

超小型非硅基微机械可调光衰减器

万 鹏¹ 袁 野² 吴兴坤¹

(1 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)

(2 华信邮电咨询设计研究院有限公司, 传输设计研究院, 传输设计研究所, 杭州 310014)

摘 要 研制了一种新型的超小型电磁驱动微机械可调光衰减器(VOA)。该器件采用电磁驱动器转动硅基微镜改变光路实现可调衰减, 在结构上采用了全磁性回复, 完全摆脱了通常的弹性回复造成的部件疲劳、零点偏移等器件重复性问题。驱动电压为 0~5 V, 工作范围 0~40 dB, 插入损耗小于 0.8 dB, 回波损耗小于 -50 dB。器件重要部件采用微细电火花加工(EDM)技术制作, 并应用 FEA 软件进行了结构优化, 对衰减响应进行了详尽的理论分析。该 VOA 设计体积仅为 $25 \times 10 \times 7 \text{ mm}^3$, 可构成阵列应用于波分复用(WDM/DWDM)系统中各信道的动态信号平衡或网络保护。

关键词 光纤通信技术; 可调光衰减器(VOA); 微机械(MEMS); 电火花加工(EDM); 密集波分复用(DWDM)

中图分类号 TN253 文献标识码 A

0 引言

可调光衰减器(VOA)是智能化光网络中的一种重要的光纤无源器件, 是组成光放大器的关键部件, 在光纤通信系统中起到功率平衡的关键作用, 并可用于波分复用(WDM/DWDM)系统的信道增益平衡和器件保护^[1]。可调光衰减器的实现方法目前包括机械型, 波导型, 液晶型, 和微机械(MEMS)型等。其中波导型与液晶型可调光衰减器尚处于实验室研发阶段, 商用产品极少。机械式可调光衰减器发展最成熟, 已经商业化, 然而其体积较大, 结构复杂。MEMS 可调光衰减器性能可靠, 结构紧凑, 造价低廉, 易于批量生产, 具有广泛的发展前景。然而目前的 MEMS 光衰减器的研究多为基于硅微加工技术实现, 主要缺点为工艺复杂, 需利用体硅及表面硅加工技术和牺牲层技术进行多次蚀刻, 成品率低, 且多利用静电驱动, 驱动电压过大^[2~4]。

设计并制造了一种超小型非硅基 MEMS 可调光衰减器, 采用电磁驱动, 基于成熟的微细电火花加工(EDM)技术^[5]加工, 既具有 MEMS 可调光衰减器结构紧凑, 易于批量生产的特点, 又保留了机械式可调光衰减器工艺成熟的优势, 且具有高稳定性, 高线性度, 低损耗, 速度快等优点。

1 器件原理及结构

器件照片如图 1, 其封装外形尺寸仅为 $25 \times 10 \times 7 \text{ mm}^3$ 。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。采用软磁质摆杆的主要目的在

于, 尽可能减小摆杆中的磁滞效应, 提高摆杆运动的灵敏度及工作的稳定性。芯片基板为铝制, 中部由 EDM 加工成微型 V 型槽, 用以固定微轴和微轴承^[5], 其配合准确度高达 $1 \mu\text{m}$ 。采用微细电火花加工(EDM)技术来加工铝基板上的微结构。图 2 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

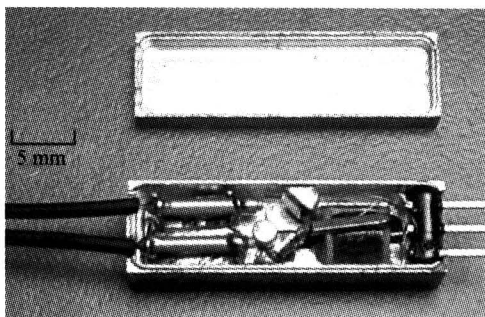


图 1 微加工型 VOA 样机
Fig. 1 Photograph of the micromachining based VOA

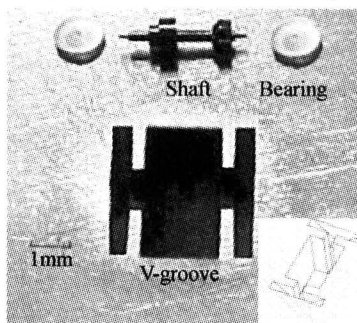


图 2 VOA 中使用的微轴结构
Fig. 2 Photograph of the micromachined axis and bearings for the VOA

成品率. 利用精密雕刻加工技术制作纯铜模具, 其加工精密度达到 $0.7 \mu\text{m}$, 且可重复使用 50 次以上.

