

一种 MEMS 可调光衰减器性能测试及动态响应分析

袁野 曹钟慧 鲍俊峰 邹勇卓 吴兴坤

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

摘要 一种基于微细电火花加工(EDM)技术的非硅基 MEMS 可调光衰减器, 以电磁线圈驱动微反射镜. 本文介绍该器件特性测试及动态响应分析, 结果表明, 驱动电压为 0~8 V, 工作范围 0~35 dB, 动态响应时间为 2 ms, 插入损耗小于 0.8 dB, 回波损耗小于 -50.5 dB.

关键词 微机械(MEMS); 可调光衰减器(VOA); 电火花加工(EDM); 动态响应

中图分类号 253 **文献标识码** A

0 引言

可调光衰减器(VOA)是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. 近年来, 利用微机械技术制造的 MEMS 可调光衰减器开辟了光衰减器设计及生产的新方法. 与传统的光衰减器相比, MEMS 可调光衰减器具有造价低廉、结构紧凑、易于批量生产等优点, 受到普遍重视^[1].

目前, 国际上对 MEMS 可调光衰减器的研究报道大部分都是基于硅微加工技术实现, 以静电力驱动^[2-4]. 其主要缺点为, 在目前的技术条件下, 硅微加工技术工序复杂, 通常使用多层掩膜的刻蚀过程, 成品率低, 静电驱动所需工作电压过大. 对于采用准直器耦合光束的 MEMS 可调光衰减器, 由于受准直器本身尺寸限制, 器件尺寸实际在毫米量级, 精度为微米量级. 除硅微加工技术外, 还有其他几种微加工方法可以达到器件制作工艺要求^[5,6]. 本文报道一种基于微细电火花加工(EDM)技术的电磁驱动 MEMS 可调光衰减器, 其主要优点是: 工艺简单、成品率高、且驱动电压低(0~8 V), 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).

1 器件原理与结构

器件照片如图1所示, 其外形尺寸仅为 20 × 10 × 7 mm³. 该衰减器由基板、输入及输出准直器、电磁驱动线圈以及运动部件组成, 运动部件由 L 型软磁材质摆杆、微反射镜、 $\phi 100 \mu\text{m}$ 的微轴和轴承构成. 图2为该衰减器的爆炸图, 显示微轴与轴承和摆杆的组合方式, 其中微轴和轴承的配合精度达 0.5 μm .

带软铁芯的电磁线圈放置于不穿透的圆孔中, 作为器件驱动装置. 微反射镜(1.5 × 1.5 mm²)焊接在摆杆中部, 摆杆的一端焊接固定在微轴上, 另一端悬于电磁线圈铁芯上部. 弹簧焊接于微结构与基板之间, 提供抗衡电磁力的回复力. 输入信号经过微反射镜反射后由输出准直器输出. 当线圈不加载电压时, 摆杆处于原始位置, 微反射镜角度使输入准直器的光束耦合至输出准直器, 衰减量最小. 电磁线圈加载直流电压时, 线圈产生的磁场吸引线圈上方的摆杆. 摆杆同时受磁场力力矩与弹簧回复力力矩的作用, 向下摆动一定角度, 导致光束耦合效率降低, 衰减量加大. 通过改变线圈加载电压可以精密调节摆杆摆动角度, 实现入射光的可调衰减.

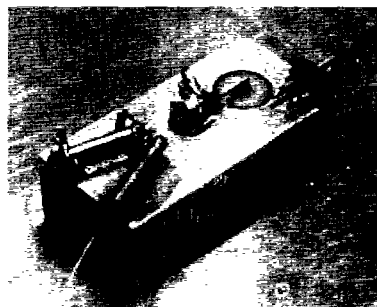


图1 MEMS 可调光衰减器照片
Fig. 1 Photograph of the MEMS VOA

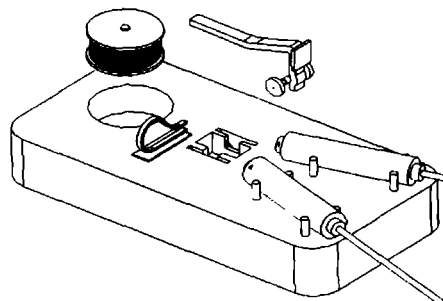


图2 MEMS 可调光衰减器爆炸视图
Fig. 2 Exploded view of the MEMS VOA

我们采用微细电火花加工(EDM)技术来加工铝基板上的微结构. 图3为微轴与轴承和微结构照片及微结构示意图. EDM 技术是一项非常成熟的金属加工技术, 可应用于任何电导材料的加工, 包括钢

