

文章编号: 0253-2239(2004)03-364-5

一种新型微机电系统可调光衰减器

袁 野 邹勇卓 鲍俊峰 曹钟慧 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: 一种新型的低成本、小体积的电磁驱动微机电系统可调光衰减器,可用于密集波分复用系统中各信道的动态增益平衡。该器件采用电磁线圈驱动绕 100 微轴转动的微反射镜,运动部件行程极小。驱动电压为 0~8 V,工作范围 0~35 dB,动态响应时间小于 2 ms,插入损耗小于 0.8 dB,回波损耗小于 -50.5 dB。器件采用微细电火花加工技术制作,加工精度为微米量级,技术成熟,工艺简单,易于批量生产。采用有限元分析软件 ANSYS 对器件的结构建模,对电磁场及衰减曲线进行了理论分析,并与实测数据进行了比较,得出了相当满意的结果。

关键词: 光纤通信技术; 可调光衰减器; 微机电系统; 电火花加工; 密集波分复用

中图分类号: TN253 文献标识码: A

A Novel Variable Optical Attenuator Based on Micro-Electromechanical System (MEMS)

Yuan Ye Zou Yongzhuo Bao Junfeng Cao Zhonghui Wu Xingkun

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

(Received 9 January 2003)

Abstract: A novel variable optical attenuator based on micro-electromechanical system is reported. The variable optical attenuator employs a low-cost simple structure design, capable of fast dynamic response (<2 ms), wide dynamic range (0~35 dB), low return loss (<-50 dB) and wide bandwidth. By utilizing precise electrical-discharge machining as an enabling technology, the design incorporates an electro-magnetically actuated silicon mirror rotating around a 100 μ m shaft and a miniature driven coil. The attenuation response is compared with the calculated result from a numerical theoretical model by using ANSYS, a finite element analysis software package, and a reasonably good agreement was obtained. The variable optical attenuator is scalable to a discrete array to implement dense wavelength division multiplexing channel equalization in various networking devices.

Key words: optical fiber communication technology; variable optical attenuator; micro-electromechanical system (MEMS); electrical discharge machining; dense wavelength division multiplexing (DWDM)

1 引 言

随着光纤通信系统的广泛应用,可调光衰减器 (VOA)成为光纤通信系统中的一种重要的光纤无源器件,主要用于密集波分复用 (DWDM) 系统中各

信道的功率平衡,实现增益平坦、动态增益平衡及传输功率均衡。目前市场上可调光衰减器价格昂贵,成为光纤通信系统普及的障碍之一。现有可调光衰减器的实现方式主要包括机械型、阵列波导型、液晶型,和微机电系统 (MEMS) 型等^[1~4]。而微机电系统技术由于具有造价低廉,结构紧凑,易于批量生产等优点,受到普遍重视,但是仍需解决其驱动电压过高,工艺复杂,成品率低的缺点。

E-mail: yuanye_2000@hotmail.com

收稿日期: 2003-01-09

由此我们设计、研制了一种基于微细电火花加工(EDM)技术^[5]的微机电系统可调光衰减器,相比现有的各种可调光衰减器,其突出的优点在于:工作范围宽(0~35 dB),插入损耗低(<0.8 dB),回波损耗小(<-50.5 dB),响应速度快(<2 ms),低电压驱动(0~8 V)。与硅基微机电技术^[6]相比,工艺简单,成品率高。而与步进电机型可调光衰减器^[7]相比,结构大为简化,成本低,响应速度快且连续可调。

2 器件原理及结构

器件照片如图 1 所示,其外形尺寸仅为 20 mm×10 mm×7mm。器件运动部件由 L 型软磁材质摆杆、 $\phi 100 \mu\text{m}$ 的微轴和轴承构成。铝制基板中部由电火花加工成微型 V 型槽,用以固定微轴和轴承,其配合精度高达 $1 \mu\text{m}$ 。一端开不穿透的圆孔,用以放置带软磁铁芯的电磁线圈,作为器件驱动部分。摆杆的底端焊接固定在微轴上,微反射镜(1.5 mm×1.5 mm)焊接在摆杆中部,摆杆另一端悬空于电磁线圈铁芯上部。位于 V 型槽和电磁线圈之间的弹簧,一端焊接在基板上,另一端与摆杆焊接固定,用于提供抗衡电磁力的回复力。输入及输出准直器固定在基板上,输入信号经过微反射镜反射后由输出准直器输出。图 2 为可调光衰减器的分解图,其中可以清楚地看到微轴与轴承和摆杆的组合方式,图 3 为微轴与轴承和由电火花技术加工的 V 型槽照片。

