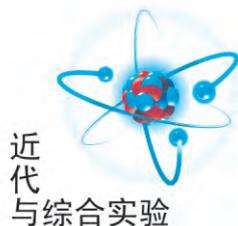


文章编号:1005-4642(2019)09-0010-05

近  
代  
与  
综  
合  
实  
验

## 微电磁光开关的结构设计与性质模拟

吴雅苹,陈晓航,吴志明

(厦门大学 物理系 a. 福建省半导体材料及应用重点实验室;  
b. 半导体光电材料及其高效转换器件协同创新中心,福建 厦门 361005)

**摘 要:**基于微电磁光开关的工作原理,设计了 MEMS 电磁反射型光开关. 采用 ANSYS 9.0 有限元软件分析结合 Mathematica 数值计算研究了微电磁光开关所需的电磁力、磁芯线圈的磁场分布、悬臂梁受电磁力的形变状态,从而获得磁芯线圈的匝数、悬臂梁位置、悬臂梁与平面磁芯线圈接触区域等结构参量.

**关键词:**微电磁光开关;磁芯线圈;悬臂梁;有限元模拟

**中图分类号:** TN256

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.19655/j.cnki.1005-4642.2019.09.002

光纤通信技术为通信产业带来历史性变革,密集波分复用(Dense wavelength division multiplexing, DWDM)光通信网络具有大带宽、高速率的明显优势,已成为目前通信网络发展的主要趋势<sup>[1]</sup>. 近几年来,以 IP 为主的 Internet 业务飞速增长,并对网络的组网方式、节点设计和管理控制提出了更高要求. 在此推动下,自动交换光网络成为当今系统研究的热点. 其核心节点由光交叉连接(Optical cross connect, OXC)设备构成,可实现动态波长选路和对光网络灵活有效地管理. 光交叉互连技术是 DWDM 网的关键技术之一,而光开关作为切换光路的功能器件,则是 OXC 的核心组成部分. 由光开关构成的开关矩阵可同时实现动态光路管理、光网络故障保护、波长动态分配等功能,对解决复杂网络的波长争用问题、提高波长重用率、实现网络灵活配置等方面均有重要作用<sup>[2]</sup>.

传统光开关器件主要基于固态波导和光机械技术<sup>[3]</sup>. 其中固态波导开关采用光集成方式,其耗时短、体积小、易于大规模集成,但其消光比、偏振敏感度、串扰效果及插入损耗指标都较差;而光机械开关采用三维校准方式,虽然插入损耗和串扰性较好,但由于设备体积较大且价格昂贵,严重影响其可靠性和扩展性,也不适于制作大规模开

关矩阵. 随着微机电系统(Microelectro mechanical system, MEMS)技术的迅速发展<sup>[4]</sup>,人们将微机械构造和电路集成到硅片上,制成微米级乃至纳米级器件,从而也产生了新兴的 MEMS 光开关. MEMS 光开关将光机械结构、微致动器和微光元件集成在同一基底上,因而结构紧凑、重量轻,且在设计灵活性、兼容性、扩展性上均具有优势,与未来光网络发展趋势相符合<sup>[5-6]</sup>. 与传统的光机械开关相比, MEMS 光开关既继承了光机械开关的优点,又克服了其集成困难和扩展性差等缺点,是目前最具发展前景,最能适应 DWDM 全光通信网要求的光开关技术,也是颇具竞争力的光器件实现技术之一,而 MEMS 光开关的集成和产业化将是未来其重要发展方向<sup>[7-8]</sup>.

本文基于 MEMS 光开关的工作原理,采用电磁型驱动器提供驱动力,设计 MEMS 电磁反射型光开关器件,计算开关正常工作下所需的电磁力,运用有限元 ANSYS 9.0 仿真软件模拟平面方形磁芯线圈的磁场分布以及悬臂梁在电磁力作用下的形变状态,推导磁芯线圈匝数、悬臂梁位置、悬臂梁与平面磁芯线圈接触区域等结构参量.

