

一种闭环控制的错位型 MEMS 可调光衰减器*

邵国成 戴旭涵** 杨昊宇 赵小林 丁桂甫

(微米/纳米加工技术国家级重点实验室, 薄膜与微细加工教育部重点实验室,
上海交通大学微纳科学技术研究院, 上海 200030)

摘要 针对一种错位型 MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems)可调光衰减器, 基于输入输出光纤间模场的交叠积分, 数值分析了径向偏差和轴向间隙同时存在的情况下, 光功率衰减量与错位量和波长的关系. 演示了利用闭环反馈控制系统提高器件响应线性度的显著效果. 研制出样机并测量得到器件的响应时间(约 1.5 ms), 动态范围(约 35 dB), 波长相关损耗(<0.4 dB), 偏振相关损耗(<0.1 dB)等关键性能参量.

关键词 微机电系统(MEMS); 可调光衰减器; 闭环; 线性度

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

可调光衰减器(Variable Optical Attenuator, 以下简称 VOA)是发展最早的一种无源器件, 在光通信中已有广泛的应用. 近年来随着光通信容量的迅速增长, 特别是随着波分复用(WDM)全光网络的不断发展, VOA 作为实现全光网络功率均衡的主要器件之一, 其市场需求持续扩大. 与传统的 VOA 相比, MEMS-VOA 以其响应快, 功耗低, 易阵列化等特点得到了深入的研究和发展^[1~3]. 目前报道的 MEMS-VOA 主要有挡光片型, 微反射镜型等, 其中挡光片型在大衰减量(>20 dB)时会由衍射引起波纹(Ripple), 微镜型 VOA 的镜片偏转角又受到吸偏效应^[4](Pull-in Effect)的限制. 为了克服其缺点, 本文提出了一种基于错位原理的 MEMS-VOA^[1], 即由微线圈产生磁场力驱动硅平台的上下移动实现光纤错位. 此种 VOA 具有驱动电压低(<5 V), 衰减范围大(>30 dB)等优点. 分析了错位型 MEMS-VOA 的光学特性, 探讨了利用闭环控制改进器件线性度的可行性, 并测量了器件的响应时间、波长相关损耗等关键性能参量.

1 工作原理和衰减特性分析

错位型 MEMS-VOA 在光纤对接时通过控制两根光纤的错位, 来实现光能量衰减, 错位方式由横向(Lateral), 轴向(Longitudinal)和角向(angular)三种, 如图 1(a), (b), (c).

本文设计的 VOA(图 2)是将其中一根光纤装

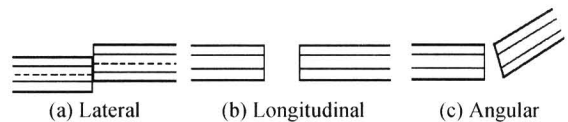


图 1 光纤错位的三种方式

Fig. 1 Three types of misalignments between fibers

配固定在一个微型硅平台上, 通过微电磁驱动器控制微平台的上下运动, 以实现光纤间的径向错位, 从而实现光功率的衰减. 由图 1, 两根光纤之间除了平台运动时会引起的径向错位外还存在轴向的间隙, 轴向间隙的存在, 有助于降低器件装配难度. 另一方面, 不同轴向间隙的大小, 对应的错位量-衰减量特性曲线也不同. 合理选择轴向间隙, 能够降低错位量-衰减量特性曲线的非线性, 提高所产生的衰减量的准确度和分辨率; 然而, 过大的轴向间隙会引起较大的插入损耗. 为此, 需要分析衰减量(即耦合效率)与横向错位和轴向间隙之间的关系.

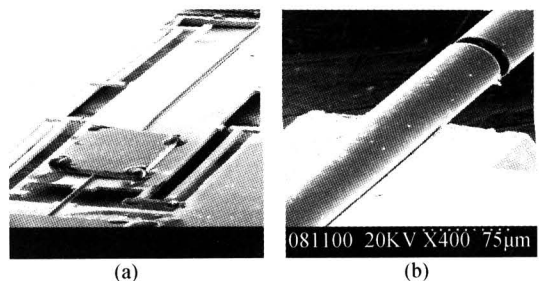


图 2 MEMS-VOA 内部结构电镜照片

Fig. 2 SEM pictures for the internal structure of the MEMS-VOA

目前文献所给出的经验公式主要是计算图 1 中单一某种错位情况下的耦合效率^[5]. 为此, 本文针对所研制的衰减器内部的光束传播过程, 基于输入输出光纤间模场的交叠积分^[6]式(1)的数值计算结果, 分析图 3 的复合错位情况下光功率的衰减情况.

