

柔性悬臂电磁驱动光开关的仿真与制作*

徐大伟¹⁾²⁾ 梁中翥¹⁾ 梁静秋^{1)2)†} 李 伟¹⁾²⁾ 李小奇¹⁾²⁾ 孙智丹¹⁾²⁾ 王维彪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, 长春 130033)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2009 年 4 月 16 日收到; 2009 年 7 月 21 日收到修改稿)

设计并制作了一种用于波长信道选择系统的新型柔性悬臂梁电磁驱动光开关, 该光开关采用微光机电系统技术制作, 由带有平面螺旋形线圈的聚酰亚胺悬臂梁、圆柱形永磁体、基座以及双面反射棱镜组成. 通过改变线圈中激励电流的方向来控制开关动作. 运用有限元的方法, 模拟分析了线圈与永磁体之间电磁力的分布以及悬臂梁回复力、电磁力与挠度的关系. 对该光开关的驱动性能进行了测试, 实验结果表明: 加载较小的工作电流(0.15 A), 悬臂梁便可以产生较大的挠度(0.925 mm), 满足波长信道选择系统光路偏转的要求.

关键词: 微光机电系统, 光开关, 柔性悬臂梁, 电磁驱动

PACC: 4230Q, 4280S, 0710C, 4283

1. 引 言

随着光通信技术的不断进步以及微光学元件在光通信领域的广泛应用, 基于半导体技术以及微光机电系统(MOEMS)技术的小型化、低成本、高可靠性和多功能的光集成器件与系统受到人们越来越广泛的关注^[1-4]. 其中, MOEMS 光开关已经成为一项重要的研究内容. 在光纤通信网络中, MOEMS 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、传输方向等无关, 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. 波长信道的选择操作是光通信系统中不可缺少的功能操作^[5], 而目前大多数是由 WDM 器件、开关、滤波器和光衰减器组成的小型系统来实现的, 这种系统存在着操作灵活性差、结构复杂、成本高、插入损耗大等问题, 因此迫切需要一种集成器件来实现此功能. 本文提出了一种用于波长信道选择系统的基于 MOEMS 技术的聚酰亚胺(PI)柔性悬臂梁光开关, PI 悬臂梁具有良好的机械性能与物理化学稳定性, 能够在较恶劣的环境下使用, 利用永磁体与平面螺旋形线圈构成的电磁驱动器^[6], 能够获得较大驱动力进而可以使 PI 悬臂梁产生较大的挠度.

2. 光开关的结构与工作原理

图 1 为 1×2 波长信道选择系统结构示意图, 该系统由两个串联结构的光开关、窄带滤光片以及光纤准直器等组成. 光开关是该系统的主要组成部分, 它包括 PI 悬臂梁、平面螺旋形铜线圈、圆柱形永磁体、双面反射棱镜及基座. 其中螺旋形平面铜线圈是采用 MOEMS 工艺制作, 位于 PI 悬臂梁的自由端. 图 1 展示了此种光开关的直通和反射两种工作状态. 左面的开关呈直通状态, 此时铜线圈中通有正向电流, 线圈产生的磁场方向与永磁体磁场方向相反, 线圈与其下方永磁体之间产生排斥力, 悬臂梁带动双面反射棱镜移出光路, 因此由光纤准直器输出的光信号直接通过光开关而不被反射. 右面的开关呈反射状态, 此时铜线圈中通有反向电流, 线圈与永磁体之间产生的吸引力将悬臂梁吸附在基座上, 光信号被双面反射棱镜的一面反射到窄带滤光片上, 而从滤光片返回的光信号则通过双面反射棱镜的另一个反射面反射回到光纤准直器中.