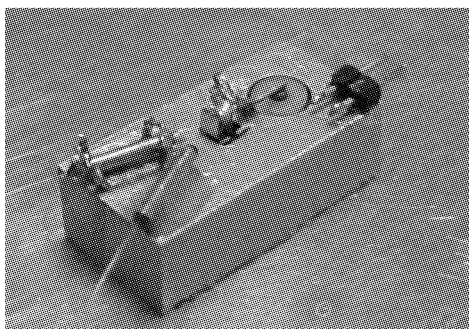


Fig. 1 Photograph of the micro-electromechanical systems variable optical attenuator

当电磁线圈加载直流电压时,线圈的铁芯被磁化,对悬空在线圈上边的软磁质摆杆产生吸引力。摆杆同时受到磁场力和弹簧回复力的作用,最终摆动一定的角度而达到平衡位置,微反射镜角度随之改变,造成了输入光纤准直器与输出光纤准直器之间的耦合效率降低,从而达到光信号衰减的目的。线圈加载的电压越高,铁芯对摆杆的吸引力就越强,这使得微反射镜的摆动角度与线圈加载电压呈一

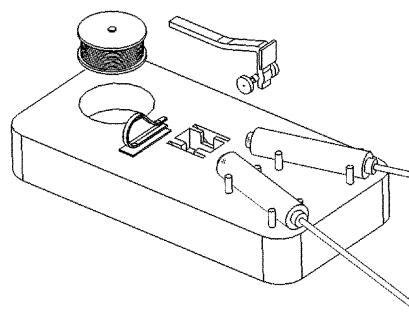


Fig. 2 Exploded view of the micro-electromechanical systems variable optical attenuator

对应关系。所以,通过调节线圈加载电压的大小,可实现光信号的可调衰减。当加载电压撤销时,由于铁心与摆杆均由软磁材质构成,磁滞现象可以忽略,所以摆杆仅受到弹簧回复力的作用,迅速地回到初始位置,而光信号的衰减也迅速回到最小状态。

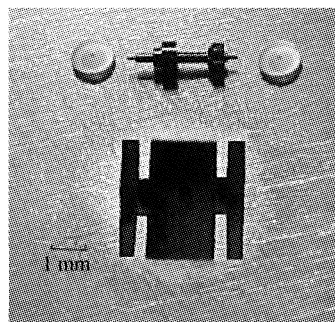


Fig. 3 Photograph of the V-groove, bearings and pivoting axis

3 理论分析

3.1 光纤准直器的衰减曲线

我们使用的是 Mini C-lens 型(Fujian JDSU CASIX, INC. Part #: CLS-250-0550-20-FC/PC-M)单模光纤准直器,直径 1.4 mm。由于无法获得此类准直器透镜的详细参量,因此我们采用了对实际测量结果进行曲线拟合的方法,分别确定了这种准直器的平移失配和角度失配与衰减量的关系,并进行了多项式函数拟合。图 4 为测量结果与拟合曲线的比较。

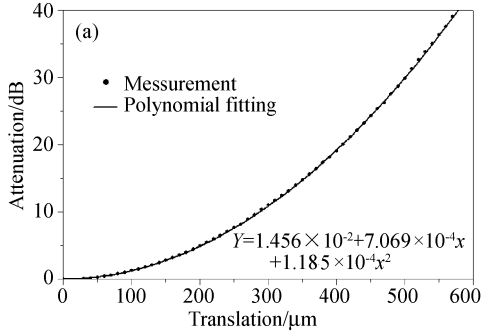
衰减与平移的拟合函数为

$$\delta_1(d) = 1.456 \times 10^{-2} + 7.069 \times 10^{-4} d + 1.185 \times 10^{-4} d^2, \quad (1)$$