## 1 MEMS 光开关的工作原理及技术特点

基于 MEMS 制造工艺的光开关的典型代表

**收稿日期:** 2019-05-30

**基金项目:** 九江市杰出青年基金项目(No. 2018042);厦门大学校长基金项目(No. 20720190055)

**作者简介:** 吴雅苹(1983-),女,福建漳州人,厦门大学物理科学与技术学院高级工程师,博士,研究方向为半导体材料与器件.



有光路遮挡型光开关以及移动光纤对接型光开关<sup>[6]</sup>。

1) 光路遮挡型光开关可为悬臂梁式光开关,由金、氮化硅、多晶硅材料构成,并且由体硅工艺加工出悬臂梁,其器件尺寸为 1~2 mm。该器件利用多晶硅 PiN 电池串联组成光发电机,由远端的光信号控制产生电压,电极板受到电场力吸引,将遮片升起,此时光开关处于开通状态;无光信号时,光发电机无电压输出,此时遮片下降,光开关关闭。该光开关驱动光功率仅需几  $\mu\text{W}$ ,传输距离可达几百 km,开关速度几 ms,插入损耗可小于 0.5 dB。但其串扰比较大,隔离度较低。

2) 移动光纤对接型光开关,以电磁驱动并利用光纤的移动和对准实现光信号的切换。其优点在于采用体硅及光刻、电铸和注塑(LIGA)工艺,制造结构和制备方法较为简单,且对驱动精度要求低,系统可靠性和稳定性较好,稳态时几乎不耗能,插入损耗约为 1 dB。缺点在于开关速度较低,约为 10 ms 量级,可连接的最大端口数受到限制,多用于网络自愈保护。

此外,还有微镜反射型 MEMS 光开关,其相对于移动光纤对接的方法更加易于集成和控制并组成光开关阵列。

## 2 仿真结果分析与讨论

基于 MEMS 光开关的基本工作原理,采用悬臂梁结构作为电磁光开关的部件<sup>[9]</sup>,设计电磁反射型光开关,其示意图如图 1 所示。

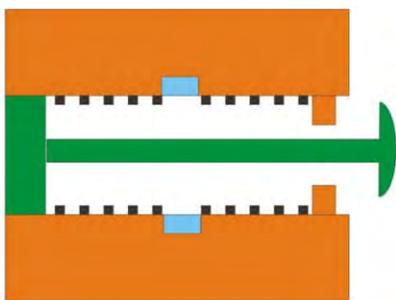


图 1 电磁反射型光开关的结构示意图

该电磁反射型光开关结构包括可动悬臂梁和固定部分,可以由体加工而成。悬臂梁制作材料采用金属 Ni,其长、宽、高分别为 300, 20, 5  $\mu\text{m}$ 。悬臂梁根部固定,自由端连接一垂直镜面,在自由端附近有 2 个限位块,悬臂梁与限位块的间隙为

10  $\mu\text{m}$ ;两侧分别有 2 个导磁电极,通过 2 个磁感应线圈引出。当磁感应线圈通电后,由导磁体将磁感线引入悬臂梁下方。在磁力的作用下,悬臂梁在受力方向上产生位移,发生角度偏转,并且停止在限位处。改变磁感应线圈的通电状态,使得悬臂梁来回摆动,产生 2 种稳态,并由限位块精确地控制转动的角度。

基于电磁反射型光开关结构,运用 ANSYS 9.0 有限元软件模拟、Mathematica 数值计算等对正常工作下悬臂梁的受力情况进行分析,进而设计磁芯线圈,并分析其电磁场分布以及悬臂梁在电磁力作用下的受力形变状态<sup>[10-11]</sup>,为器件的优化设计提供合理方案,以实现性能稳定可靠的器件功能。