3. 线圈与永磁体之间电磁力的计算与仿真

通电平面螺旋形线圈与永磁体之间的电磁力

* 国家自然科学基金(批准号:60578036)和吉林省科技发展计划(批准号:20080343, 20080122)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

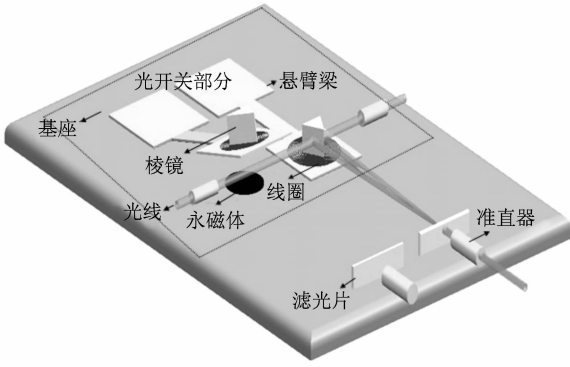


图1 1×2 波长信道选择系统结构示意图

可根据电磁力的理论求解方程式^[7]求得

$$F_z = \int_V \frac{d(\mathbf{M} \cdot \mathbf{B}_z)}{d_z} dV = MV \frac{\partial B_z}{\partial z}, \quad (1)$$

式中 F_z 为沿垂直方向的作用力, V 为永磁铁的体积, $\frac{\partial B_z}{\partial z}$ 为磁感应强度在 Z 轴正方向的梯度. 如图2所示, 以 O 为心、 Z 为轴, 取球坐标系和直角坐标系. 由 Biot-Savart 定律的对称性可知, 在空间 r, θ 相同的点 (即以极轴上任一点为心, 并与圆电流平行的圆周上), \mathbf{B} 的大小必定相同, 为了计算方便, 取 P 点和极轴构成的平面为方位角 $\varphi = 0$ 的平面.

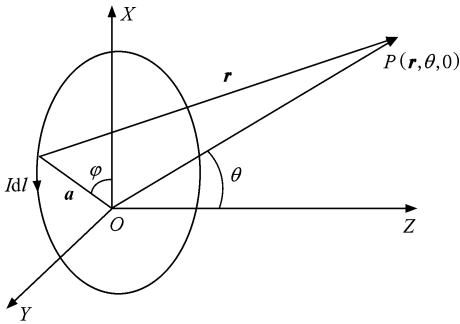


图2 载流圆线圈的磁场

源点 $Idl: a, \pi/2, \varphi$

场点 $P: r, \theta, 0$

$$\mathbf{r} = r \sin \theta \mathbf{e}_x + r \cos \theta \mathbf{e}_z, \quad (2)$$

$$\mathbf{a} = a \cos \varphi \mathbf{e}_x + a \sin \varphi \mathbf{e}_y, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R} = \mathbf{r} - \mathbf{a} &= (r \sin \theta - a \cos \varphi) \mathbf{e}_x \\ &\quad - a \sin \varphi \mathbf{e}_y + r \cos \theta \mathbf{e}_z, \end{aligned} \quad (4)$$

$$|\mathbf{R}| = \sqrt{r^2 + a^2 - 2arsin\theta\cos\varphi}, \quad (5)$$

$$d\mathbf{l} = -a \sin \varphi d\varphi \mathbf{e}_x + \cos \varphi d\varphi \mathbf{e}_y, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} d\mathbf{l} \times \mathbf{R} &= a d\varphi \{ [r \cos \theta \cos \varphi] \mathbf{e}_x + [r \cos \theta \sin \varphi] \mathbf{e}_y \\ &\quad + [a - r \sin \theta \cos \varphi] \mathbf{e}_z \}, \end{aligned} \quad (7)$$

于是得到单匝的圆电流 I 在 $P(r, \theta, 0)$ 点产生的磁感应强度 \mathbf{B} 的表达式为

$$\mathbf{B} = \oint \frac{\mu_0 I d\mathbf{l} \times \mathbf{R}}{4\pi R^3}, \quad (8)$$

