

一种微型光开关的设计与仿真分析

李 伟^{1,2} 梁静秋¹ 李小奇^{1,2} 钟砚超^{1,2} 梁中翥¹ 孙德贵¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 介绍了一种新型的聚酰亚胺(PI)悬臂梁式电磁驱动微机电系统(MEMS)光开关,并对其总体结构进行了设计与仿真分析。运用有限元分析的方法,设计了永磁体的最佳尺寸并优化了悬臂梁的结构;分析了聚酰亚胺悬臂梁的扭转力、电磁力与挠度的关系。当输入电流为 75 mA 时,聚酰亚胺悬臂梁达到平衡时的挠度约为 1.02 mm,能够满足器件转换光路的要求。

关键词 微机电系统; 光开关; 有限元分析; 电磁驱动

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

Design and Simulation Analysis of a Micro Optical Switch

Li Wei^{1,2} Liang Jingqiu¹ Li Xiaoqi^{1,2} Zhong Yanchao^{1,2} Liang Zhongzhu¹ Sun Degui¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130031, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract A new polyimide (PI)-cantilever MEMS optical switch of electromagnetic actuation is proposed, and the structure of the optical switch is designed and simulated. The optimal dimension of the permanent magnet is designed and the structure of the PI-cantilever is optimized by finite element method. The relation of restoring force and electromagnetic force versus the displacement of the cantilever is interpreted. With 75 mA current pulse input, the distance of PI-cantilever equation is about 1.02 mm, which is able to change the propagation direction of the optical beam between through state and reflection state.

Key words micro-electro-mechanical system; optical switch; finite element analysis; electromagnetic actuation

1 引言

随着光纤通信技术的飞速发展,全光网络成为必然趋势^[1],它减少了许多电子器件,这将促进大量新型光器件的应用和发展。光开关是光纤通信网络中诸多设备(如 OADM、OXC^[2]、光交换机和光波路由器等)的关键光器件。微机电系统(MEMS)光开关除了具有体积小、重量轻、能耗低、易集成等优点外,在光纤通信网络中, MEMS 光开关的突出特点在于它与光信号的格式、波长、协议、调制方式、偏振、传输方向等均无关,并且具有光路选择、多条光纤线路的交叉互连、上下光路和对故障光纤线路进行旁路等重要功能。MEMS 光开关优异的性能使

其具有广阔的市场前景。

2 结构与工作原理

利用聚酰亚胺(PI)^[3]绝缘性好、机械强度高、耐热性好和耐溶剂性强等特性,设计出基于聚酰亚胺膜的电磁驱动光开关^[4~6]。设计的光开关总体结构如图 1 所示。光开关主要由基底、永磁体、聚酰亚胺悬臂梁以及驱动线圈^[7]和双面棱镜组成。它的工作原理为:已知永磁体的磁场强度和方向,当给线圈施加正向电流时,线圈就会产生与永磁体磁场方向相反的磁场,在电磁斥力的作用下,聚酰亚胺悬臂梁带动其上的双面棱镜向上翘起,光路呈直通状态;当给线

收稿日期: 2007-10-29; 收到修改稿日期: 2007-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(60578036)和中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项基金”资助课题。

作者简介: 李 伟(1982-),男,硕士研究生,主要从事微光机电系统与光器件方面的研究。E-mail: liwei211@163.com

导师简介: 梁静秋(1962-),女,研究员,博士生导师,主要从事微光机电系统与光通信等方面的研究。

E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn. 通信联系人。

圈施加反向电流时,产生与永磁体磁场强度方向相同的磁场,在电磁引力的作用下,聚酰亚胺悬臂梁及其上的双面棱镜被锁定在光路中,呈反射状态,光线被棱镜反射出去;当使用程控电路驱动这种开关时,可实现任意开关组合动作,以达到转换光路的目的。