### 2.1 悬臂梁受力分析

悬臂梁结构示意图如图 2 所示,其在工作过程中将同时受重力及电磁力作用。



图 2 悬臂梁的结构示意图

#### 1) 悬臂梁的重力

在竖直方向上,悬臂梁受到自身重力作用。采用典型的均匀载荷  $P$  模型,悬臂梁沿竖直方向的位移可表示为

$$W(P, x) = \frac{Px^2}{24EI} (6L^2 - 4Lx + x^2), \quad (1)$$

其中,  $P$  和  $E$  分别为悬臂梁单位长度的重力和 Ni 的弹性模量,  $I = \frac{dh^3}{12}$  为悬臂梁的惯性矩,  $d$  为悬臂梁的宽度。

在  $x=L$  处,存在最大的位移:

$$W_{\max} = \frac{PL^2}{8EI} = 3.2 \times 10^{-14} \text{ m}.$$

由于悬臂梁与限位块的间隙为 10  $\mu\text{m}$ ,可以看出,重力对悬臂梁的影响极小,因而在设计中基本无需考虑重力作用。

#### 2) 电磁力

电磁力  $F$  是悬臂梁的驱动力,通过导磁体引入电磁力作用于悬臂梁上,使其产生偏转而与限位块接触。可视为悬臂梁在  $x=a$  处受到集中力

$F$ , 此时悬臂梁的位移方程为

$$W(F, x) = \begin{cases} \frac{Fx^2}{6EI}(3L-x), & 0 \leq x \leq a; & (2) \\ \frac{Fx^2}{6EI}(3x-a), & a < x \leq L. & (3) \end{cases}$$

设悬臂梁在限位块处, 限位块对悬臂梁的作用力为  $F_v$ , 方向沿  $-y$ , 则悬臂梁的弹性回复力可表示为

$$W(F_v, L_1) = \frac{F_v x^2}{6EI}(3L_1 - a), \quad (4)$$

可得在此工作状态下, 其运动曲线方程为

$$y = \frac{Fa^2}{6EI}(3x-a) - \frac{F_v x^2}{6EI}(3L_1 - x). \quad (5)$$

由式(4)与式(5)可知, 当悬臂梁受到电磁力吸引, 开始弯曲工作时, 电磁力要大于弹性回复力. 设定  $x=L_1$  处,  $y=y_1=5 \mu\text{m}$ , 代入式(5)可以求得悬臂梁正常工作时所需电磁力最小值为  $F_{\min}=17 \text{ mN}$ .

## 2.2 MEMS 驱动器设计

相比其他驱动方式, 电磁型驱动有着驱动电压小、驱动力大、位移量大、开关速度快等优点, 因而设计选用电磁型驱动器提供 MEMS 光开关的驱动力. 为了简化电磁驱动器的制作工艺以便于实际应用, 采用平面方形磁芯线圈作为驱动部件, 如图 3 所示.



图 3 平面方形线圈结构示意图

平面方形线圈通电后产生的电磁力  $F$  为

$$F = 6.3 \times 10^{-8} \times 9.8 \times S \frac{(WI)^2}{\delta^2}, \quad (6)$$

其中,  $S$  为电磁铁线圈的面积,  $WI$  为电磁铁的安匝数,  $\delta$  为电磁铁与悬臂梁的间隙. 取  $\delta=15 \mu\text{m}$ ,  $S=50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ , 可以求得  $WI_{\min}=77$  安匝.

当考虑磁芯的存在时, 设磁芯的相对磁导率  $\mu_r=100$ , 则  $WI_{\min}=0.77$  安匝, 由此取  $W=77$  匝,  $I=10 \text{ mA}$  为平面方形磁芯线圈的结构与工作参量.

## 2.3 电磁线圈的电磁场仿真分析

采用 ANSYS 9.0 软件对含有铁芯的电磁铁建模如图 4 所示. 该模型由平面线圈、磁芯和空气组成, 截取其纵向剖面进行分析, 并且将排列紧密的线圈电流简化近似为密度均匀而且连续分布的电流.