图2中, 沿着半径 da 长度的匝数是 $\frac{N}{a_n - a_0}$, 其中 a_n, a_0 分别为平面螺旋线圈的最大半径和最小半径, N 为线圈的总匝数, da 长度的电流为 $d\mathbf{I} = \frac{NI}{a_n - a_0} da$, 根据(7)与(8)式, 电流 $d\mathbf{I}$ 在空间任一点 $P(r, \theta, 0)$ 产生的磁感应强度为

$$\begin{aligned} d\mathbf{B} &= \frac{NI\mu_0 da}{4\pi(a_n - a_0)} \\ &\quad \times \int_0^{2\pi} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{R}}{(r^2 + a^2 - 2arsin\theta\cos\varphi)^{3/2}}, \end{aligned} \quad (9)$$

对(9)式积分便可得到所求的磁感应强度 \mathbf{B} , 因此可以得到这组平面线圈在空间任一点的总磁场以及磁感应强度梯度 $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial Z}$. 将 $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial Z}$ 代入(1)式就可以得到平面螺旋形线圈与下方永磁铁之间的电磁力的关系. 由(1)式中可以看出, 永磁铁的体积直接影响电磁力的大小, 本文研究的光开关将永磁铁内嵌在基座中, 从而可以使用较大体积的永磁铁来增强电磁力. 永磁铁选用钕铁硼 (NdFeB) 永磁材料, 它具有体积小、重量轻和磁性强等特点, 是一种性能价格比较高的永磁铁^[8]. 运用有限元分析软件对线圈与永磁铁之间的电磁力进行模拟分析. 图3为所建立的螺旋形线圈与永磁铁的二维轴对称截面模型. 模型中 A_3 为永磁铁截面, A_2 为平面螺旋线圈截面, A_1 为空气截面.

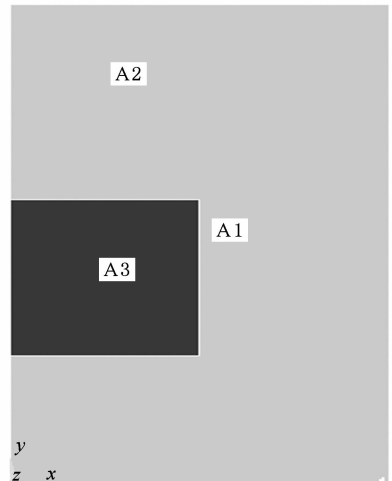


图3 二维轴对称截面模型

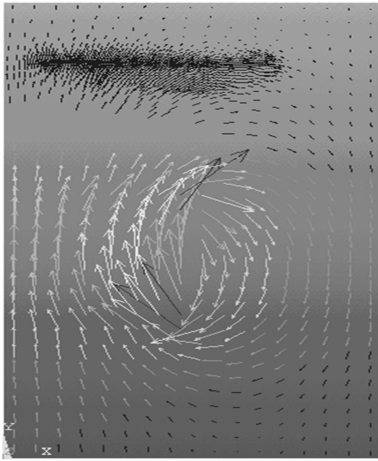


图4 平面线圈与永磁体磁通密度

为了仿真的方便,使用同心的平面圆形线圈来代替平面螺旋形线圈.模型中假定永磁体与螺旋线圈之间的距离 $D_1 = 1 \text{ mm}$,有效线圈匝数 $N = 13$ 匝,线圈厚度 $W_1 = 10 \text{ }\mu\text{m}$,宽度 $L_1 = 80 \text{ }\mu\text{m}$,永磁体高度 $H = 1.2 \text{ mm}$,半径 $R = 1.45 \text{ mm}$.永磁体矫顽力为 900 kA/m ,沿轴向平行充磁.线圈和空气的相对磁导率为 1,永磁体的相对磁导率为 4.从图 5 可以看出线圈加载的电流与所产生的电磁力呈正比关系.