图 3 上半部分为器件结构示意图, 输入及输出准直器固定在基板一端, 输入光束经过两片互成 45 度的微反射镜 ($1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$) 反射后由输出准直器输出. 带 U 形永磁体铁芯的电磁线圈固定在基板另一端, 提供驱动力. 图 3 下半部分表示了微轴, 摆杆与永磁体的组合方式, L 型摆杆的中部焊接固定在微轴上, 摆杆顶端焊有一片微反射镜, 另一端则焊有一个圆柱形微型永磁体, 并且与另一个永磁体同极性相对放置, 永磁体间斥力成为用作平衡电磁力的回复力.

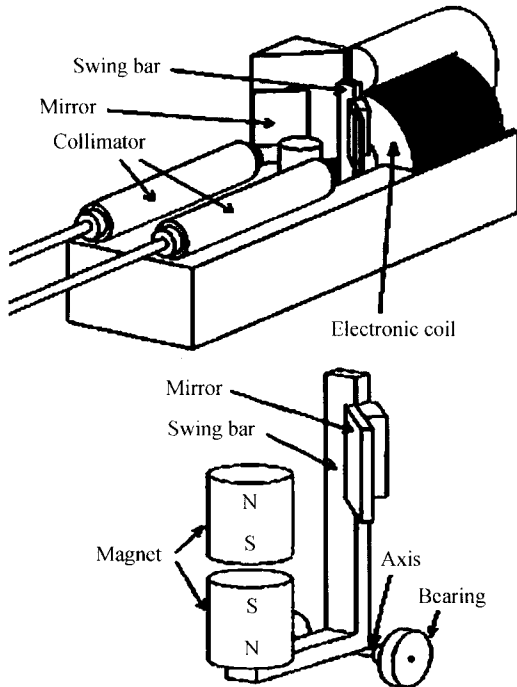


图 3 微加工型 VOA 结构示意图
Fig. 3 Schematic drawing of the VOA

本器件利用永磁体间斥力作为回复力, 在不增加器件复杂度和体积的情况下, 摆脱了一般 MEMS 器件使用弹性应力作为回复力的缺点, 永磁体性质受时间及器件工作次数的影响极小, 使得器件的抗疲劳能力和工作稳定性、重复性有了很大的提高.

线圈铁芯采用 U 形永磁体铁芯而非普通软磁铁芯, 具有以下优点. 首先, U 形铁芯使得器件磁路相对封闭, 则在相同驱动电压下, 驱动力大大增加, 实现了低电压驱动. 其次, 回复力利用永磁体间斥力产生, 这使得摆杆处于初始位置时, 也会受到回复力的作用, 如果采用软磁铁芯, 只有电磁力大于回复力时, 摆杆才会摆动, 则必然存在一个门限电压, 而采用永磁体铁芯, 则在一定程度上抵消初始状态时的回复力, 使得门限电压降低或者消失, 增加了器件的灵敏度, 降低了驱动电压.

当电磁线圈加载直流电压时, 对软磁质摆杆焊有微镜的一端产生吸引力, 而摆杆另一端则受到永磁体间斥力, 其大小由两个永磁体间距离决定, 最终摆杆摆动一定的角度而达到平衡位置, 微反射镜角度随之改变, 由此调节输入光纤准直器与输出光纤准直器之间的耦合损耗, 从而达到光信号可调衰减的目的. 线圈加载的电压越高, 铁芯对摆杆的吸引力就越强, 使微反射镜的摆动角度与线圈加载电压呈一一对应关系. 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, 摆杆受到回复力的作用, 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.