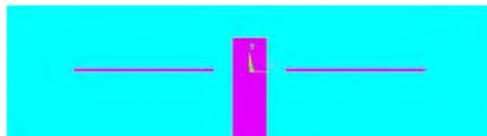
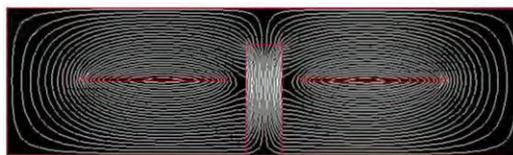
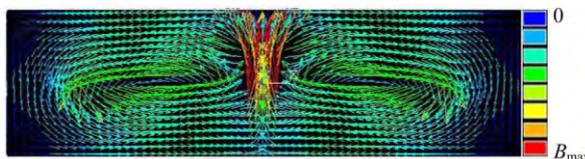


图 4 平面方形磁芯线圈仿真模型

当线圈中通入一定电流时, 磁感线分布情况如图 5(a) 所示. 磁感线分布于绕圈周围, 且在磁芯处最为密集, 说明此处电磁力最大, 符合电磁场基本理论. 当增大电流时, 电磁力随之增强, 因此增大电流有利于平面磁芯线圈吸引悬臂梁弯曲并与其接触, 从而完成开关动作; 但增大电流同时也将增大器件功率, 因此应综合考虑以决定通入电流的大小.



(a) 磁感线



(b) 磁场向量分布

图 5 平面方形磁芯线圈通入电流时磁感线与磁场向量分布图

从线圈周围的磁场向量分布可以看出, 磁芯上方磁感应强度分布密集, 可对悬臂梁产生较强的吸引力, 因此悬臂梁受力端宜置于此位置, 有利于与线圈之间形成稳定接触.

## 2.4 悬臂梁受力形变分析

将以上分析所得的电磁力作用于悬臂梁受力端, 采用 ANSYS 9.0 软件模拟悬臂梁的形变情况. 简化考虑其末端的受力情况, 建立模型如图 6 所示.

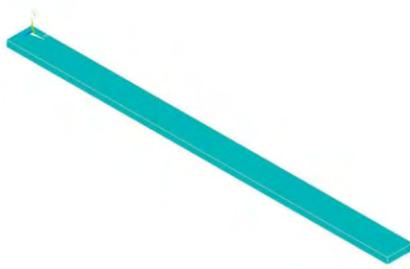


图6 悬臂梁受力仿真模型

模拟所得悬臂梁应力分布如图7所示。结果显示,悬臂梁受力弯曲时,其固定端所受的应力最大,因而在制作过程中应当注意加强固定端的连接。

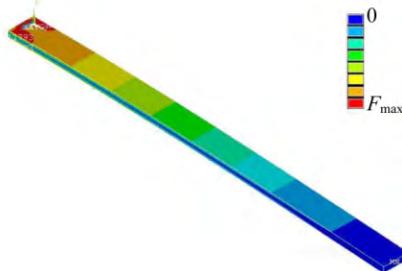


图7 悬臂梁受力分布图

用静力学进行结构仿真,可得悬臂梁在电磁力作用下形变如图8所示。可见,悬臂梁受力时其末端位移量最大,因此宜将此处作为与下方平面磁芯线圈接触的区域,以便于实现微电磁光开关的闭合接通。

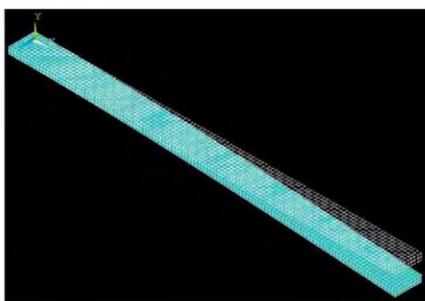


图8 悬臂梁在电磁力作用下形变图

### 3 结束语

角度偏转是光开关实现的一种重要手段,本文基于MEMS体工艺,设计了微电磁反射型光开关原型器件。运用ANSYS有限元模拟与数值计

算等方法分析光开关悬臂梁的受力情况、平面磁芯线圈的电磁场分布以及悬臂梁在电磁力作用下的受力形变状态,提出磁芯线圈匝数、悬臂梁位置、悬臂梁与平面磁芯线圈接触区域结构参量的设计依据。目前,该仿真实验作为本校物理开放性实验教学体系中的研究型实验设计项目,其课程设置充分利用了本校开放实验平台,规避了传统实验教学在时间与空间上的局限,促进了教学资源的共享,推动本科实验教学体系的完善。同时,该实验将当代通信技术与学科专业深度融合,拓展了学生理论知识与实践体验,丰富了教学内容,培养了学生自主学习与创新能力。