表1 不同线圈所受电磁力分布

线圈	电磁力/mN
#1	0.00076275
#2	0.00209695
#3	0.00410425
#4	0.00678975
#5	0.01014425
#6	0.01413375
#7	0.01868425
#8	0.02366275
#9	0.02885525
#10	0.03395275
#11	0.03854225
#12	0.04212975
#13	0.04416625

4. 悬臂梁的建模与仿真

同样运用有限元软件对悬臂梁建立的模型^[9]

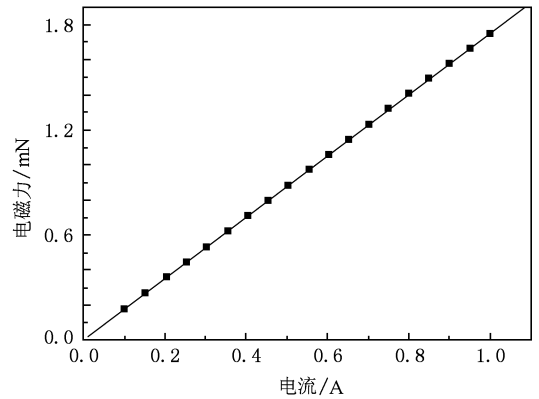


图5 线圈中电流与产生电磁力的关系

如图 6 所示,对悬臂梁进行静力分析得到悬臂梁的变形结果如图 7 所示.当线圈加载的电流为 0.15 A 时,得到了悬臂梁的回复力、线圈与永磁体之间的电磁力与挠度的关系曲线如图 8 所示.

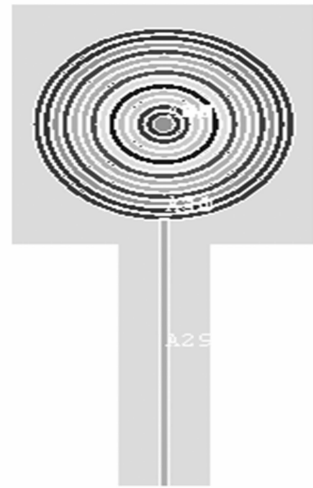


图6 悬臂梁模型

从图 8 中可以看出,随着 D_1 的增大,线圈与永磁体之间的电磁力迅速下降,而悬臂梁的回复力线性增大.两曲线在 $x = 1.086$, $y = 0.282$ 处相交,悬臂梁达到平衡状态,满足本文的设计要求.

5. 光开关的制作与性能测试

目前微驱动器形变材料一般有 Si, SiC, 聚二甲基硅氧烷(PDMS), 聚酰亚胺(PI)等. Si 和 SiC 的杨氏模量太大,在有限的驱动力作用下产生的偏移较小,不利于在要求较大变形量的场合使用.也有采用 PDMS 作为振动膜材料^[10], PDMS 的杨氏模量较

