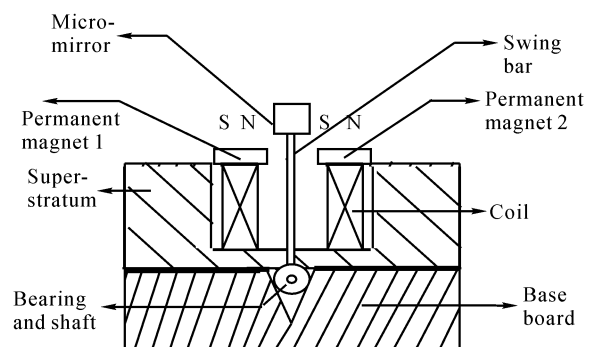


Fig. 2 Schematic drawing of the reflection cell

E-mail: zhui989@hotmail.com

收稿日期: 2002-07-16; 收到修改稿日期: 2002-09-09

的转轴和轴承构成。线圈套于摆杆上。摆杆顶端固定一块尺寸为 $1.5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 的微反射镜(由于经准直器准直的光束直径约为 0.6 mm),底端与转轴和轴承相连,组装在基板上。

图 3 为微镜反射单元照片,其内部元件的配合精度高达 $1\text{ }\mu\text{m}$,实现精确定位。转轴、轴承和底板的 V 形安装槽孔照片见图 4。

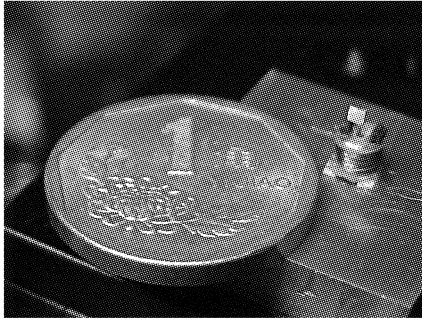


Fig. 3 An assembled reflection cell

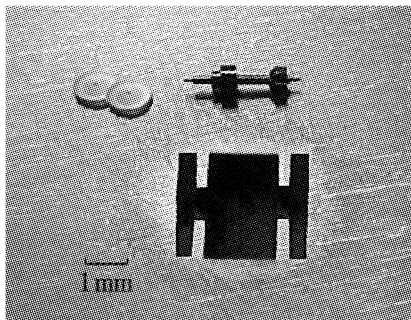


Fig. 4 Micro-machined 2 mm-long shaft and retaining V-groove on baseplate

微镜反射单元工作原理:当线圈两端接通一个 5 V 电脉冲时,线圈将使摆杆磁化,此时,摆杆装有微镜的一端,将同时受到永磁铁 1、2 的合力作用,摆向并停靠在自身极性相异的磁铁一端,线圈两端电脉冲的极性决定了摆杆的运动方向和停靠状态,正向脉冲驱动微镜进入光路,反向脉冲使微镜离开光路。从而达到快速移动微反射镜,实现光路转换。开关的结构使其具有独特断电自锁功能,工作时只要加一电脉冲,摆杆一旦切换到位,就会受所停靠永磁铁吸引形成自锁,不需保持电流,从而保证良好的断电工作稳定性和低功耗性。一般的微机电系统光开关不具有断电自锁,工作时器件可能会局部发热,产生形变,是产生器件工作不稳定的因素之一。目前,此光开关的设计结构已申请专利。

2.2 器件制作

器件制作选用微细电火花加工技术,微细电火花加工是一种十分有效的微加工技术,可用于切割

钢铁、石墨、硅、磁铁等多种材料。对于自由空间微型机械式光开关,目前大部分尚未采用光波导耦合,而一般以光纤准直器耦合。受准直器直径限制,相邻光束间最小间隔仍有 $1\sim 3\text{ mm}$ 左右。在这个尺寸上,借助一个精巧的设计,非硅基底金属微加工微细电火花加工工艺,也是制作微机电系统光开关的理想技术之一。