其中 d 为平移量,单位 μm , $\delta_1(d)$ 为平移引起的衰减,单位为 dB。

衰减与角度的拟合函数为

$$\delta_2(\alpha) = 0.2219 - 622.0\alpha + 7.786 \times 10^4 \alpha^2 + 1.380 \times 10^7 \alpha^3 - 8.154 \times 10^9 \alpha^4 + 3.155 \times 10^{11} \alpha^5, \quad (2)$$



其中 α 为角度偏移量, 单位为 rad, $\delta_2(\alpha)$ 为角度引起衰减量, 单位为 dB。

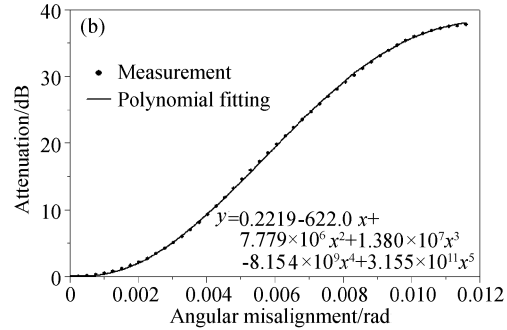


Fig. 4 Misalignment sensitivity of C-lens collimator

当微反射镜摆动时, 引起的衰减是上述两种衰减效应的叠加, 即

$$\delta(\varphi) = \delta_1(d) + \delta_2(\alpha), \quad (3)$$

其中 φ 为微反射镜转动的角度, 实际上 φ 与 d 和 α 的关系是由可调光衰减器的几何尺寸确定的, 在我们的器件中,

$$d = 10000\varphi, \quad (4)$$

$$\alpha = 2\varphi, \quad (5)$$

将(4)式、(5)式代入(3)式, 可以得到微反射镜摆动角度与衰减的函数关系:

$$\delta(\varphi) = 0.2365 - 1.237 \times 10^3 \varphi + 3.123 \times 10^6 \varphi^2 + 1.104 \times 10^8 \varphi^3 - 1.305 \times 10^{11} \varphi^4 + 1.010 \times 10^{11} \varphi^5. \quad (6)$$

3.2 弹簧性能分析

我们从材料力学的角度对弹簧进行分析, 得出弹簧力与摆杆摆动角度之间的关系。该器件使用的弹簧可以看作一个圆弧型的簧片, 材料为磷青铜。越过具体的力学分析过程, 我们直接给出弹簧与摆杆接触点的形变 $\sigma(F)$ (单位为 m) 与弹簧受力 F (单位为 N) 的积分公式^[8]:

$$\sigma(F) = \int_{\Delta\beta}^{\beta} \frac{F \cdot \cos(\omega)^2 \cdot R}{G \cdot A} + \int_{\Delta\beta}^{\beta} \frac{F \cdot R \cdot [\cos(\Delta\beta) - \cos \omega]^2}{G \cdot I} d\omega, \quad (7)$$

展开后可以得到

$$\begin{aligned} \sigma(F) = & \frac{3\pi F R}{4 G \cdot A} + \frac{1}{2} F \cdot R \frac{[\cos(\Delta\beta) \cdot \sin(\Delta\beta) + \Delta\beta]}{G \cdot A} + \\ & \frac{1}{4} F \cdot R^3 \frac{[6\pi \cdot \cos(\Delta\beta)^2 + 8 \cdot \cos(\Delta\beta) + 3\pi]}{G \cdot I} + \\ & \frac{1}{2} F \cdot R^3 \frac{[2 \cdot \cos(\Delta\beta)^2 \cdot \Delta\beta - 3 \cdot \cos(\Delta\beta) \cdot \sin(\Delta\beta) + \Delta\beta]}{G \cdot I}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $A = bh$, $I = bh^3/12$, 圆弧半径 $R = 1.25$ mm, 簧片的厚度 $h = 30$ μm , 宽度 $b = 100$ μm 。材料力学手册^[8]中查得磷青铜的杨氏模量 $G = 105$ kN/mm^2 ^[8]。圆弧角度 $\beta = 270^\circ$, $\Delta\beta$ 为弹簧受力形变后圆弧角度的变化, 在弹簧形变很小, 精度要求不高的情况下, $\Delta\beta$ 与 β 相比可以忽略不计, 可令 $\Delta\beta = 0$ 。将上述数据代入(8)式可得

