

光纤直接耦合微加工型 1 × 2 光开关

晏辉鸣 万 鹏 吴兴坤

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

摘 要 设计研制了一种新型小体积, 低成本的 1 × 2 光纤直接耦合微加工型光开关. 该器件使用电磁微线圈驱动一封装在微加工柔性框架上的活动光纤, 使其对准另两根固定光纤, 实现光路转换. 驱动电压为 5 V, 开关时间小于 2 ms, 插入损耗达到 0.9 ~ 1.1 dB. 器件构造工艺采用了 CNC 雕刻技术和 EDM 技术. 本文剖析了器件损耗, 用有限元软件 ANSYS 分析了器件的磁场和弹簧受力而优化结构设计, 并报告了器件性能测试.

关键词 光开关; 光纤直接耦合; 光纤通信

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

众所周知, 光开关在光网络中起到非常重要的切换光路作用, 它是波分复用光网络中关键设备 (如 OADM/OXC) 的交换核心. 随着光纤通信迅猛发展, 新型光开关成品不断出现, 其中高端产品中以 MEMS (micro-electro-mechanical systems) 光开关最为成熟, 而低端口以传统机械式为主. 目前 MEMS 开关的实现大都是基于硅微加工技术, 通常需使用数十层掩膜的刻蚀技术, 工艺较复杂, 成品率低, 造价较高. 传统机械式具有可靠性好, 通道隔离度高, 低插入损耗等优点, 但成本较高, 且不能扩展为开关阵列. 因而, 如何进一步减少光开关制作成本, 降低其结构、工艺的复杂性, 及提高成品率成为光开关市场化战略的关键.

我们采用光纤直接耦合原理研制了一种新型铝基底 1 × 2 微加工型光开关. 其开关时间小于 2 ms, 插入损耗最小可达 0.9 dB, 回波损耗为 -47 dB. 与现有各类 (使用光纤准直器的非直接耦合) 的光开关相比, 突出优势在于: 1) 成本低, 没有光纤准直器, 微反射镜等光学器件; 2) 工艺简单, 设计新颖, 在非硅基底上采用 EDM 技术和 CNC 雕刻技术, 摆脱了硅的复杂微加工工艺, 成品率高, 能实现大批量生产; 3) 工作行程大, 驱动电压小 (< 5V), 能耗低.

1 器件原理分析

该新型的 1 × 2 单模光开关, 采用了光纤直接耦合原理, 将两对准光纤保持适当间隙, 不仅使输入光纤的信号耦合到输出光纤上, 而且确保光纤微位移以实现信号切换. 因此, 器件插入损耗产生的主要因素有: 1) 菲涅耳反射损耗; 2) 光纤固有传输损耗;

3) 光纤与光纤间的模场失配损耗. 对于菲涅耳反射损耗可通过在光纤光滑端面上镀增透膜等办法降低损耗, 第二种损耗可用挑选高质量光纤的办法加以解决. 第三种损耗是总插入损耗主要因素, 而造成模场失配的主要原因是机械对准误差 (横向误差, 纵向误差, 角度误差), 根据 Nemota 和 Makimoto 导出的单模光纤耦合损耗一般式^[1] (用 dB 表示)

$$L_{SM,ff} = -10 \log \left[\frac{16n_1^2 n_3^2}{(n_1 + n_3)^4} \frac{4\sigma}{q} \exp \left(-\frac{\rho\mu}{q} \right) \right]$$

可得机械对准误差主要计算公式

$$L_s = -10 \log \frac{64n_1^2 n_3^2}{(n_1 + n_3)^4 (G^2 + 4)}$$

$$L_d = -10 \log \left\{ \exp \left[-\left(\frac{d}{\omega} \right)^2 \right] \right\}$$

$$L_\theta = -10 \log \left\{ \exp \left[-\left(\frac{\pi n_2 \omega \theta}{\lambda} \right)^2 \right] \right\}$$

其中, $\rho = (k\omega_1)^2$, $q = G^2 + (\sigma + 1)^2$, $\sigma = (\omega_2/\omega_1)^2$, $k = 2\pi n_3/\lambda$, $G = s/k\omega_1^2$, $\mu = (\sigma + 1)F^2 + 2\sigma FG \sin \theta + \sigma(G^2 + \sigma + 1) \sin^2 \theta$, $F = d/k\omega_1^2$.