2 理论分析

2.1 光纤准直器的衰减特性分析

器件采用 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. 对其衰减结果进行了实际测量, 确定了这种准直器的角度失配与衰减量的关系, 并进行了多项式函数拟合.

$$\text{Loss}(\phi) = 0.66 - 1.24 \times 10^3 \phi + 3.12 \times 10^6 \phi^2 + 1.10 \times 10^8 \phi^3 - 1.30 \times 10^{11} \phi^4 + 1.01 \times 10^3 \phi^5 \quad (1)$$

式中 ϕ 为角度偏差.

2.2 衰减器特性分析

利用有限元分析 (FEA) 软件 ANSYS 对衰减器的电磁场分布以及运动部件受力情况进行分析^[6]. 首先在 cad 软件中建立驱动机构的几何模型, 然后将模型导入到 ANSYS, 由于在此器件的电磁驱动结构中空气隙的存在, 磁场并未完全构成封闭回路, 因此需要对模型周围适当范围内的空气进行建模, 以正确反映磁漏现象. 采用基于磁矢量势法的 3-D 静态磁场分析法, 得到了器件内部的电磁场分部情况. 然后分别利用虚功法逐点计算了在不同驱动电压下的摆杆两端的受力情况.

$$V = A_0 - A_1 e^{-t_1 F_c} - A_2 e^{-t_2 F_c} \quad (2)$$

式 (2) 为电磁线圈吸引力与驱动电压的有限元计算结果的拟合方程 (为了方便后面计算, 写成 V 关于 F_c 的表达式). 其中 V 为驱动电压, 单位 V, F_c 为电磁线圈吸引力, 单位 N. 函数参数 $A_0 = 11.81$, $A_1 = 20.66$, $A_2 = 1.21 \times 10^7$, $t_1 = 2.89 \times 10^2$, $t_2 = 6.36 \times 10^3$.

$$F_m = A'_0 + A'_1 e^{-t'_1 d} + A'_2 e^{-t'_2 d} \quad (3)$$

式 (3) 为永磁体间力与距离的有限元计算结果, 其中 F_m 为永磁体间力, 单位 N, d 为永磁体间距离, 单位 mm. 函数参数 $A'_0 = 1.52 \times 10^{-3}$, $A'_1 = 1.74 \times 10^{-3}$, $A'_2 = 4.01 \times 10^{-3}$, $t'_1 = 23.11$, $t'_2 = 11.15$.

摆杆平衡时,要求其两端所受 F_c 与 F_m 力矩相等. 本器件中,摆杆两端力臂均为 5 mm,则必有 $F_c = F_m$,而结构初始状态时,永磁体的间距 d 为 0.1 mm,则有 $F_{m0} \approx 3.008 \times 10^{-3}$ N,由式(2)可知,只有 $V \geq V_0 \approx 3.1$ V 时,摆杆才能工作, V_0 即为本器件的门限电压.

综合式(2)和式(3)的结果可得到驱动电压 V 与 Δd (摆杆端偏离平衡位置的距离)间的函数关系式,而 Δd 与微镜摆动角度 ϕ 之间关系为 $\Delta d = 0.005\phi$,可得到 V 与 ϕ 之间的函数关系.

由于此函数过于复杂,且只需 $0 \leq \phi \leq 0.006$ 之间的函数关系. 于是画出此区间内的函数曲线,发现在此区间内 V 与 ϕ 具有良好的线性关系(如图4),