$$L_{sd} = -10 \lg \left\{ \frac{\left| \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\infty} E_0 E_1 r dr \right|^2}{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\infty} |E_0|^2 r dr \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\infty} |E_1|^2 r dr} \right\} \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(50405013)、教育部科学技术研究重大项目(重大 0307)和上海市科委重点实验室基金(05dz22309)资助

** Tel: 021-62933717 Email: xhdai@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2005-08-30

式中 E_0 为输入光纤的模场分布, E_1 为输出光纤的模场分布.

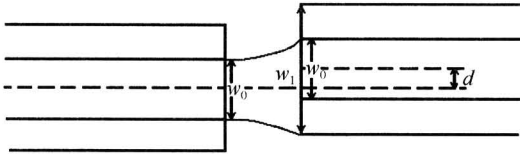


图 3 复合错位时光纤耦合示意图
Fig. 3 Schematic of the optical fiber coupling with complex misalignment

不同轴向间隙下, 光纤横向错位的位移量和光功率衰减量之间的关系如图 4, 从图 4 可以看出, 轴向间隙较大时, 衰减曲线线性度有所改善, 但是由此引起的插入损耗有所增加. 因此, 在实际设计制造过程中, 光纤的轴向间隙定在 $10 \mu\text{m}$ 左右, 这样可使器件的插入损耗控制在 0.5 dB 以下. 同时, 根据图 4 当轴向间隙为 $10 \mu\text{m}$ 左右时, 要达到 30 dB 的衰减量, 要求光纤产生的横向错位量约为 $11 \mu\text{m}$, 这为设计控制硅平台位移的电磁驱动器提供了重要依据.

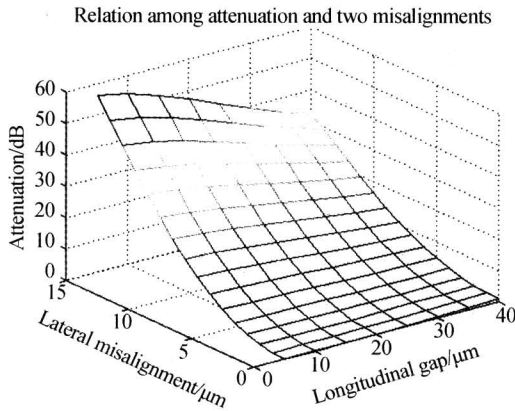


图 4 衰减量, 径向错位和轴向错位之间的关系
Fig. 4 Relation among attenuation, lateral misalignment and longitudinal gap

波长相关损耗是光无源器件的一项重要参量. 为此, 又计算了轴向间隙设为 $10 \mu\text{m}$ 时, 不同横向错位量下, 由于波长改变引起的衰减量的变化如图 5. 表

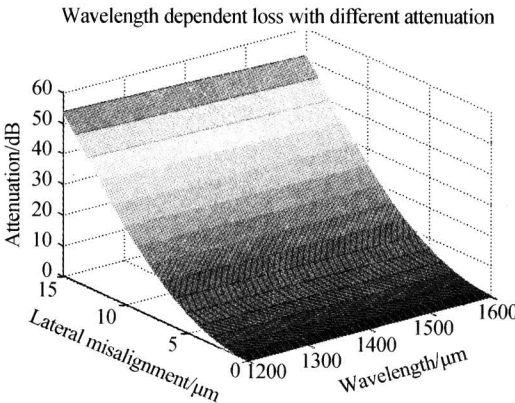


图 5 不同衰减量波长相关损耗示意图
Fig. 5 Wavelength dependent Loss with different attenuation

明利用该原理设计的 VOA 对光波长的变化非常不敏感, 波长相关损耗小.

对于图 1 中的角向错位, 由于微平台(图 2(a))的尺寸远大于光纤横向的位移量, 两者比值远大于 $100 : 1$, 在光纤上下运动过程中产生的角向偏移很小, 所以此处可以忽略不计.