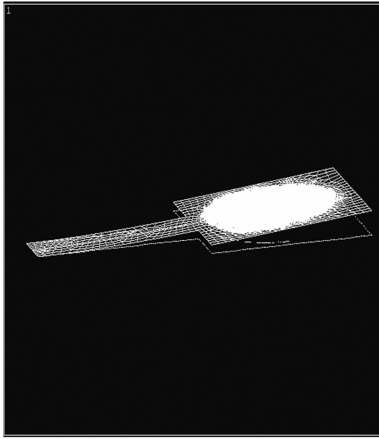


图 7 悬臂梁变形图

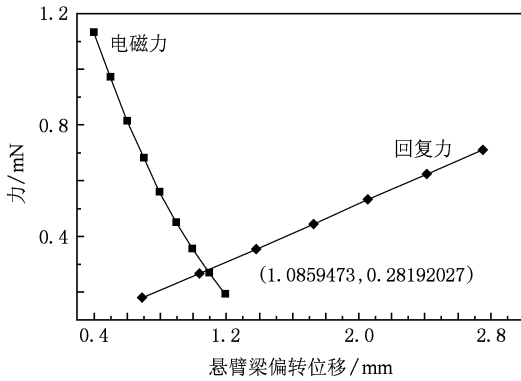


图 8 悬臂梁回复力、电磁力与位移的关系

小,容易得到较大的偏移,但其涂覆 PDMS 后的表面平整度不够好. 本文选择 PI 作为柔性悬臂梁材料,它在较宽的温度范围内能够保持优异的机械性能、耐热性能、介电性能、物理化学稳定性以及制成膜后拥有良好的平整性和制图性能^[11]. 光开关的具体制作流程如图 9 所示. (a) 在清洗干净的玻璃基片上涂覆一层 PI 前置体(高黏度液态 PAA),热固化成 PI 膜;(b) 在 PI 膜上旋涂光刻胶 BP213,光刻形成悬臂梁图形(图 10 为实验中制作的 PI 悬臂梁);(c) 在去胶后的悬臂梁图形上磁控溅射约 400 nm 厚的铜作为电镀种子层^[12];(d) 在铜种子层上利用负胶 RZJ220 光刻悬臂梁图形,接着采用电镀工艺,在悬臂梁图形上电镀一层铜作为下电极层,然后去掉负胶;(e) 旋涂固化第二层 PI 膜,套刻制作悬臂梁作为绝缘层并光刻留下电极孔;(f) 溅射第二层铜种子层;(g) 涂覆正性厚胶 AZ4903,光刻制作平面胶线圈与电极孔;(h) 电镀铜线圈及电极,并去除光刻

胶 AZ4903 及铜种子层^[13](图 11 为电镀铜线圈结构显微图);(i) 旋涂预亚胺化第三层 PI 膜,套刻制作 PI 悬臂梁作为保护层,开出电极孔;(j) 将器件从玻璃基底剥离.

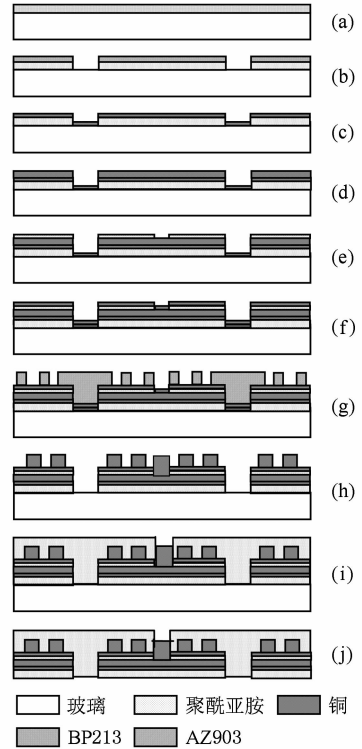


图 9 光开关制作工艺流程图

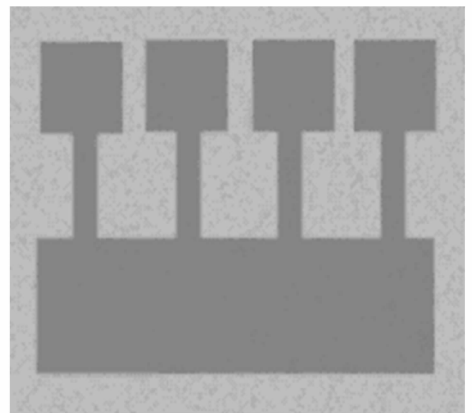


图 10 PI 悬臂梁结构

基于上述的制作方法,完成了该光开关的制作,并对其驱动性能进行了测试. 图 12 为初步组装的光开关结构. 图 13 给出了该电磁驱动光开关的激励电流大小与悬臂挠度关系曲线,由曲线可以看出,加载相同激励电流时,实验结果小于模拟结果,