式中 L_s, L_d, L_θ 分别表示光纤端面纵向偏移为 s 、横向错位为 d 、角度对准误差为 θ 的损耗, n_1 为光纤纤芯的折射率, n_2 为光纤包层的折射率, n_3 为光纤端面间介质的折射率, λ 为光源的波长, ω_1 为发送光纤的模场半径, ω_2 为接收光纤的模场半径.

理论分析表明, 在没有上述第一种和第二种损耗的情况下, 光纤横向错位 $d \leq 2 \mu\text{m}$, 纵向偏移 $s \leq 80 \mu\text{m}$, 角度误差 $\theta \leq 2^\circ$, 器件插入损耗才可能小于 1 dB.

2 器件设计及制作

器件最初设计结构如图 1 所示, 尺寸大小为 $(31 \times 11 \times 5) \text{ mm}^3$, 器件主体形状选用 CNC (Computerized Numerical Control) 雕刻技术. CNC 雕刻是一项独特的数控加工技术. 其专业优势在于使

用小刀具(刀尖直径可达 0.1 mm)进行了快速铣削,控制系统高效且平稳,可达 3 μm/步. 器件中的铁芯采用了“U”形设计,用以减少漏磁. 此外铁芯和衔铁都是由软磁材质构成,所以磁滞现象可以忽略. 而铝质小滑块底面内凹设计和双簧片设计则分别为了减少摩擦和增加滑块移动的稳定性. 进一步为了减少机械对准误差,用于对准的光纤采用超声波切割机对光纤纤芯进行切割,以保证两对光纤端口的平整. 放置光纤的小槽则使用了高精度对准的“V”型槽,其雕刻过程采用了 EDM (electrical discharge machining) 技术.

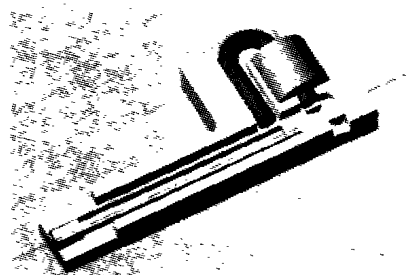


图 1 1×2 光纤直接耦合微加工型光开关
Fig. 1 1×2 micromachining based direct-coupled optical switch

此光开关结构如图 1 所示,当小线圈通电产生磁场,镶嵌在小滑块中间位置的衔铁就受到铁芯吸引,带动滑块移动,受平行四边形柔性框架 (Flexure) 限制和双挡壁定位,确保活动光纤角度不变,从而使输入光纤对准其中一根固定光纤,实现光路转换. 相反,线圈断电时,小滑块则在双簧片回复力作用下回移,使输入光纤对准初始输出光纤. 此器件制作关键在于:1) 滑块与铁芯适当距离内移动. 2) 滑块能自如地被电磁驱动和弹簧回复. 3) 为减少器件的插入损耗根据光纤直接耦合原理,必须保证光纤横向错位 (lateral misalignment), 纵向偏移 (end separation), 角度误差 (angular misalignment) 在要求范围之内. 因此,用于固定光纤的 V 型槽的加工精度和对准精度要求极高.

在实验过程中,发现图 1 器件插入损耗并不够理想,并对结构进行改进,在置放光纤位置激光点焊两个经过校准定位的高精度 V 型槽贴片,再固定光纤得到工作较为理想的 1×2 光开关,如图 2 所示.

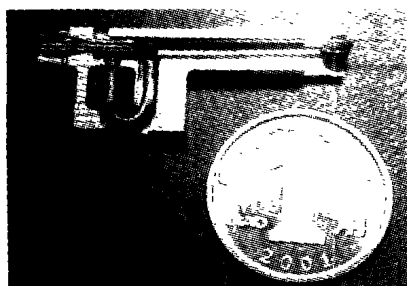


图 2 1×2 光开关的照片
Fig. 2 A photo of the 1×2 fiber optic switch

3 关于器件的理论分析

3.1 驱动系统电磁场分析

为了设计得到 5 V 驱动电压的光纤直接耦合光开关,必须研究低电压下衔铁不同位置受电磁力情况. 我们使用 ANSYS 软件对线圈和衔铁区域进行了有限元分析 (FEA). ANSYS 磁场分析的有限元公式是由磁场的 Maxwell 方程组导出,将标量势、矢量势或边界通量引入 Maxwell 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^[2]. 首先我们采用基于微分标量势法 (DSP) 的 3D 静电磁场进行分析,根据铁芯和线圈对称关系建立了 3D 实体模型 (如图 3),由于不封闭的驱动系统带有空气隙的磁路,所以对一定范围内的空气也进行了建模并加载了远场边界条件.