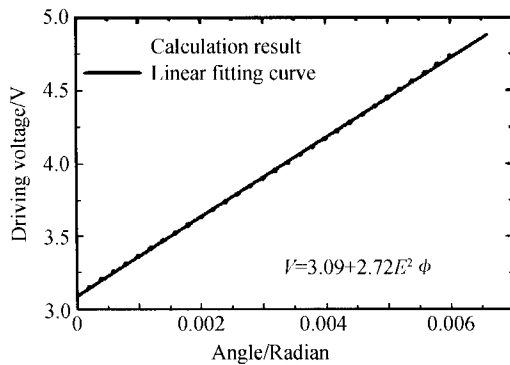


图4 有限元法数值计算所得的微镜转角与驱动电压的关系和解析式拟合

Fig. 4 FEA calculation and analytical fitting of rotation angle of micro-mirror as a function of driving voltage
其拟合函数为

$$V = 3.09 + 2.72 \times 10^2 \phi \quad (0 \leq \phi \leq 0.006) \quad (4)$$

式(4)的适用范围为 $0 \leq \phi \leq 0.006$,则可得出 V 的范围为 $3.09 \leq V \leq 4.72$,小于门限电压时, $\phi = 0$. 于是将式(4)代入式(1),可得到驱动电压 V 与 VOA 衰减量的理论函数关系

$$\text{Loss}(V) = -3.85 \times 10^3 + 5.83 \times 10^3 V - 3.40 \times 10^3 V^2 + 9.54 \times 10^2 V^3 - 1.29 \times 10^2 V^4 - 6.83 V^5 \quad (5)$$

其中 $3.09 \leq V \leq 4.72$

当 $V \leq 3.09$ 时,衰减量为器件插入损耗,约为 0.65 dB.

3 性能测试与分析

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5为测试结果与理论分析曲线的对比,由图可知对应于器件门限电压约为 3 V,驱动电压 0~5 V,工作范围在 0~40 dB 之间.

器件实测门限电压与理论计算值较为一致,插损实测结果(0.8 dB)大于理论插损(0.65 dB),这主

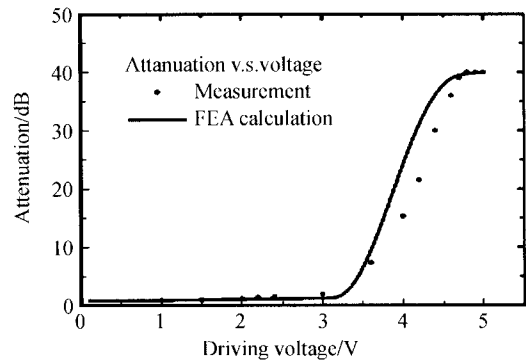


图5 实验值和有限元计算所得的衰减响应比较

Fig. 5 A comparison between measured and FEA calculated attenuation as a function of driving voltage

要是由封装时带来的准直器位置失配引起的. 驱动电压大于门限电压时,实测衰减量小于理论衰减,这主要是由于在结构分析中忽略了器件运动部件的摩擦力,以及封装时的配合误差,使得一定衰减量所需驱动电压升高. 考虑到电磁 MEMS 结构分析的复杂性以及理论分析模型中使用了理想化的材料电磁特性,此理论分析给出了与实测数据相当一致的结果.

由分析结果可知,在 10~35 dB 之间,本器件具有相当好的线性程度,但是实测数据的线性度不够理想. 初步估计是由于摩擦力的阻尼系数与驱动电压并不成线性关系引起的,本器件门限电压(3 V)过高,这是由于驱动线圈永磁体铁芯选取不当,磁场强度过弱引起的. 在以后的工作中,将进一步分析和优化器件结构,选取合适的磁性材料,并考虑器件内部阻尼因子的作用,更真实地反映器件工作的实际情况,以期降低门限电压,提高器件工作的线性度.

使用宽带光源对衰减器进行宽带特性测试,图6是器件处于五个不同衰减量时的宽带光谱响应. 在 1535 nm~1565 nm 波长范围内,器件具有相当平稳的衰减曲线,这使得本器件适用于 DWDM 系统. 最后测得器件的回波损耗为 -50.7 dB,插入损耗为 0.8 dB,在工作范围内,偏振相关损耗 PDL 为 ± 0.1 dB.