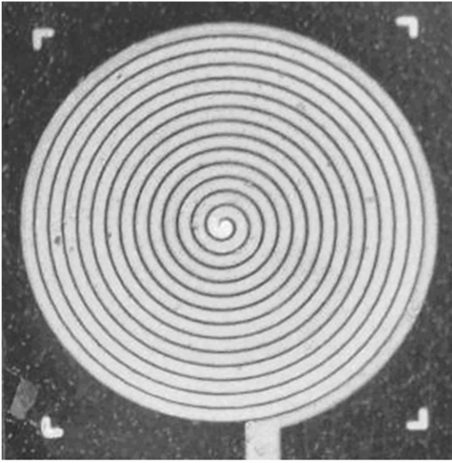


图 11 电镀铜线圈显微结构

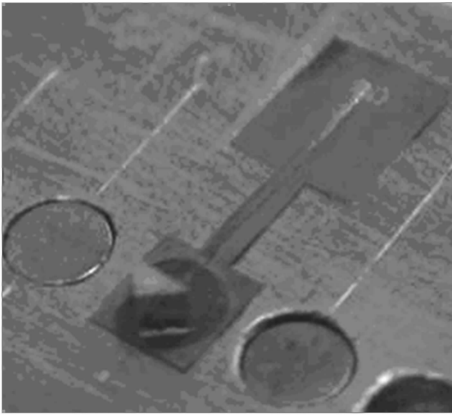


图 12 光开关结构图

在挠度较小时偏差较小,但随着挠度的增大,两者相差越来越大.导致这种偏差的原因为模拟建模引入的误差和实验误差.在模拟时做了如下近似:1)假设悬臂梁在变形的过程中线圈始终处于永磁体的正上方;2)假设线圈是一组同心圆环.这两种近似都会使模拟结果大于加载相同激励电流情况下的实验结果.而且由这两种近似所引入的误差随

着加载激励电流的增大而增大.此外在该光开关的制作与测试过程中所引入的误差也会使实验结果与模拟结果产生一定的偏离.然而在实际使用中,此光开关的反射状态要求悬臂梁挠度为 0,直通状态所要求的悬臂梁挠度取决于光信号在传输过程中的最大半径,在本波长信道选择系统中最大光斑直径约为 0.7 mm,故大挠度下实验结果与模拟结果的偏差不会影响此光开关的正常使用.

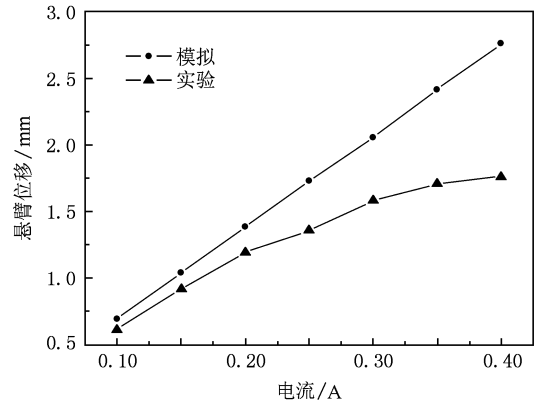


图 13 激励电流与悬臂梁挠度关系曲线

6. 结 论

本文提出并制作了一种用于波长信道选择系统的新型柔性悬臂梁电磁驱动光开关,对此光开关的驱动性能进行了模拟仿真与实验测试.模拟结果与实验结果均显示当加载较小激励电流时,悬臂梁便可产生较大的挠度,可以满足波长信道选择系统光路偏转的要求.此光开关采用性能优良的聚酰亚胺作为柔性悬臂梁的变形材料,因此它具有良好的机械性能与物理化学稳定性,能够在较恶劣的环境下使用.本文所制作的光开关为波长信道选择系统的制作打下了良好的基础,在光通信领域中具有广阔的应用前景.