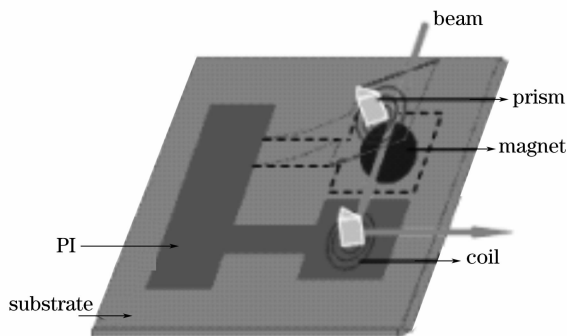


图 1 光开关总体结构示意图

Fig. 1 Schematic of the optical switch structure

电磁开关的驱动线圈是利用 MEMS 工艺在聚酰亚胺悬臂梁上制作的,而永磁体位于驱动线圈正下方,这样制作的光开关主要有两个突出优点:一是开关的尺寸较小,可以避免磁体之间的相互干扰;二是如果磁体在聚酰亚胺悬臂梁上,相当于增加了悬臂梁的质量,对最终的结果将产生一定的影响。

3 材料的选择以及结构优化

和普通的光开关相比, MEMS 光开关响应速度很高,软磁体的磁化和退磁都需要一定的时间,满足不了 MEMS 光开关快速响应的目的,所以在本 MEMS 电磁光开关中选用硬磁材料也就是永磁体。

3.1 永磁材料的选择

随着永磁材料的发展,各种类型的驱动器纷纷使用永磁体激励。永磁材料的发展先后经历了金属永磁材料、铁氧体永磁材料、稀土永磁材料三个发展阶段。由于第三代稀土永磁材料钕铁硼(NdFeB)的高剩余磁密度、高矫顽力、高磁能积和线性退磁曲线的优异磁性能及其较低的价格等特点,与其他永磁材料相比可以减小体积,所以特别适合于制作微小器件。钕铁硼具有体积小、重量轻和磁性强等特点,是迄今为止性能价格比最佳的磁体,所以设计的 MEMS 电磁光开关采用钕铁硼永磁材料。

钕铁硼稀土永磁材料根据其制造工艺的不同可分为烧结钕铁硼永磁体和粘结钕铁硼永磁体两类。烧结钕铁硼永磁体与粘结钕铁硼永磁体相比,具有高的永磁性,因而设计的电磁光开关采用烧结钕铁硼为永磁体材料,其矫顽力为 900 kA/m,平行充磁。

3.2 永磁体形状尺寸的优化设计

对于永磁体产生电磁力(F_1)的计算,选用通用有限元分析软件 ANSYS10.0 对永磁体的尺寸进行仿真分析,获得了精确的解。

MEMS 电磁光开关的电磁力与驱动线圈和永磁体之间的磁通量的平方成正比,所以为了减少漏磁现象,选用的永磁体总体结构为圆柱形。驱动线圈采用微加工工艺制作成圆形铜线圈结构,由于器件和工艺的限制,制作的驱动线圈尺寸为:线宽度为 $72 \mu\text{m}$ 、线厚度为 $25 \mu\text{m}$ 、线圈与线圈之间的间隙为 $20 \mu\text{m}$ 、线圈最大半径为 1.2 mm、线圈匝数为 13 匝。

从图 1 中可以看出,当开关为反射状态时,只要改变线圈电流方向它就会向上翘起,当电磁力与聚酰亚胺悬臂梁的扭转力(F_2)相等时,此时达到最大挠度,如图 1 直通状态所示,设此时的平均挠度为 1 mm,定义为阈值挠度。当挠度小于阈值时,光路呈反射状态。

驱动线圈和永磁体的总体结构为轴对称图形,为减少计算量,只对图形截面的一半建立模型,所建立的 ANSYS 模型如图 2 所示,其中 Y 轴为对称轴、 A_1 为驱动线圈截面、 A_2 为永磁体截面、 A_3 为它们周围的空气、线圈和永磁体之间的间隙为 1 mm。除上面提到的永磁体和驱动线圈的参量外,线圈和空气的相对磁导率为 1,永磁体的相对磁导率为 4。