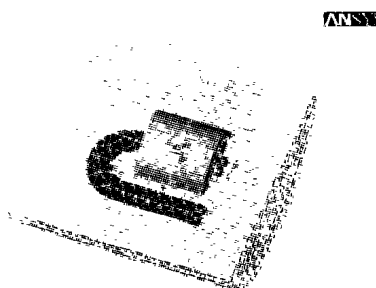


图 3 三维建模并划分网格
Fig. 3 3D modeling and partition mesh

经过 ANSYS 计算,在 5 V 驱动电压下,衔铁和铁芯间隙为 300 μm 时得出了图 4 所示 H 磁通量密度分布状况,也得出了一半衔铁受到小线圈磁场作用力情况如表 1 所示,其中衔铁和铁芯垂直距离方向即 Z 方向,“arm”代表一半衔铁.

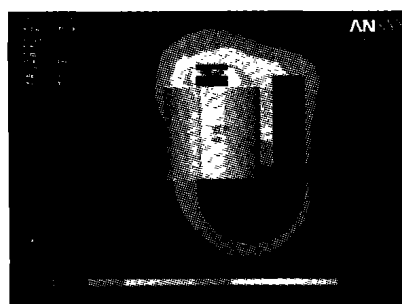


图 4 三维静态场 H 磁通量密度
Fig. 4 3D static magnetic field flux intensity

表 1 ANSYS 计算结果

Component	Force-X/N	Force-Y/N	Force-Z/N
SUMMARY OF FORCES BY VIRTUAL WORK			
arm	0.72705E-04	0.82232E-04	0.81301E-03
SUMMARY OF FORCES BY MAXWELL STRESS TENSOR			
arm	0.88253E-05	-0.40908E-04	0.95192E-03

从中可以得出基于虚功法整个衔铁 Z 方向受力为

1.62602 mN, 基于 MAXWELL 法整个衔铁 Z 方向受力为 1.90384 mN. 进一步, 我们计算了衔铁和铁芯不同间隙下的 Z 方向受力情况, 如图 5 可以看出随着空气间隙缩小, 电磁力增幅越来越大.

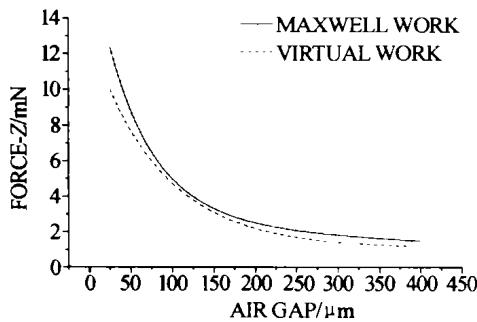


图 5 衔铁 Z 方向受力随空气间隙变化曲线
Fig. 5 The attracting force exerted on flexure as a function of air gap

3.2 弹性框架性能分析

柔性框架双簧片是厚度 0.1 mm、弹性优良的不锈钢, 采用 0.3 mm 直径销钉固定在小滑块上. 考虑到互相平行对称的弹簧悬臂长为 20 mm, 小滑块在 300 μm 以内的偏移. 因此, 将簧片简化为悬臂梁考虑, 根据单个簧片末端的位移关于施加力大小和悬臂长度的函数

$$y(L) = \frac{PL^3}{3EI} \quad (2)$$

式中 L 是簧片的长度, P 是施加的力, I 是梁横截面的转动惯量矩. 对于我们用的不锈钢簧片, 弹性模量 E 为 73 GPa, 又

$$I = ab^3/24 \quad (3)$$

式中 a 是簧片宽度, b 是簧片厚度, 由式(2)、(3)可得

$$P = \frac{ab^3E}{8L^3}y(L) \quad (4)$$

将数据代入式(4)可求得双簧片产生 300 μm 位移至少需要施加 0.684 mN 的力.

研究表明, 在 5V 电压下, 小线圈产生的电磁力足够使双簧片完成 300 μm 位移. 而实验中, 发现在电磁力作用下, 簧片位移在 1 mm 左右也活动自如, 我们认为造成这一现象的重要原因在于, 随着簧片向铁芯靠拢, 其间隙减小, 电磁力急剧增加, 这样造成了簧片的工作行程增大.