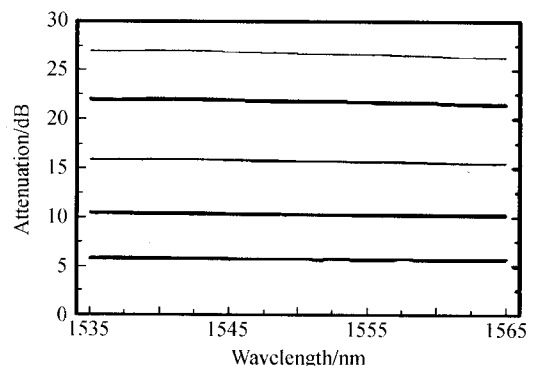


图6 VOA 衰减的宽带响应特性

Fig. 6 VOA broadband spectral response

4 结论

设计研制了一种基于电火花微细加工技术(EDM)的超小型微机械可调光衰减器,在结构上采用转动硅基微镜改变光路实现可调衰减,应用了全磁性力回复,摆脱了弹性回复造成的部件疲劳、零点偏移等可调衰减器最突出的重复性问题。器件结构紧凑,体积仅为 $25 \times 10 \times 7 \text{ mm}^3$,远小于同类器件。器件插入损耗小于 0.8 dB,回波损耗 -50.7 dB ,工作范围 $0 \sim 40 \text{ dB}$ 。

参考文献

- 1 左玉华,毛容伟,黄昌俊,等. 镜面起伏对 $1.55 \mu\text{m}$ Si 基 MEMS 光滤波器的影响. 光子学报, 2003, **32**(6): 661~664
Zuo Y H, Mao R W, Huang C J, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 661~664
- 2 张昊,江晓清,李鹰,等. S 弯曲聚合物热光型可变衰减器的特性. 光子学报, 2004, **33**(8): 920~922
Zhang H, Jiang X Q, Li Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*,

2004, **33**(8): 920~922

- 3 Joseph E F, James A W, Dennis S G, *et al.* Micromechanical fiber-optic attenuator with $3 \mu\text{s}$ response. *J of Lightwave Tech*, 1998, **16**(9): 1663~1670
- 4 袁野,曹钟慧,鲍俊峰,等. 一种 MEMS 可调光衰减器性能测试及动态响应分析. 光子学报, 2004, **33**(4): 439~442
Yuan Y, Cao Z H, Bao J F, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 439~442
- 5 Bao Junfeng, Yuan Ye, Cao Zhonghui, *et al.* A low voltage micromachining based scalable optical switch. *Proc of SPIE*, 2002, **4928**: 222~224
- 6 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. Application of applied mathematic simulation technology in ANSYS. Xi'an: Polytechnical University Press, 2001

A Micromachining Based Miniature Variable Optical Attenuator

Wan Peng¹, Yuan Ye², Wu Xingkun¹

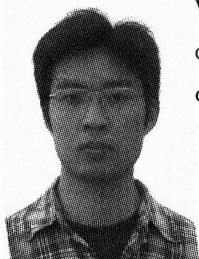
¹ State Key Laboratory of Modern Optics Instrumentation, Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

² The Third Department, Transmission Design Institute, Huaxin Post & Telecommunications Consulting and Designing Institute Co., Ltd, Hangzhou 310014

Received date: 2005-06-25

Abstract A novel design of micro-machined variable optical attenuator (VOA) with a packaged size as small as $25 \times 10 \times 7 \text{ mm}^3$ is presented. Attenuation was introduced by a rotatable miniature silicon mirror, with its orientation finely adjusted through the balance between a pair of electromagnetic forces. The design is free of conventional spring restoring force for attenuation reset and therefore ensures a high stability. The realizing structure was fabricated by EDM micro-machining as well as laser spot welding. VOA prototypes exhibit a wide attenuation range of 40 dB with an insertion loss of 0.8 dB and back-reflection of -50 dB . The measured result was compared with that of an FEA model using ANSYS software package and a good agreement was obtained. The VOA can be arrayed for effective signal balancing and device protection in WDM/DWDM network systems.

Keywords Fiber-optic communication technology; Variable optical attenuator; MEMS; EDM; DWDM



Wan Peng received his B. E. degree in 2003 and is currently pursuing the Ph. D. degree in optical engineering at Zhejiang University. His research interest is in the field of fiber-optic devices and optic communication systems.