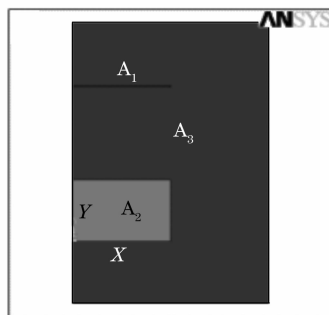


图 2 线圈与永磁体二维轴对称截面模型

Fig. 2 Two-dimensional axis-symmetrical section model of the coils and permanent magnet

由于器件尺寸的限制,选用的永磁体厚度为 1 mm,当通入电流为 75 mA 时,通过改变永磁体的半径,得到电磁力与永磁体半径大小的关系曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出,当永磁体的半径 $R=1.42 \text{ mm}$ 时,电磁力最大。分析可知,本 MEMS 电磁光开关的永磁体尺寸设计为半径 1.42 mm、厚度 1 mm 的圆柱体。

3.3 悬臂梁的优化

钟砚超等^[8]对聚酰亚胺悬臂梁进行了理论计算

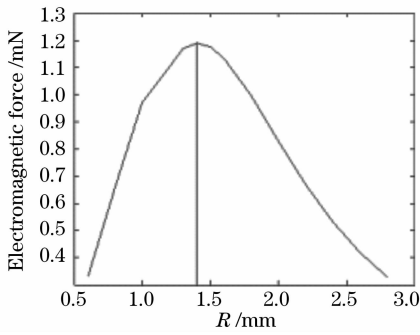


图 3 电磁力与永磁体半径的关系曲线
Fig. 3 Electromagnetic force versus the radius of the permanent magnet

和仿真分析,悬臂梁的结构如图 4 所示,已知悬臂梁的扭转力公式为

$$F_2 = 3dE^* I/L^3 = dbE^* t^3/(4L^3), \quad (1)$$

式中 F_2 为自由端的扭转力, d 为自由端挠度, L 为有效梁长, b 为梁宽, t 为膜厚, $I = bt^3/12$ 为悬臂梁的惯性矩, $E^* = E$ 为弹性模量。从公式(1)中可以看出,要想减小自由端的扭转力 F_2 ,可以增大梁长 L ,减小梁宽 b ,减薄膜厚 t 。悬臂梁经过优化最终得到的结构如图 5 所示。



图 4 未优化的悬臂梁的结构图
Fig. 4 Primary structure of the cantilever



图 5 优化过的悬臂梁的结构图
Fig. 5 Optimized structure of the cantilever

由于开关指标和制作工艺的限制,悬臂梁优化的结果为: $L=3.50\text{ mm}$, $b=1\text{ mm}$, $t=15\text{ }\mu\text{m}$;线圈部分为长方形,长边为 3.50 mm ,短边为 3.25 mm 。

对优化过的悬臂梁进行模态分析^[9],建立模型并划分网格如图 6 所示,对 $X=0$ 平面的所有自由度进行约束,得到各阶模态频率如表 1。

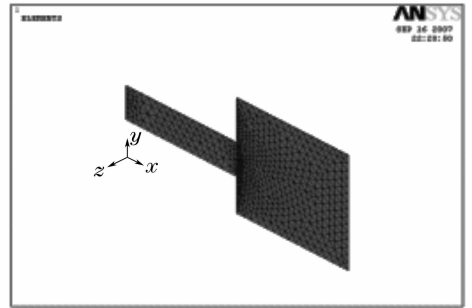


图 6 悬臂梁的网格划分模型
Fig. 6 Finite element model of the cantilever

表 1 聚酰亚胺悬臂梁的各阶模态响应频率
Table 1 Response frequency of various modes of PI-cantilever's models

set	1	2	3	4	5
Frequency /Hz	135.74	580.23	869.87	892.27	4258.80

从图 7 可以看出,聚酰亚胺悬臂梁的一阶振动模态频率为 135.74 Hz ,根据动力学原理,一般情况下,激励频率应低于结构最小固有频率的 $1/3$,所以得出聚酰亚胺悬臂梁的激励响应时间约为 22 ms 。