### 参考文献:

- [1] 毛谦. 中国光纤通信技术的现状及未来[J]. 电信科学, 2000(1): 25-28.
- [2] 方来付, 张杰, 林绵锋, 等. 新型光开关的研究及其在光网络中的应用[J]. 高技术通讯, 2000, 10(8): 107-110.
- [3] Pease R. Lucent announces first all-optical MEMS-based transport device [J]. 2000, 17(1): 52-54.
- [4] Dellaert D, Doutreligne J. Design and characterization of a thermally actuated latching MEMS switch for telecommunication applications [J]. J. Micro-mech. Microeng., 2014, 24(7): 075022.
- [5] 赵继德, 李应良. 全光网络中的 MEMS 光开关[J]. 激光杂志, 2005, 26(3): 10-12.
- [6] 贾书海, 赵小林, 杨春生, 等. 新型微机电系统光开关研制[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(9): 1468-1471.
- [7] 刘梅刚, 万江文. 全光网络中的 MEMS 光开关研究新进展[J]. 微纳电子技术, 2004, 41(5): 19-23.
- [8] 胡剑, 李刚炎. 基于 MEMS 的光开关技术研究[J]. 半导体技术, 2007, 32(4): 342-344.
- [9] Jia S, Ding G, Zhao X, et al. Novel optic-fiber switches based on the wobble-type MEMS electromagnetic microactuator [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 2(2): 353-358.
- [10] 吴雅苹, 卢奕宏, 柯聪明. 微电磁继电器磁场和力学性质模拟研究[J]. 物理实验, 2017, 37(1): 29-33.
- [11] 吴雅苹, 陈晓航, 吴志明. 基于有限元模拟与数值计算的微电磁继电器结构与性质研究[J]. 物理实验, 2018, 38(8): 9-12.

## Structural design and properties study of micro-electro-optical switch

WU Ya-ping, CHEN Xiao-hang, WU Zhi-ming

(a. Fujian Provincial Key Laboratory of Semiconductors and Applications;

b. Collaborative Innovation Center for Optoelectronic Semiconductors and Efficient Devices,  
Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Based on the working principle of micro-electro-optical switch, the structure of electromagnetic reflection type micro-electro-optical switch was designed. Using ANSYS 9.0 finite element analysis combined with Mathematica numerical calculation method, the electromagnetic force, the field distribution of the core coil, and the deformation state of cantilever beam were studied. Thus, the structural parameters such as the coil turns, the cantilever position and the contact area between cantilever beam and plane magnetic core coil were obtained.

**Key words:** micro-electro-optical switch; core coil; cantilever beam; finite element simulation

[责任编辑:任德香]

## 欢迎订阅 欢迎投稿

《物理实验》创刊于 1980 年,是教育部主管、东北师范大学主办的学术期刊,是教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会的会刊。

《物理实验》主要刊载物理实验成果,交流物理实验教学改革的 new 思想、新方法、新动态。开设的栏目有:聚焦诺贝尔奖,前沿导读,近代与综合实验,普通物理实验,专题(包括竞赛、物理学史、专题实验讲座、国外实验介绍、实验误差、学科教学论、典型实验剖析、实验技术与技巧、问题与讨论等),实验讲坛,互联网+物理,学生园地,基础教育。适合于物理实验工作者,大、中学校的物理教师,理工科的本科生、研究生及教学仪器研制人员阅读。

《物理实验》愿为广大作者提供交流信息的窗口,展示成果的园地,为广大读者提供丰富的精神食粮,为广大仪器生产厂家提供展示成果的舞台。

《物理实验》杂志为月刊,全国各地邮局均可订阅,邮发代号为 12-44。若错过邮局订阅时间,可直接与编辑部联系。

《物理实验》编辑部