铁、石墨、硅和磁性材料甚至永磁体。EDM 技术使用一次成型模具,可批量生产各种微型结构,从而大幅度降低生产成本,提高成品率。

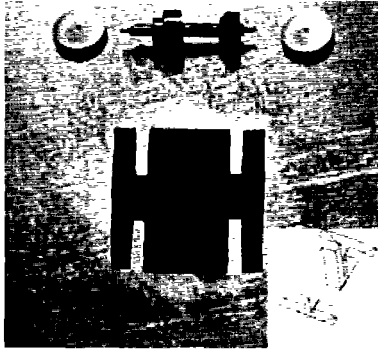


图3 微结构,轴承和轴照片及微结构示意图
Fig. 3 Photograph of the microstructure, bearings and pivoting axis and Schematic drawing of the microstructure

2 性能测试与理论分析

2.1 器件衰减特性分析

从材料力学^[7]的角度分析可得出弹簧力与摆杆摆动角度之间的关系。在本器件中使用的弹簧材料为磷青铜,圆弧型弹簧形变与受力的关系可以近似为线性的。我们使用 ANSYS 软件对微机械机构磁场进行有限元分析 (FEA), 计算了不同电压下摆杆所受的电磁力, 得到了电压与电磁力的关系式。ANSYS 磁场分析将磁场标量势、矢量势引入 Maxwell 方程组, 得出有限元分析的方程组。由于机构有未完全封闭的磁路, 有不可忽略的磁漏, 因而必须对有关元件及其周围空气建模, 同时在远处应用磁力线平行的边界条件^[8]。

综合有限元分析与弹簧分析的结果, 得到驱动电压 V 与 VOA 衰减量的函数关系, 分析过程将另文详细叙述, 这里给出最后的公式

$$\begin{aligned} \text{Loss}(V) = & 0.6564 + 0.4573 \cdot 10^{-5} V - 0.12655 \cdot \\ & V^2 - 3.3386 \cdot 10^{-5} V^3 + 3.2716 \cdot 10^{-2} V^4 - 1.81066 \cdot \\ & 10^{-7} V^5 + 1.18288 \cdot 10^{-4} V^6 + 2.9214 \cdot 10^{-8} V^7 - \\ & 1.43139 \cdot 10^{-5} V^8 - 2.89245 \cdot 10^{-10} V^9 + 1.13376 \cdot \\ & 10^{-7} V^{10} \end{aligned} \quad (1)$$

对驱动电压与衰减关系在 1550 nm 进行测试, 图 4

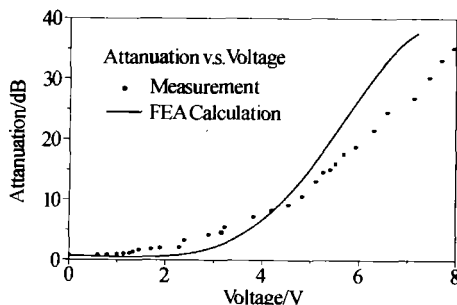


图4 测试结果与理论计算结果比较
Fig. 4 Comparison between measurement and calculation

显示测试结果与理论分析曲线的对比。由图可见, 对应于驱动电压 $0 \sim 8$ V, 工作范围在 $0 \sim 35$ dB 之间, 插入损耗 < 0.8 dB。