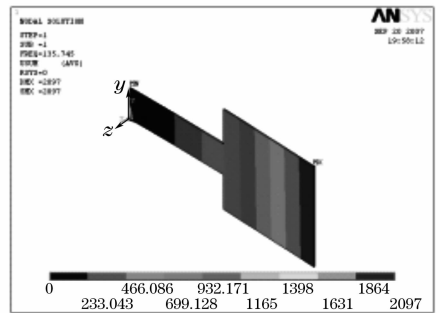


图 7 悬臂梁的一阶模态
Fig. 7 1st mode from finite element plate model of the cantilever

4 结构性能仿真分析

永磁体的尺寸已经确定,当驱动线圈通入的正向电流为 75 mA 时,经过仿真分析得到电磁力与挠度的关系曲线如图 8 所示。当通入正向电流小于 75 mA 时,电磁力使悬臂梁自由端产生的最大挠度小于 1 mm ,所以为满足器件的正常工作,激励电流应不低于 75 mA 。对聚酰亚胺悬臂梁建立模型如图 9 所示,对聚酰亚胺悬臂梁最左端的所有自由度进行约束,将电磁力平均施加在线圈区域 A_2 上,得到 F_1 、 F_2 与 d 的关系如图 10 所示。

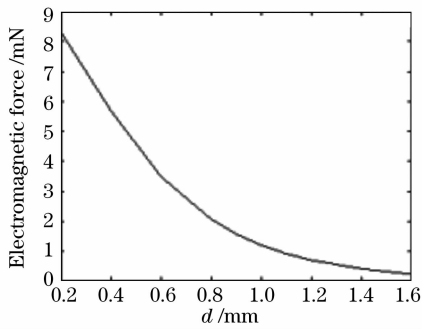
图 8 F_1 与 d 的关系曲线

Fig. 8 Electromagnetic force versus the displacement of the cantilever

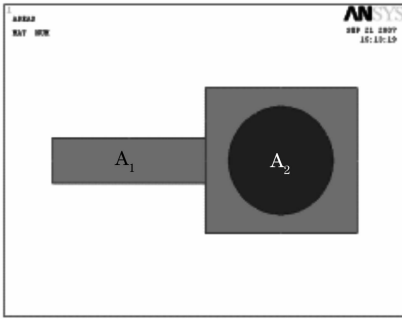


图 9 悬臂梁以及其上的线圈模型

Fig. 9 Finite element model of the cantilever and coils

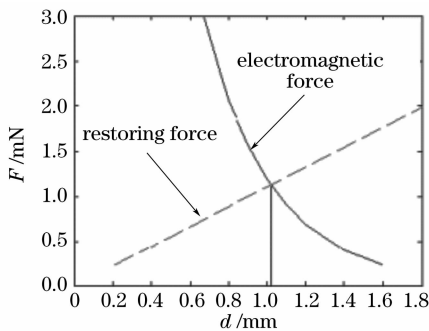
图 10 F_2, F_1 与 d 的关系曲线图

Fig. 10 Restoring force and electromagnetic force versus the displacement of the cantilever

从图 10 中可以看出,随着 d 的增大, F_1 下降速度很快,而 F_2 随着挠度的增加线性上升,二者在 d 约为 1.02 mm 处相交,即当 $d=1.02$ mm 时, $F_2 = F_1$,悬臂梁达到平衡状态,能够达到转换光路的目的,符合开关设计的要求。