$$\sigma(F) = 0.4721F, \quad (9)$$

可见在可调光衰减器的工作范围内, 弹簧形变与受力的关系可以近似为线性的。

3.3 电磁线圈磁场分析

进一步, 我们使用 ANSYS 软件对线圈磁场进行有限元分析(FEA), 并计算了不同电压下摆杆所受的电磁力, 给出了电压与电磁力关系的拟合曲线。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^[9]。我们采用了基于磁矢量势法的二维静态磁场分析, 建立了二维实体模型, 由于线圈未构成完整磁回路, 所以我们为周围较大范围内的空

气建模,加载了磁力线平行边界条件,以正确反映磁漏现象。

图 5 给出了有限元分析所得的离散点结果以及拟合曲线。

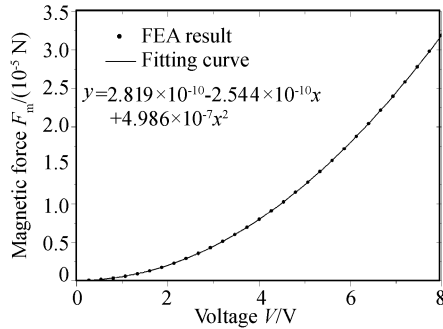


Fig. 5 Finite element analysis (FEA) of magnetic coil

由此可得磁场力 $F_m(V)$ 与电压 V 的拟合函数为

$$F_m = 2.819 \times 10^{-10} - 2.544 \times 10^{-10}V + 4.986 \times 10^{-7}V^2. \quad (10)$$

3.4 综合分析

不考虑摆杆自身质量,当摆杆受力平衡时,作用在摆杆上的弹簧力的力矩和磁场力的力矩大小相等,弹簧力力臂设计为 2.3 mm,磁场力力臂为 4.5 mm,即

$$2.3F_m = 4.5F, \quad (11)$$

而弹簧形变 $\sigma(F)$ 与微镜摆动角度 φ 的关系为

$$\sigma(F) = 2.3 \times 10^{-3} \varphi, \quad (12)$$

综合(9)式~(12)式,可以得出驱动电压与微镜摆动角度的函数公式,再代入(6)式,最后可以得到驱动电压 V 与可调光衰减器衰减量的理论函数关系:

$$\begin{aligned} \delta(V) = & 0.6564 + 6.458 \times 10^{-5}V - \\ & 0.1266V^2 - 3.339 \times 10^{-5}V^3 + \\ & 3.272 \times 10^{-2}V^4 - 1.811 \times 10^{-7}V^5 + \\ & 1.183 \times 10^{-4}V^6 + 2.921 \times 10^{-8}V^7 - \\ & 1.431 \times 10^{-5}V^8 - 2.892 \times 10^{-10}V^9 + \\ & 1.134 \times 10^{-7}V^{10}, \end{aligned} \quad (13)$$

4 性能测试与分析

我们对本文讨论的器件进行了驱动电压与衰减关系的测试,测试波长 $\lambda = 1550$ nm。图 6 显示测试结果与理论分析曲线的对比。由图可知对应于驱动电压 0~8 V,工作范围在 0~35 dB 之间。

在低电压 (< 4 V) 时,理论计算结果小于实测衰减量,这主要是由封装时带来的插损引起,实际测

得器件插损为 0.8 dB,大于准直器本身的插损 (0.5 dB)。高电压 (> 4 V) 时,理论计算结果大于实测衰减量,这主要是由于轴和轴承间的摩擦力,以及封装时的配合误差,使得一定电压可获得的衰减量减小。考虑到电磁微机电系统结构分析的复杂性以及理论分析模型中使用了理想化的弹性材料,并忽略了微轴的摩擦力,此理论分析给出了与实测数据相当一致的结果。

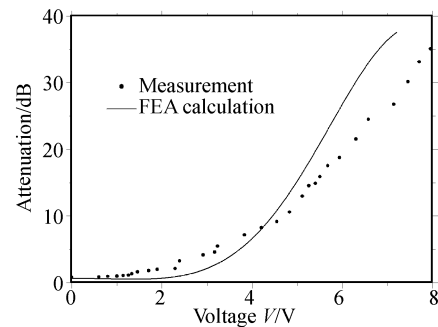


Fig. 6 Comparison between measurement and finite element analysis (FEA) calculation

