

可调光衰减器的光衰减量线性补偿

曹钟慧 晏辉鸣 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 设计制成一种数字化电磁驱动微机械 MOEMS 可调光衰减器. 与传统可调光衰减器相比, 该器件不仅可实现光衰减量数字化电控调节, 并且可通过器件结构的优化设计, 对光衰减量的非线性进行补偿, 最终得到线性衰减. 器件性能测试表明, 插入损耗 $IL < 0.3$ dB, 偏振相关损耗 $PDL < 0.1$ dB, 波长相关损耗 $WDL < 0.2$ dB, 衰减范围 $0 \sim 40$ dB, 回波损耗 $RL > 50$ dB.

关键词 微光机电系统(MOEMS); 可变光衰减器; 电磁驱动; 微位移驱动器

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

可调光衰减器 (Variable Optical Attenuator: VOA) 广泛应用于波分复用 (WDM/DWDM) 系统中的信道均衡和器件保护, 是光通信网络中的一种重要光纤无源器件. 可调光衰减器的实现方法有很多, 包括机械型, 波导型, 液晶型, 压电型, 和微机械型等. 尤其近年来利用微机械技术制造的 MOEMS (微光机电系统: Micro-Optical-Electro-Mechanical Systems) 可调光衰减器, 具有体积小, 质量轻, 能耗小, 加工工艺稳定, 成本低, 可在单片上制造阵列并且各路集成在一起等优点, 开辟了光衰减器设计及生产的新方法^[1-4]. 但现有的可调光衰减器结构通常都不能达到线性衰减, 需要在这些器件应用于功率调节机构前加校正装置^[5]. 这种复杂性会导致光学性能经过一些时间而下降. 并导致较高的插入损耗及偏振敏感性.

我们成功地设计制成了一种电磁线圈驱动的数字 MOEMS 可变光衰减器, 该衰减器通过电磁脉冲驱动微加工部件实现挡光片的步进微动, 对单模光纤中光传输功率进行数字化衰减. 该结构并可通过改变驱动轮的形状以及挡光片刀口的形状, 对光衰减量的非线性进行补偿, 最终得到输入驱动脉冲个数与输出光衰减量之间的线性关系. 本文将着重介绍这种微机械式可调光衰减器的线性衰减设计以及器件性能测试.

1 器件结构和制作

该 MOEMS 可变光衰减器照片如图 1 所示, 两个输入输出光纤准直器固定于基板上, 中间设置弹性连接的挡光片, 挡光片尾端在弹性片作用下, 与装在转轴上的偏心轮点接触, 并且挡光片所在平面穿

过转轴的轴心, 齿轮和偏心轮是由微加工制成的一整体零件, 可绕垂直固定在基板上的转轴转动.

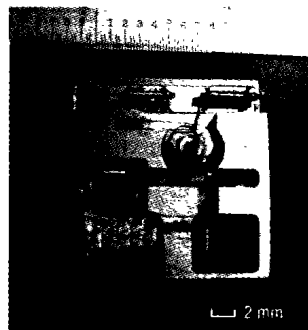


图1 数字化 MOEMS 可变光衰减器
Fig. 1 Photograph of the MEMS DVOA

位移驱动器由驱动线圈, 铁芯, 铁镍薄片组成. 当向横向位移驱动器输入驱动电压时, 横向弹性片带动一微加工齿条作横向运动, 同时带动齿轮转动过一个齿距. 此时, 向纵向位移驱动器输入驱动电压, 带动纵向弹性片, 使齿条脱离与齿轮的啮合. 然后撤销横向位移驱动器两端电压, 则横向位移驱动器带动齿条回到初始位置, 而由于齿条未与齿轮啮合, 齿轮保持位置不变. 再撤销纵向位移驱动器两端电压, 纵向弹性片回到初始位置, 齿条与齿轮啮合, 实现自锁. 重复这个过程, 可以使齿轮不断转动, 且每次转动为一个齿距, 齿轮的转动将带动偏心轮转动. 由于挡光片末端在弹性片作用下与偏心轮保持点接触, 偏心轮转动, 推动挡光片作水平前进或后退. 在连续电脉冲的作用下, 挡光片在光路中步进移动, 实现对输入光功率的数字化衰减.

器件以电磁线圈作位移驱动器, 不仅驱动功率低, 且采用电脉冲驱动, 无须稳恒电压维持其工作状态, 由此可降低器件功率, 避免因功率损耗产生热量在器件内部积蓄, 提高工作稳定性; 同时器件具有自锁功能, 掉电后衰减量可锁存, 使器件的可靠性、稳定性更具优势. 整个器件结构紧凑, 外形尺寸仅为 $(30 \times 29 \times 6)$ mm³. 器件制作利用非硅基 MOEMS 微加工技术, 实现微型齿轮、齿条、转轴和基板一体

化加工,工艺简单,可复制性好,有利于大批量生产. 目前,这种光衰减器的结构设计已申请专利.