与现在各国研制微机电系统光开关大多采用的硅微加工相比,微细电火花加工技术有其自身的特点和独特优势:硅微加工采用光刻、蚀刻技术在硅基底上刻蚀加工微结构需要多达几十层掩膜,目前工艺复杂,成品率低;硅基底微机电系统光开关的封装仍然依赖于大量的人工操作,其成本占开关成本的 90% 左右。本光开关设计的反射单元的外壳与基板一体化,用微细电火花加工技术,重复定位精度可达 $1\text{ }\mu\text{m}$,直接在基板表面加工形成 V 形安装槽孔组装反射单元,替代多次掩膜的复杂工艺,制作简单;由于该光开关基板的平面加工特性,通过选择合适材料制作模具,利用可编程精密数控微细电火花加工机(例如,瑞士 AGIE 公司生产的 ROBOFORM22)软件与机械相结合,单个模具就可快速复制出具有完全相同结构的基板,实现低成本、大批量生产,这是该开关结构上一个突出优点。

3 理论分析

我们使用 ANSYS 软件对反射单元磁场进行了有限元数值模拟分析^[9],并计算微反射镜摆杆受力与电磁驱动线圈平均直径的关系,得出使微反射镜受力最大的线圈平均直径,优化设计结构。ANSYS 磁场分析的有限元公式由磁场的麦克斯韦方程组导出,将标量势、矢量势或边界通量引入麦克斯韦方程组中并考虑其电磁性质关系,得出有限元分析的方程组。我们采用三维静态磁场差分标势法,加入模型外表面磁力线平行边界条件,并对模型周围的空气建模,以正确反映漏磁现象,建立三维模型。线圈电流 30 mA ,改变线圈的平均直径 d_A ,计算微反射镜受力和磁场。图 5 给出了矢量方式显示的三维磁通密度。

图 6 给出了计算所得微反射镜的受力大小随 d_A 变化的理论曲线图。以 d_A 为参量,由图可知,在 d_A 从 3 mm 到 3.4 mm 变化的范围内,对于每一个给定条件下的 d_A ,微反射镜的受力情况各不相同,当 d_A 取 3.28 mm 时,微反射镜受力存在一个最大值,即一个最佳值 $F_{\max} = 1.05 \times 10^{-5}\text{ N}$ 。选此值为

设计制作的依据。

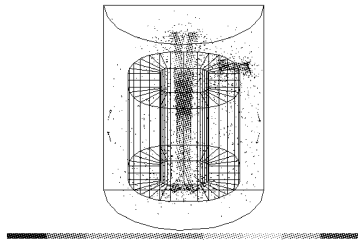


Fig. 5 3-D static magnetic field vector plot

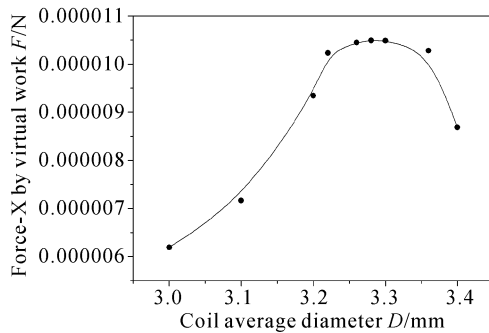


Fig. 6 The force by virtual work as a function of coil average diameter

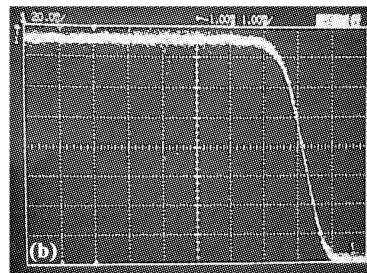
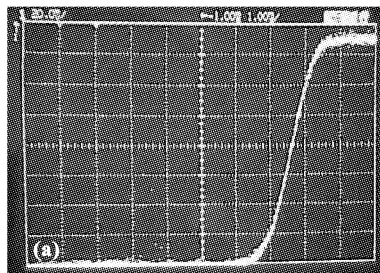