进一步,我们使用宽带光源对器件在不同的衰减量时进行宽带响应测试,结果如图 7 所示,可见在 1530~1570 nm 波长范围内,具有相当平稳的衰减曲线,这使得本器件适用于密集波分复用系统中。

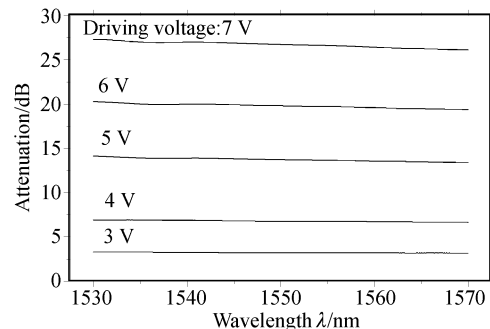


Fig. 7 Broadband characteristics of variable optical attenuator

图 8 为可调光衰减器动态响应测试,输入驱动

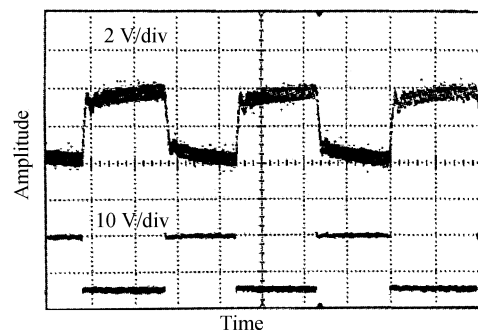


Fig. 8 Dynamic response of variable optical attenuator

脉冲为周期 20 ms 的方波,由图可知,可调光衰减器的衰减动态响应时间在 2 ms 以内。响应时间主要受到内部摩擦力,封装精度的影响,本器件制作工艺简单,运动部件行程极小,所以响应时间较短。

最后我们使用 AV6332 型回波损耗测试仪(信息产业部电子 41 研究所)测试了器件的回波损耗,为 -50.5 dB,插入损耗为 0.8 dB。

结论 我们设计研制了一种基于电火花微细加工技术(EDM)的微机电系统可调光衰减器,衰减响应时间小于 2 ms,插入损耗小于 0.8 dB,回波损耗 -50.5 dB,工作范围 0~35 dB。这种衰减器利用独特设计,并使用电火花技术取代硅基微加工技术,具有成本低,工艺简单,易于批量生产的特点。在后续文章中,我们将进一步分析其动态特性及结构优化。

参 考 文 献

- 1 Armand Neukermans, Rajiv Ramaswami. MEMS technology for optical networking applications. *IEEE Communications Magazine*, January 2001. 62~69
- 2 Giles C R, Aksyuk V, Barber B *et al.*. A silicon MEMS optical switch attenuator and its use in lightwave subsystems. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 1999, **5**(1):18~25
- 3 Xiang Jinshan, Chen Bo, Huang Hezhen. Analysis on attenuation of light-blocked attenuator. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **29**(12):1071~1074
- 4 Cao Zhonghui, Yuan Ye, Bao Junfeng *et al.*. A micromechanical variable optical attenuator based on EDM micromachining. *Proc. SPIE*, 2002, **4928**:225~227
- 5 Takahata K, Gianchandani Y B. Batch mode micro-electrodischarge matching. *J. Microelectromech. Syst.*, 2002, **11**(2):102~110
- 6 Zhao Xiaolin, Li Wenjun, Zhou Guangya *et al.*. Design of electromagnet moving-MEMS variable optical attenuator. *Microfabrication Technology* (微细加工技术), 2000, (4):60~67 (in Chinese)
- 7 Ma Kun, Sun Liping. A minitype variable optical attenuator based on stepping motor control technology. *Optical Fiber Communication Technology* (光纤通信), 2002, (3):19~21 (in Chinese)
- 8 Liu Hongwen. *Mechanics of Material* (材料力学). Beijing: Higher Education Press, 1979 (in Chinese)
- 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)