2 光衰减量的线性补偿

大多数可调光衰减器输出通常不能实现衰减(dB)与驱动电压信号的线性关系,如以压电陶瓷作微位移驱动机构的光衰减器,压电陶瓷的位移量不仅是电压的高次函数,而且还存在滞回路,所以要得到光衰减量同施加电压的简单函数如线性关系从而施以简单开环调节有很大难度,而必须采取闭环调节^[6]. 我们设计的光衰减器可通过改变器件偏心轮的形状及挡光片挡光刀口的形状,对光衰减量的非线性进行自我补偿.

2.1 偏心轮补偿

线性补偿的最终目的是得到输入驱动脉冲个数(driving pulse number)与光衰减量(Attenuation)之间的线性关系. 为了达到这个目的,我们对偏心轮的形状进行了优化设计. 首先,由实验测试可知,当挡光片挡光刀口为直刀口,偏心轮为普通的圆形偏心轮时,挡光片行程(Displacement)与光衰减量之间存在非线性关系,当挡光片的位置由 0 mm 移动到 0.4 mm 时,光信号的衰减量从 0.3 dB 变化到 40 dB,在高衰减量时曲线斜率逐渐增大. 因此通过调节输入驱动脉冲个数与挡光片行程之间的关系,来补偿挡光片行程与光衰减量之间的非线性,最终达到输入驱动脉冲个数与光衰减量之间的线性关系. 再次,根据实际应用需要和输入驱动脉冲个数与光衰减量的线性关系,确定线性斜率为 0.4,即每经过一个脉冲光衰减量增加 0.4 dB,经过 100 个脉冲后光衰减量从 0 dB 增加为 40 dB. 由实际测得的挡光片行程与光衰减量的单调曲线关系,每个挡光片行程值对应一个光衰减量,就可以得出每个挡光片行程值对应的输入驱动脉冲个数. 图 2 给出了优化前后驱动脉冲个数与挡光片行程之间的关系曲线. 图中三角点线给出优化前输入驱动脉冲个数与挡光片行程之间关系;方点线给出优化后输入脉冲个数与挡光片行程之间补偿曲线关系,其拟合函数为

$$D = \frac{abN^{1-c}}{1+bN^{1-c}} \quad (1)$$

式中 D 为挡光片行程, N 为输入驱动脉冲个数. 图 2 中的最佳函数参数: $a = 3.09926$, $b = 0.0154$, $c = 0.5175$.

因此,通过将偏心轮外形加工成拟合曲线的形状,可使得输入驱动脉冲与挡光片行程之间关系符合如图 2 中方点线所示的补偿曲线,从而实现输入驱动脉冲个数和输出光衰减量之间的线性依赖关系.

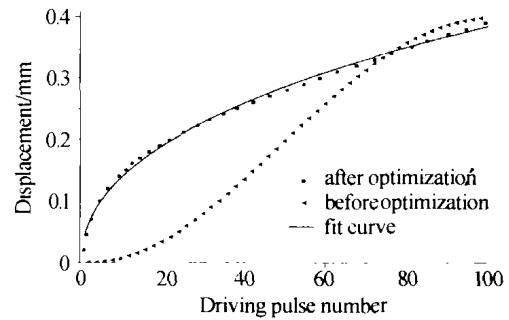


图 2 优化前后驱动脉冲个数与挡光片行程的关系
Fig. 2 Displacement of shutter as a function of number of driving pulse

2.2 挡光片挡光刀口补偿

输入驱动脉冲个数与输出光衰减量之间的非线性关系,还可以进一步通过改变挡光刀口的形状的方法进行校正. 对于挡光片式光衰减器,光束在准直器的耦合区内经过挡光,耦合入后续光路,总的光衰减损耗由直接挡光能量衰减(L_1),模场失配衰减(L_2)两部分构成.

入射在接收光纤准直器端面上的光场分布,可用高斯分布近似,在近轴光束范围内,如果光纤横截面近场分布为高斯分布,则远场分布也一定为高斯型. 因此在弱导近似条件下,对接的两根光纤准直器中的入射光场分布可用下式表示

$$\varphi = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega_0} e^{-\frac{x^2+y^2}{\omega_0^2}} e^{ikz} = \varphi_0 \quad (2)$$

当准直器耦合区内的光束被挡住一部分时,耦合进光纤的光场分布发生变化. 如挡光片刀口在任意点处的挡光位置函数为

$$M(x, y) = \begin{cases} 1 & x, y \in R(x, y) \\ 0 & x, y \notin R(x, y) \end{cases} \quad (3)$$

则被挡后的光束可表示为

$$\varphi = \varphi_0 M(x) = \varphi_1 \quad (4)$$

据模场耦合理论^[7],耦合效率由两场交叠积分求得,直接挡光能量衰减值(dB)为

$$L_1 = -10 \log \left(\frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} d\theta \int_0^{\infty} |\varphi_0 \varphi_1^*| r dr}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} d\theta \int_0^{\infty} |\varphi_0|^2 r dr \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} |\varphi_1|^2 r dr} \right) \quad (5)$$

输入光束经挡光片挡光后,经过距离 z 传输到第二根光纤的端面时,由于挡光片刀口衍射,被挡光束光场分布会展宽,模场直径发生变化,再与第二根光纤准直器耦合时,将带来模场失配产生的能量损失. 该衰减称为模场失配衰减.