2.2 器件动态响应特性的测试与分析

动态响应特性是指当器件衰减量受到电压脉冲驱动时的改变。我们用周期 10 ms 的矩形波驱动衰减器, 在不同驱动电压下, 取得了不同衰减量下的器件动态响应数据。图 5 为器件动态响应测试结果。由图可知, 衰减器的响应速度为 $1 \sim 2$ ms, 在达到稳定状态前, 衰减量有震荡过程。在高衰减量时, 衰减器输出较弱, 测量仪器的噪声对结果影响较大, 所以工作曲线不够平滑, 上述震荡现象不能清晰观察到, 与衰减器本身无关。器件加载电压由 0 上升到 V 的时候, 摆杆突然受到线圈电磁力的吸引, 向下摆动, 弹簧则被压缩与电磁力抗衡, 这个过程可用如下方程描述为

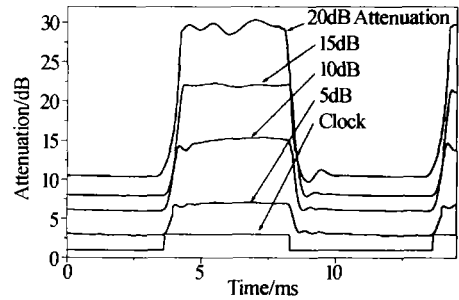


图5 衰减器动态响应
Fig. 5 Dynamic response of the MEMS VOA

$$M = \beta J = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (2)$$

式中, β 为摆杆角加速度, 单位 (radian/s^2), θ 为摆杆摆动角度, 单位 (radian). $J = 1.4419 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 为摆杆的转动惯量, M 为摆杆所受到的合力力矩, 单位 ($\text{N} \cdot \text{m}$), 而又有

$$M = M_e + M_r + M_s \quad (3)$$

式中 M_e 为电磁力力矩, M_r 为阻力力矩, M_s 为弹簧力力矩, 公式为

$$M_s = -k \cdot \theta \quad (4)$$

式中 $k = 4.8715 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}/\text{radian}$ 为弹簧弹性系数, 由结构分析给出。综合式 (2)、(3)、(4) 可得

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + k\theta = M_e + M_r \quad (5)$$

由于运动部件行程极小, M_e 仅与线圈外加电压有关, 而与摆杆位置无关。方程 (5) 描述了一个阻尼振动过程, 外加电压恒定情况下, M_e 决定了摆杆平衡位置, 当摆杆处于平衡位置时, 有

$$M_e = k\theta_0 \quad (6)$$

θ_0 为摆杆达到平衡位置时的角度。 M_r 为阻尼因子, 由于微机械机构的复杂性, 各种阻尼因子较难得知。

忽略阻尼因子的存在,令 $M_f = 0$ 则方程(5)变为一个简谐振动过程,然后通过实际测量数据作为一级近似对阻尼因子进行估算. 在图 5 中观察到,摆杆的振动在 1~2 个周期内就会消失,于是可估算阻尼系数 γ 与理想简谐振动角频率的比例. 方程(5)确定的理想简谐振动角频率 ω_0 为

$$\omega_0 = \sqrt{k/J} = 5812.4471 \text{ radian/s} \quad (7)$$

加入阻尼系数 γ 后,其振动方程为

$$\theta = \theta_0 - \theta_0 e^{-\gamma t} \cos(\omega t + \phi) \quad (8)$$

$t=0$ 时, $\theta=0$, 所以 $\phi=0$. 通过式(8)可以得知,如果希望在 1~2 个周期内使振动基本消失,则 γ 至少应大于 $\omega_0/3$. 而振动角频率 ω 为

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 + \gamma^2} \quad (9)$$

所以, $\gamma \approx 2500 \text{ radian/s}$, $\omega = 5247 \text{ radian/s}$, 由此可知振动周期 $T = 2\pi/\omega = 1.19 \text{ ms}$, 可见响应时间大致为 1~2 个振动周期即 1~2 ms.