Fig. 7 Measured switching response of the 1×4 MEMS optical switch

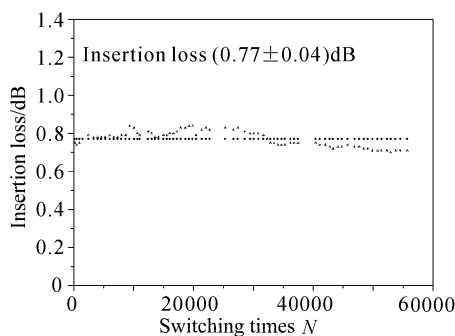


Fig. 8 Insertion loss as a function of switching times

结论 采用微细电火花加工工艺,我们设计研制了一种低电压 1×4 微机电系统光开关,开关时间小于 2 ms,插入损耗小于 0.84 dB,回波损耗 -49 dB,串扰小于 -50 dB,实现了低电压驱动(≤ 5 V),并具有断电自锁功能。该光开关具有体积小、成本低、可扩展

4 性能测试

对于上述结构的实用化 1×4 微机电系统光开关,分别用 1310 nm, 1550 nm 波长光源,测量光开关插入损耗和开关时间。对于单模光传输,测得插入损耗小于 0.84 dB,开关时间小于 2 ms,回波损耗 -49 dB,串扰小于 -50 dB。

本文讨论的反射镜位移式光开关,切换时间主要受驱动机构、定位装置和反射镜等因素影响,图 7 为开关切换时间的测量结果,由图所知,开关时间小于 2 ms。

为达到光开关来回切换时光损耗的稳定性,要求反射镜位移停止的位置具有高度可重复性。图 8 是此光开关切换的重复测试的结果。测试时间 20.5 h,方波脉冲周期 1.4 s。微反射镜在 1.5 mm 的范围内来回移动。图 8 横轴为光开关的开关次数(累计切换约 55000 次),纵轴为插入损耗的测试结果。如图所示,平均插入损耗为 0.77 dB。插入损耗曲线有微小的波动,其标准方差为 0.04 dB。

的特点。将此种形式的光开关扩展为 8×8 ,以及更高端口的阵列光开关,是我们下一步的工作。

参 考 文 献

- 1 Armand Neukermans, Rajiv Ramaswami. MEMS technology for optical networking applications. *IEEE, Communications Magazine*, 2001 :62~69
- 2 Lin L Y, Goldstein E L, Tkach R W. Free-space micromachined optical switches for optical networking. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, 5 (1):4~9
- 3 Lee Shi-Sheng, Huang Long-Sun, Kim Chang-Jin *et al.*. Free-space fiber-optic switches based on MEMS vertical torsion mirrors. *J. Lightwave Technol.*, 1999, 17(1): 7~13
- 4 Yasseen A A, Mitchell J N, Klemic J F *et al.*. A rotary electrostatic micromotor 1×8 optical switch. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, 5(1):26~32
- 5 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghui *et al.*

- Polymer thermo-optic switches with y -branch. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(6):735~738 (in Chinese)
- 6 Su Xuemei, Zhuo Zhongchang, Ning Yongqiang *et al.*. A weak optical switch in GaAs-AlGaAs asymmetric coupled quantum wells. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7):870~873 (in Chinese)
- 7 Zhao Yongpeng, Ye Peida. Switching characteristic of semiconductor optical amplifier based demultiplexer with symmetric Mach-Zehnder interferometer configuration. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(1):99~106 (in Chinese)
- 8 Gianchandani A Y B. Batch mode micro-electro-discharge matching. *J. Microelectromech. Syst.*, 2002, **11**(2):102~110
- 9 Wang Guoqiang. *Practical Numerical Simulation Techniques by ANSYS*(实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践). Xi'an: Xibei Technical Press, 2001 (in Chinese)

A Non-Silicon-Based 1×4 MEMS Optic Switch

Cao Zhonghui Bao Junfeng Yuan Ye Wu Xingkun

(Center for Optical and Electromagnetic Research, State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 16 July 2002; revised 9 September 2002)

Abstract: A fiber optic switch based on a novel micro-electromechanical system (MEMS) technology is developed, allowing fast switch (< 2 ms), excellent isolation (> 50 dB) and wide bandwidth. Each switch module consists of an electromagnetically actuated gold-coated silicon mirror rotating around a $100 \mu\text{m}$ diameter shaft and a miniature 5 V driven coil. Enabling technology is of precision EDM machining. The switch is scalable to 8×8 and allows the realization of high capacity cross-connects.

Key words: optical fiber communication technology; micro-optical electromechanical system (MOEMS); optical switch; electro-discharge matching (EDM)