当挡光片存在时,必然对原来入射波产生扰动,特别是在挡光片边缘附近,入射波受到的扰动比较大,但当挡光片尺寸远大于波长时,光场大部分面积的场所受到的扰动不大,因此假设未被挡光部分的 φ 和 $\partial\varphi/\partial n$ 等于原来入射波的值不会导致很大误

差;同时在挡光片右侧,实际上只有在小孔边缘附近 φ 和 $\partial\varphi/\partial n$ 才可能显著地不为零,因此假设被挡光部分的 φ 和 $\partial\varphi/\partial n$ 等于零. 即被挡后光束可用式(4)表示.

根据基尔霍夫衍射公式

$$\varphi(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi s} \left[\varphi(x', y', z') \nabla' \frac{e^{ikr}}{r} - \frac{e^{ikr}}{r} \nabla' \varphi(x', y', z') \right] dS' = -\frac{1}{4\pi s} \frac{e^{ikr}}{r} n \left[\nabla' \varphi(x', y', z') + \left(ik - \frac{1}{r} \right) \frac{r}{r} \varphi(x', y', z') \right] dS' \quad (6)$$

波源强度由 x' 点上的 φ 和 $\partial\varphi/\partial n$ 值确定,因子 $\frac{e^{ikr}}{r}$ 表示由曲面 S 上的点 x' 向 V 内 x 点传播的波, n 是指向区域 V 内的法线. 其中

$$r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \quad (7)$$

被挡光束的高斯场经过距离 z 传输到第二根光纤的端面时,模场分布发生变化为

$$\varphi = -\frac{1}{4\pi s} \left[\frac{e^{ikr}}{r} ik\varphi_1 + \frac{e^{ikr}}{r} \left(ik - \frac{1}{r} \right) \frac{z}{r} \varphi_1 \right] dS' = \varphi_3 \quad (8)$$

与第二根光纤准直器对接模场失配衰减为

$$L_2 = -10 \log \left(\frac{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\infty |\varphi_0 \varphi_3^*| r dr}{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\infty |\varphi_0|^2 r dr \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\infty |\varphi_3|^2 r dr} \right) \quad (9)$$

从而得到总的光衰减量为

$$L = L_1 + L_2 \quad (10)$$

在工作波长 1550 nm, 我们选用的光纤准直器光束在耦合区内的直径实际测量为 0.44 mm. 根据以上过程,可以计算得到不同挡光片行程值下的光衰减量.

如器件采用普通的偏心轮,根据已得出的输入脉冲个数与挡光片行程的关系(图3点线),可作出输入脉冲个数与光衰减量的关系曲线. 分析改变挡光片刀口的挡光位置函数,可以得到不同的关系曲线. 图3是计算得到的三种挡光片关于光衰减量与挡光片行程之间的不同关系曲线. 也可以将偏心轮形状补偿与挡光片刀口形状补偿两种方式结合运用,达到最

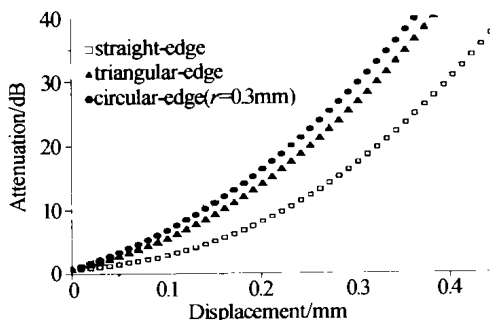


图3 挡光片行程与光衰减量之间的关系曲线
Fig. 3 Attenuation versus displacement of shutter

佳的光衰减量与输入脉冲个数的线性关系.

3 性能测试实例

我们对一个经过优化设计的光衰减器实例进行了性能测试. 该衰减器的挡光片刀口采用直刀口, 偏心轮外形制成拟合曲线的形状, 使输入驱动脉冲与挡光片行程之间关系符合如图3中方点线所示的补偿曲线.