测量了所使用的光纤准直器间的耦合效率与角度失配和平移失配之间的关系,并分别做出了拟合函数,最后给出了摆杆摆动角度与信号衰减量之间的函数关系,分析过程另文已有详细叙述,这里仅给出最后的公式

$$\text{Loss}(\theta) = 0.23647 - 1.23689 \cdot 10^3 \theta + 3.12329 \cdot 10^6 \theta^2 + 1.10368 \cdot 10^8 \theta^3 - 1.304597 \cdot 10^{11} \theta^4 + 1.00962 \cdot 10^{11} \theta^5 \quad (10)$$

将式(8)代入式(10),可得衰减器动态响应的公式,图 6 为器件动态响应实验数据与理论曲线的比较. 由图 6 可知,理论动态响应时间与实际值大致相同,理论曲线震荡幅度大于实测数据. 此分析不涉及不同的衰减量的响应时间,而试验数据表明,响应时间与衰减量联系不大. 考虑到微机械器件内部诸多未知因素,很多阻尼因子很难考虑,这个分析与测试结果相当一致.

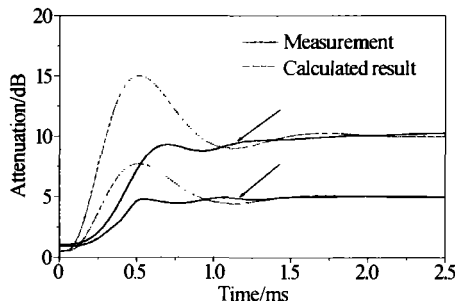


图 6 衰减器动态响应实验数据与理论曲线比较
Fig. 6 Analysis and measurement of VOA dynamic response

2.3 器件其他特性测试

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, C-band 中的波长相关性小于 0.5 dB, 这使得本器件适用于 DWDM 系统中. 器件的回波损耗实测为 -50.5 dB (信息产业部电子 41 研究所 AV6332 型回波损耗测试仪), 插入损耗为 0.8 dB, 偏振相关性为 0.6 dB.

3 结论

利用微细电火花加工 (EDM) 技术, 制作了一种非硅基低电压驱动 MEMS 可调光衰减器, 并对器件特性进行了测试和分析. 结果表明, 该器件衰减响应时间约为 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. 本器件设计独特、结构简单、成本低廉、易于批量生产.

参考文献

- 1 Armand N, Rajiv R. MEMS technology for optical networking applications. *IEEE Communications Magazine*, 2001, 39(1): 62-69
- 2 Giles C R, Aksyuk V, Barber B. A silicon MEMS optical switch attenuator and its use in lightwave subsystems. *IEEE J of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, 5(1): 18~25
- 3 Joseph E F, James A W, Dennis S G, et al. Micromechanical fiber-optic attenuator with 3 response. *J of Lightwave Tech*, 1998, 16(9): 1663~1670
- 4 Li Q, Amy A, Lin C H, et al. An efficient all-fiber variable optical attenuator via acoustooptic mode coupling. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(11): 1563~1565
- 5 Cao Z H, Yuan Y, Bao J F, et al. A micromechanical variable optical attenuator based on EDM micromachining. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4928: 225~227
- 6 Takahata K, Gianchandani Y B. Batch mode micro-electrodischarge matching. *J of Microelectromech Syst*, 2002, 11(2): 102~110
- 7 刘鸿文. 材料力学. 北京: 高等教育出版社, 1979
Liu H W. *Mechanics of Material*. Beijing: Higher Education Press, 1979
- 8 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: Xibei Technical Press, 2001

Measurement and Dynamic Response Analysis on a MEMS Variable Optical Attenuator

Yuan Ye, Cao Zhonghui, Bao Junfeng, Zou Yongzhuo, Wu Xingkun

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

Received date: 2003-05-16

Abstract A novel non-silicon based MEMS variable optical attenuator (VOA) is reported. The VOA is comprised of an EDM micro-machined MEMS structure, in which a miniature mirror is driven electro-magnetically to adjust desired attenuation continuously. The device features an attenuation ranging from 0 to 35 dB corresponding to a controlling voltage of 0 ~ 8 V. A response time of 2 ms was measured for the working range and a theoretical analysis of the VOA dynamic response was conducted. A reasonable agreement was obtained between measurement and calculated response time.

Keywords MEMS; Variable Optical Attenuator; EDM; Dynamic Response



Yuan Ye was born in 1979 and received his Bachelor Degree in Optical Engineering Department from Zhejiang University in 2000. He is carrying out his M. S. research including micro-machining based optical attenuators and switches.