4 性能测试

我们使用了 1310 nm 波长的单模输入光源测量了图 3 器件的插入损耗和开关时间, 结果得到插入损耗 0.9 ~ 1.1 dB, 回波损耗 -47 dB, 开关时间小于 2 ms. 图 6 给出了开关响应时间测试结果.

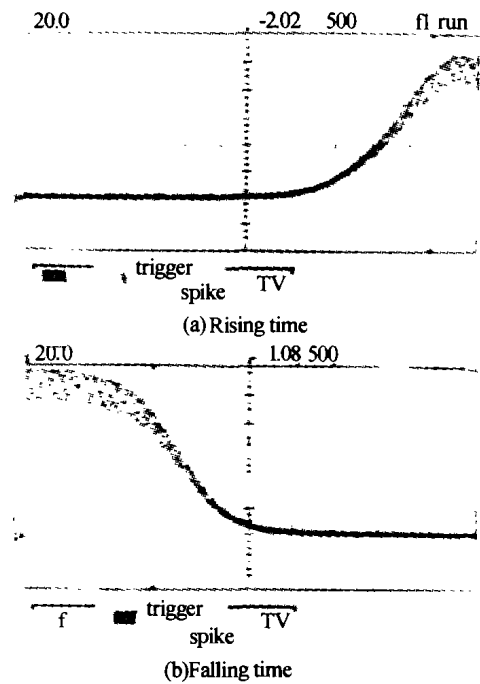


图 6 1 × 2 光开关开关响应
Fig. 6 Switching response of the 1 × 2 optical switch

5 结论

我们研制的 1 × 2 光纤直接耦合微加工型光开关, 采用了 EDM 技术和 CNC 雕刻技术, 经理论分析和优化并对其性能进行了测试. 结果表明, 该器件开关时间小于 2 ms, 插入损耗为 0.9 ~ 1.1 dB, 回波损耗为 -47 dB. 本器件设计新颖, 工艺简单, 成本低, 易于大批量生产, 插入损耗仍有降低到 0.9 dB 以下的潜力.

参考文献

- 1 Nemoto S, Makimoto T. Analysis of splice loss in single-mode fibers using a gaussian field approximation. *Optical and Quantum Electronics*, 1979, **11**(5): 447 ~ 457
- 2 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践. 西安: 西北工业大学出版社, 2001
Wang G Q. Practical numerical simulation techniques by ANSYS. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2001
- 3 Cao Zhonghui, Yuan Ye, Bao Junfeng, et al. A micromechanical variable optical attenuator based on EDM micromachining. *Proc SPIE*, 2002, **4928**: 225 ~ 227
- 4 Field L A, Burriesci D L, Robrish P R, et al. Micromechanical 1 × 2 optical fiber switch. *Sens Actuators*, 1996, **A53**(5): 311 ~ 315
- 5 Hoffman M, Kopka P, Voges E. Bistable micromechanical fiber-optic swithes on silicon with thermal actuators. *Sens Actuators*, 1999, **A78**(11): 28 ~ 35

1×2 Micromachining Based Direct-coupled Fiber Optical Switch

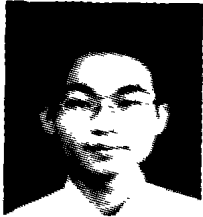
Yan Huiming, Wan Peng, Wu Xingkun

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

Received date: 2003-10-30

Abstract A design of micromachining based 1×2 direct-coupled fiber switch is reported. CNC engraving and EDM techniques were used to fabricate a switch sample where a movable fiber mounted on a micro-machined flexure is driven electromagnetically, and output light beam is directly coupled to two other fiber end surfaces; the switch features a low driven voltage (5 V), fast switch (< 2 ms) and low insertion loss (0.9 ~ 1.1 dB). In the course of design a FET software package ANSYS was used to analyze the distribution of magnetic field in the switch and associated force exerted on flexure to optimize the switch configuration. An experimental result including switch response time, back reflection and insertion loss was presented.

Keywords Optical switch; Direct couple; Fiber-optic communication



Yan Huiming received his B. E. degree from Zhejiang University in 2002 and is currently pursuing the M. E. degree in optical engineering at Zhejiang University. His research interest is in the field of fiber-optic devices.