初始状态时, 器件挡光片没有进入光路, 输入光束从输入光纤准直器直接耦合进输出光纤准直器, 器件原始插入损耗很小, 仅与光纤准直器的插入损耗有关, 测得器件在 1.55 μm 工作波长时原始插入损耗 < 0.3 dB. 在连续电脉冲的作用下, 齿轮逐齿转动从而步进旋转偏心轮, 使挡光片在输入输出光纤准直器之间的耦合光路中剪切光径, 实现对输入光功率的数字化衰减, 如图4所示, 对于每一个特定的衰减量, 都有特定的控制脉冲与之对应. 图4显示优化后(实点线)与优化前(虚点线)驱动脉冲个数与光衰减量之间关系的结果比较, 可知器件的光衰减量非线性得到了极好地校正. 该器件的最大衰减量可以达到 40 dB 以上.

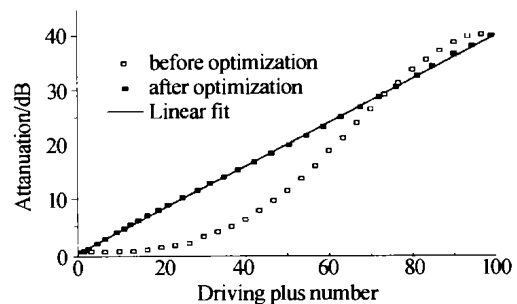


图4 驱动脉冲个数与光衰减量之间的关系曲线
Fig. 4 Attenuation as a function of driving pulse number at the wavelength of 1.55 μm

用宽带光源对器件在不同的衰减量时进行宽带响应测试, 图5是光衰减器处于六个不同衰减量时的光谱响应. 在 1535 nm ~ 1565 nm 波长范围内, 光衰减量为 30 dB 以下只有 ± 0.19 dB 的偏差, 波长相关损耗 WDL < 0.2 dB, 器件具有相当平稳的衰减曲线.

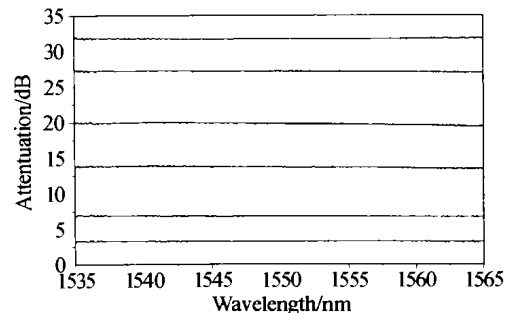


图5 DVOA 宽带响应测试
Fig. 5 Spectral response of the DVOA

另外,器件的回波损耗 RL 实测为 -50.5 dB, 偏振相关损耗 PDL 0.15 dB.

4 结论

利用非硅基底 MOEMS 微加工技术设计制作了一种能够对光衰减量进行数字化电控可调光衰减器,这种设计可以通过器件中偏心轮和挡光片的结构优化,对光衰减量的非线性进行补偿,最终得到线性衰减.实例器件性能测试表明,通过对器件的线性补偿优化设计,能极好地实现线性衰减,并且器件性能稳定,结构紧凑.

参考文献

- 1 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
- 2 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
- 3 陈益新. 光纤通信中光电器件新进展. *光子学报*, 2000, **29**(1): 1 ~ 7
Chen Y X. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(1): 1 ~ 7
- 4 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
- 5 Noell W, Clerc P A, Dellmann L, *et al.* Applications of SOI-Based optical MEMS. *IEEE J Select Top Quantum Electron*, 2002, **8**(1): 148 ~ 154
- 6 Liu G Q, Ruan Y, Liu M, *et al.* The development of a new type of electrically-controlled variable optical attenuator (EVOA). *Optoelectronic Technology and Information*, 2002, **15**(6): 12 ~ 15
- 7 Kogelnik H. Coupling and conversion coefficients for optical modes. *Proc Symp Quasi-Optics*, 1964, **14**: 333 ~ 347

The Linearity Compensation of a Digital Micro-machining Based Variable Optical Attenuator

Cao Zhonghui, Yan Huiming, Wu Xingkun

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

Received date: 2003-11-16

Abstract A novel micro-machining based digital MOEMS variable optical attenuator (VOA) was presented. The design of the VOA was optimized to achieve a linear response and digitized variation of attenuation. The characteristics of the device were analyzed with a scalar wave theory based numerical simulation. The performance test of the device showed a low insertion loss (0.3 dB), wave dependent loss (0.1 dB), return loss (> 50 dB), and wide dynamic response (0 ~ 40 dB).

Keywords MOEMS (Micro-Optical-Electro-Mechanical Systems); Digital variable optical attenuator (DVOA); Electromagnetic moving; Micro displacement actuator



Cao Zhonghui was born in Zhejiang, China. She received her B. E. in Optical Engineering at Zhejiang University. Currently she is a doctoral graduate student in the Center of Optical and Electromagnetic Research at Zhejiang University and is engaged in research of MEMS optical switch and VOA.