5 结 论

设计了一种新型的 MEMS 电磁驱动光开关,并运用有限元软件进行了仿真分析,得出了 MEMS 电磁驱动光开关的一些优化参量,分析得到:永磁体的大小对器件的性能产生很大的影响。在对制作完成

的光开关进行性能测试时,由于器件几何尺寸的限制,需要采用微光机电系统光开关的一些测试方法^[10,11]。另外,由于开关的姿态保持需要通入持续的电流来维持,这必然增加了器件的功耗,线圈在悬臂梁内部产生的热量不能有效的散发出去,给器件的寿命带来一定的影响。还有其它一些影响因素如环境温度、环境湿度、重复性等有待于进一步深入实验研究。本文所设计的 MEMS 电磁驱动光开关具有体积小、重量轻、可扩展、易集成等优点,可以广泛用于集成化波分复用系统或其他微小光学系统中,对全光网络的应用和发展,具有一定的参考意义。

参 考 文 献

- 1 Qiu Fengxian, Zhou Yuming, Liu Juzheng *et al.*. Thermal-optical properties based on the fluorine-containing polyimide[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(2): 233~237
- 2 邱凤仙,周钰明,刘举正等. 含氟聚酰亚胺的热光性能[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 233~237
- 3 Li Wei, Liu Deming, Yang Chunyong *et al.*. Design and implementation of a Novel low cost intelligent optical wavelength Cross converter connect [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(3): 351~355
- 4 李蔚,刘德明,杨春勇等. 一种低成本智能全光波长交叉连接器的设计和实现[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 351~355
- 5 V. G. Kutchoukov, J. R. Mollinger, M. Shikida *et al.*. Patterning of polyimide and metal in deep trenches [J]. *Sens. Actuators*, 2001, (A92): 208~213
- 6 Cao Zhonghui, Bao Junfeng, Yuan Ye *et al.*. A non-silicon-based 1×4 MEMS optic switch [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1041~1044
- 7 曹钟慧,鲍俊峰,袁野等. 非硅基底 1×4 微机电系统光开关 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1041~1044
- 8 Lih Y. Lin, Evan L. Goldstein. The roles of MEMS optical switches in fiber-optic networks-what and when [C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5246**: 85~94
- 9 Jitendra Nath Roy, Anup Kumar Maiti, Sourangshu Mukhopadhyay. Designing of an all-optical time division multiplexing scheme with the help of nonlinear material based tree-net architecture [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(8): 483~486
- 10 Zhang Tao, Wu Yihui, Li Haiwen *et al.*. Micro electromagnetic actuator with high energy density based on MEMS technology [J]. *Opt. Precision Engng.*, 2007, **15**(6): 866~872
- 11 张涛,吴一辉,黎海文等. 基于 MEMS 工艺的高能量密度微电磁驱动器 [J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(6): 866~872
- 12 Zhong Yanchao, Liang Jingqiu, Li Xiaqi *et al.*. Theory and experimentation research on PI-cantilever [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007, **5**(4): 281~284
- 13 钟砚超,梁静秋,李小奇等. 聚酰亚胺微悬臂梁理论及实验研究 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2007, **5**(4): 281~284
- 14 Fang Wang, Chun Lu, Zishun Liu *et al.*. Finite element simulation and theoretical analysis of fiber-optical switches [J]. *Sens. Actuators*, 2002, (A96): 167~178
- 15 Sun Dongming, Dong Wei, Guo Wenbin *et al.*. A testing method for a MOEMS optical switch using CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 346~350
- 16 孙东明,董玮,郭文滨等. 采用 CCD 技术的微型光机电系统光开关测试方法 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 346~350
- 17 Chen Fanxiu, He Xiaoyuan. Instantaneous three-dimensional profile measurement of continually vibrating cantilever beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1647~1650
- 18 陈凡秀,何小元. 连续振动悬臂梁的瞬时三维形貌测量 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1647~1650