2 闭环驱动系统和器件性能

根据上述衰减特性分析结果所设计的 MEMS-VOA 中, 光纤位移与衰减量(见图 4)之间存在非线性关系, 同时, 所采用的微电磁驱动器的给定电压和引起的横向位移之间也存在非线性, 以至造成 VOA 的输入电压和衰减量之间存在非线性, 这也是挡光片式和反射镜式 MEMS-VOA 中存在的问题. 通过在器件中加入补偿机构的方法能够实现线性响应^[7], 但是补偿机构的设计较为复杂, 不利于使用 MEMS 技术进行加工. 本文试图利用闭环控制原理来解决上述问题, 同时进一步提高器件性能的稳定性和重复性.

在已研制成功的错位型 MEMS 可变光衰减器中, 所采用的闭环驱动系统方框图如图 6. 在 VOA 的输出端, 利用一个 $3/97$ 的单模光纤带宽型耦合器, 取输出功率的 3% 作为反馈信号, 经过 PIN 光电探测器光电转换, 前置放大、调理之后^[8], 输入比例积分(PI)控制器. 所产生的控制信号再经过脉宽调制(PWM), 功率放大后作用在衰减器的微电磁驱动器上, 控制衰减器内两根光纤之间的横向错位, 从而控制衰减量.

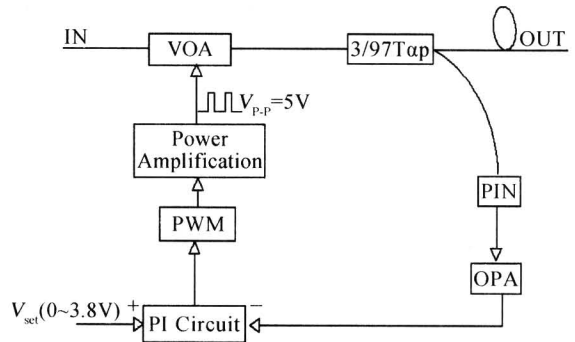


图 6 比例积分(PI)闭环反馈控制系统框图
Fig. 6 Block diagram of the PI close-loop feedback control system

内置有闭环驱动控制系统的错位型 MEMS-VOA, 它的功率衰减与驱动电压之间关系的测量结果如图 7. 与开环控制技术比较, 闭环驱动控制技术显著地改善了 VOA 的光衰减线性度.

值得一提的是反馈环节中的光反馈检测单元

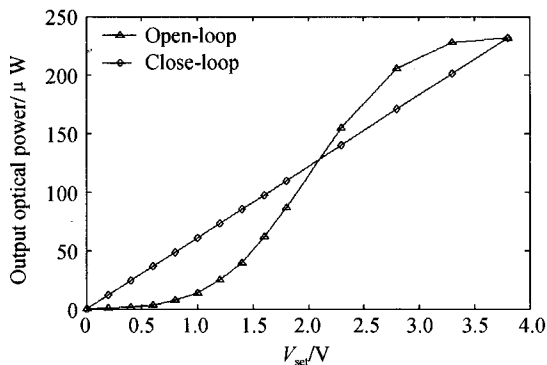


图7 电压-输出光功率测试曲线
Fig. 7 relation between setting voltage and the output optical power

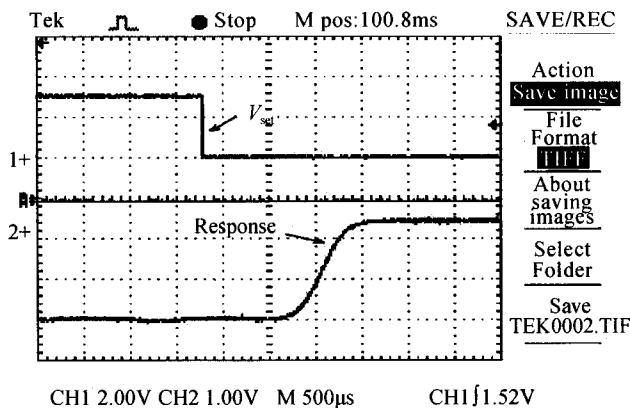


图8 动态响应
Fig. 8 Dynamic response

(包括 PIN 探测器及其调理、放大电路) 决定了 VOA 光功率衰减的线性度, 在本文研究中, 光反馈检测电路是采用输出电压与输入功率为线性关系, 因而实测的 VOA 输出光功率与输入给定电压之间为良好的线性. 若在光反馈检测单元中采用对数放大器, 则有望使 VOA 输出的 dB 值与给定电压之间呈线性关系, 这或许在有些场合使用起来更方便.

实验研究中同时测量了 VOA 的其他性能参量包括: 响应时间约为 1.5ms(图8), 波长相关损耗 < 0.4 dB(图9), 偏振相关损耗 < 0.1 dB, 工作电压 < 5 V.

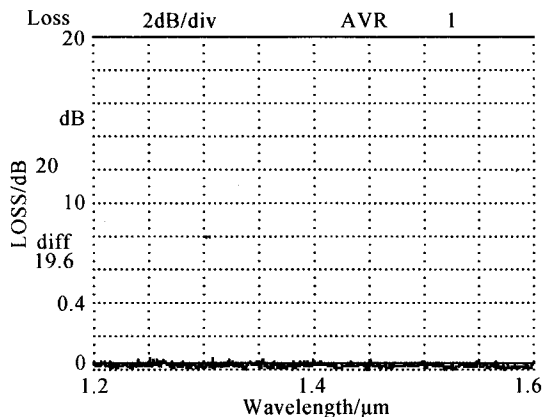


图9 波长相关损耗
Fig. 9 Wavelength dependent Loss

3 结论

本文成功研制出一种采用 PI 闭环控制的错位型微机械可调光衰减器, 并对器件进行了原理分析和性能测试. 结果表明, 此种 VOA 具有动态范围大, 线性度好, 响应速度快, 波长相关损耗小, 偏振相关损耗小, 驱动电压低等特点, 展示出进一步开发的價值, 有望在光学器件测试, WDM 系统功率均衡等场合使用.

参考文献

- 1 Dai X H, Zhao X L, Ding G F, et al. Electromagnetic MEMS eight-channel variable optical attenuator array. *Proceeding of SPIE*, 2004, **5641**: 1~8
- 2 晏辉鸣, 曹钟慧, 吴兴坤. 光纤直接耦合微加工型可调光衰减器. *光子学报*, 2005, **34**(5): 718~721
Yan H M, Cao Z H, Wu X K. *Acta Photonics Sinica*, 2005, **34**(5): 718~721
- 3 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. *Acta Photonics Sinica*, 2004, **33**(4): 439~442
- 4 Chen J H, Weingartner W, Azarov A, et al. Tilt-angle stabilization of electrostatically actuated micromechanical mirrors beyond the pull-in point. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2004, **13**(6): 988~997
- 5 林学煌. 光无源器件. 北京: 人民邮电出版社, 1998
Lin X W. *Passive Optical Components*. Beijing: Post and Telecom Press, 1998
- 6 Kogelnik H. Coupling and Conversion Coefficients For Optical Modes, *Proceeding of the Symposium on Quasi-Optics*, Polytechnic Institute of Brooklyn, 1964. 333~347
- 7 曹钟惠, 晏辉鸣, 吴兴坤. 可调光衰减器的光衰减量线性补偿. *光子学报*, 2004, **33**(7): 826~829
Cao Z H, Yan H M, Wu X K. *Acta Photonics Sinica*, 2004, **33**(7): 826~829
- 8 Photodiode Monitoring with Op Amps. *Application Bulletin*, 1995. Burr-Brown corp. 1~10

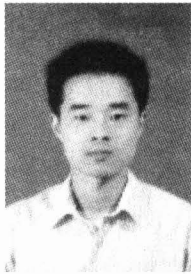
A Close-loop Controlled Offset Type MEMS Variable Optical Attenuator

Shao Guocheng, Dai Xuhan, Yang Haoyu, Zhao Xiaolin, Ding Guifu
*National Key Laboratory of Nano/Micro Fabrication Technology, Key laboratory
for thin film and microfabrication of Ministry of Education,
Institute of Micro and Nano science and technology,
Shanghai Jiao Tong University, shanghai, 200030*

Received date: 2005-08-30

Abstract The attenuation characteristic of a MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) Variable Optical Attenuator has been studied. Via numerical analysis, the relationship between attenuation and the misalignments (lateral misalignment and longitudinal gap) has been analyzed. It has been demonstrated that the linearity of the device could be improved tremendously via close-loop control system. The key performances of the close-loop controlled Variable Optical Attenuator are measured, including response time (about 1.5 ms), dynamic range (about 35 dB), Wavelength Dependent Loss (< 0.4 dB), and Polarization Dependent Loss (< 0.1 dB).

Keywords MEMS; Variable Optical Attenuator; Close-loop; Linearity



Shao Guocheng was born in 1981 in Zhejiang Province. He received his B. E. Degree from Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, China, in 2000. And now he is carrying out his M. S. research on MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) fabrication technology and MEMS Variable Optical Attenuator in the Institution of Micro/Nanometer Science & Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China.