- [1] Shi W, Jia W L, Ji W L, Liu K 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6334 (in Chinese)[施卫、贾婉丽、纪卫莉、刘锴 2007 物理学报 **56** 6334]
- [2] Lao Y F, Cao C F, Wu H Z, Cao M, Gong Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1954 (in Chinese)[劳燕锋、曹春芳、吴惠楨、曹萌、龚谦 2009 物理学报 **58** 1954]

- [3] Chen D P, Cheng T, Gao J, Shi H T, Wu X P, Zhang Q C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 852 (in Chinese)[陈大鹏、程腾、高杰、史海涛、伍小平、张青川 2009 物理学报 **58** 852]
- [4] Chen D P, Dong F L, Guo Z Y, Li C B, Miao Z Y, Wu X P, Xiong Z M, Zhang Q C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2529 (in Chinese)[陈大鹏、董凤良、郭哲颖、李超波、缪正宇、伍小平、熊志铭、张青川 2007 物理学报 **56** 2529]

- [5] Wang A B, Wang Y C, Zhang J Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3793 (in Chinese) [王安帮、王云才、张建忠 2009 物理学报 **58** 3793]
- [6] Fang Y M, Huang Q A, Li W H 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1709
- [7] Zhang T, Wu Y H, Li H W, Liu B, Zhang P, Wang S R 2007 *Opt. Prec. Engn.* **15** 866 (in Chinese) [张涛、吴一辉、黎海文、刘波、张平、王淑荣 2007 光学精密工程 **15** 866]
- [8] Sun B Y, Yao H F, Wang J, Meng X L, Yu X L, Xu X R 2007 *Magnet. Mater. Compon.* **38** 51 (in Chinese) [孙宝玉、姚洪福、王健、孟祥龙、于祥利、徐孝荣 2007 磁性材料及器件 **38** 51]
- [9] Guan B L, Guo X, Yang H, Liang T, Gu X L, Guo J, Deng J, Gao G, Shen G D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4585 (in Chinese)
- [10] Khoo M, Chang L 2000 *Proceeding of the 22nd Annual EMBS International Conference, Chicago IL, November 9—10* p 2394
- [11] Cui Y L, Zhang Z H, Jiang L 2005 *Plast. Sci. Technol.* **3** 50 (in Chinese) [崔永丽、张仲华、江利 2005 塑料科技 **3** 50]
- [12] Yang J W, Wu Y H, Jia H G, Zhang P, Wang S R 2006 *Opt. Prec. Engng.* **14** 83 (in Chinese) [杨杰伟、吴一辉、贾宏光、张平、王淑荣 2006 光学精密工程 **14** 83]
- [13] Liu B D, Li D S, Yang X B 2007 *Opt. Prec. Engng.* **15** 544 (in Chinese) [刘本东、李德胜、杨晓波 2007 光学精密工程 **15** 544]

Simulation and fabrication of flexible cantilever electromagnet actuated optical switch*

Xu Da-Wei¹⁾²⁾ Liang Zhong-Zhu¹⁾ Liang Jing-Qiu^{1)2)†} Li Wei¹⁾²⁾ Li Xiao-Qi¹⁾²⁾
Sun Zhi-Dan¹⁾²⁾ Wang Wei-Biao¹⁾

1) (State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

2) (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(Received 16 April 2009; revised manuscript received 21 July 2009)

Abstract

A kind of flexible cantilever beam electromagnetic optical switch which is used in the wave length channel selection system was designed and fabricated. It was manufactured by micro-opto-electromechanical system technology and composed of a plane circular coil in flexible polyimide cantilever beam, a cylindrical permanent magnet, the substrate and a reflector prism with two reflecting surfaces. The switch's motion depends on the current direction in the coils. The simulation of force between the coils and the permanent magnet was proceeded by finite element method. In the same way, the relationship between cantilever's deflection and restoring force, and electromagnetic force were obtained. The switch's actuation performance was tested and the results indicate that deflection of the cantilever is 0.925 mm with 0.15 A current input, which satisfies the need of the wave length channel selection system of changing the propagation direction of the optical beam.

Keywords: micro-opto-electromechanical system, optical switch, flexible cantilever beam, electromagnetic actuation

PACC: 4230Q, 4280S, 0710C, 4283

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 4080302), and the Development Program of Science and Technology of Jilin Province, China (Grant Nos. 20080343, 20080122).

† Corresponding author. E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn