

光纤直接耦合微加工型可调光衰减器

晏辉鸣 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 设计研制了一种新型小体积, 低成本的光纤直接耦合微加工型可调光衰减器. 该器件采用电磁微线圈驱动柔性框架上的活动光纤微位移实现信号功率衰减变化, 驱动电压为 0~8 V, 工作范围 0~65 dB, 动态时间响应小于 2.3 ms. 器件构造工艺主要使用了 CNC 高精度雕刻和激光点焊封装技术. 利用有限单元法进行器件理论分析, 并报告了其测试性能.

关键词 光衰减器; 光纤直接耦合; 光纤通信

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

可调光衰减器 (Variable Optical Attenuator) 是光纤通信系统中的重要无源器件, 主要应用于波分复用系统中, 起到平衡各信道信号强弱的作用. 近几年, VOA 设计不断推陈出新, 实现方式各有所长, 其中 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 产品以小体积、低插损、较好的稳定性等优点受到用户青睐, 但是 MEMS 技术^[1,2] 复杂, 成品率低和较高的成本直接影响了普及. 因而, 如何成功设计制作一种结构简单, 成本低, 性能稳定的 VOA 器件成为人们关注的焦点. 本文基于 CNC 高精度雕刻和激光点焊技术研制了一种新型光纤直接耦合的 VOA. 其工作范围为 0~65 dB, 响应速度小于 2.3 ms, 插入损耗小于 0.8 dB. 与 MEMS 型 VOA 相比, 其突出特点在于: 摆脱了硅的多层复杂刻蚀, 工艺简单, 设计新颖, 成本低, 成品率高, 更适于大批量生产.

1 器件设计及制作

1.1 器件原理及设计

光纤直接耦合 VOA 通过机械对准误差来实现信号衰减的方式可以有三种: ①纵向偏移 (end separation); ②角度误差 (angular misalignment); ③横向错位 (lateral misalignment). 前两种方式制作衰减器有很高的准确度要求和实现难度. 目前, 国际上尚未出现前两种方式制作的 VOA. 本文器件是通过第三种方式来实现信号衰减的. 根据 Nemota 和 Makimoto 导出的单模光纤耦合损耗一般式^[3] (用 dB 表示)

$$L_{SM,F} = -10 \log \left[\frac{16n_1^2 n_3^2}{(n_1 + n_3)^4} \frac{4\sigma}{q} \exp \left(-\frac{\rho\mu}{q} \right) \right]$$

可导出光纤横向错位所引起的插入损耗公式

$$L_d = -10 \log \left\{ \exp \left[-\left(\frac{d}{\omega_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (1)$$

其中, $\rho = (k\omega_1)^2$, $q = G^2 + (\sigma + 1)^2$, $\sigma = (\omega_2/\omega_1)^2$, $k = 2\pi n_3/\lambda$, $G = \frac{s}{k\omega_1^2}$, $\mu = (\sigma + 1)F^2 + 2\sigma FG \sin\theta + \sigma(G^2 + \sigma + 1)\sin^2\theta$, $F = \frac{d}{k\omega_1^2}$

式中: L_d 表示光纤端面横向错位为 d 的损耗, n_1 为光纤纤芯的折射率, n_2 为光纤包层折射率, n_3 为光纤端面间介质的折射率, λ 为光源的波长, ω_1 为发送光纤的模场半径, ω_2 为接收光纤的模场半径.

根据式(1)得出器件损耗随光纤横向位移变化的曲线如图 1, 光纤横向位移越大, 插入损耗增幅越大. 起先考虑到将 VOA 工作范围设计在 0~50 dB, 因此我们将器件横向微位移设计在 16 μm 左右.

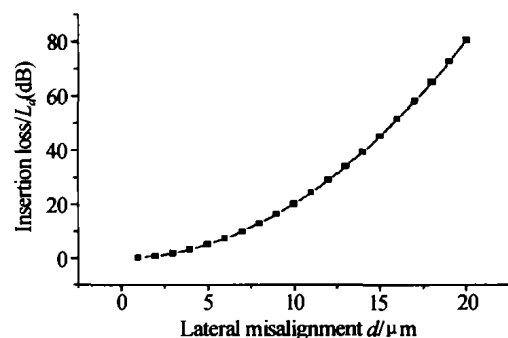


图 1 插入损耗随光纤横向位移变化曲线

Fig. 1 The insertion loss as a function of lateral misalignment

VOA 理想结构设计为如图 2. 承载活动光纤 I 的柔性薄片 II (flexure) 一端固定, 耦合端口自然伸屈, 并保证耦合端离器件上表面距离约 16 μm . 当小线圈 IV 通电产生磁场, 固定在柔性薄片上的衔铁 III 就受到铁芯吸引, 从而带动活动光纤微位移. 在不同的通电电压下, 线圈磁场力的强弱和簧片的回复力大小决定了柔性薄片微位移量, 也实现了器件光衰减量的可调.

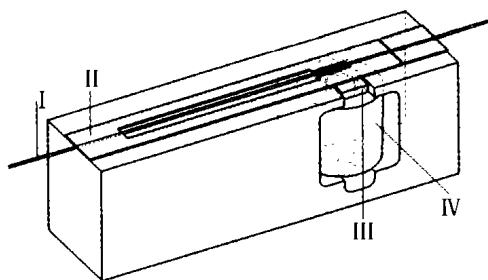


图2 微加工型 VOA 设计示意图
Fig.2 A design of micromachining based VOA

1.2 器件制作及优化处理

器件成品照片如图 3, 封装尺寸为 $9 \times 10.2 \times 30.3 \text{ mm}^3$. 其主要制作工艺依次为:

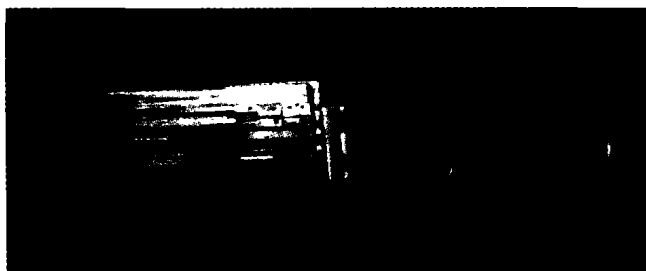


图3 光纤直接耦合微加工型 VOA 照片
Fig.3 A photo of micromachining based direct-coupled VOA prototype

① 铝基底形状和封装盒选用了 CNC (Computerized Numerical Control) 雕刻技术, CNC 雕刻是一种极具吸引力的数控微加工技术. 其专业优势表现为在强大的 CAD/CAM 控制软件支持下, 以高效平稳且分辨率可达 $3 \text{ }\mu\text{m}/\text{步}$ 的控制系统作为依托, 运用(刀尖直径可小于 0.1 mm) 小刀具高转速 (24000 转/分钟) 铣削.

② 基底上表面镀了一层合金膜解决了柔性薄片固定问题, 并保证了器件上表面严格的平面.

③ 承载活动光纤的柔性薄片制作成具有“凸”字形孔结构的长臂柔性框架. 其作用是很好地优化了弹性并增加了稳定性.

④ 耦合光纤是被安置在两片柔性薄片的 V 型槽上. 为了保证光纤耦合端口的平整, 我们采用了超声波切割机对光纤纤芯进行了切割. 而 V 型槽的制作则采用了 EDM (electrical discharge machining) 加工技术^[4,5].

⑤ 解决长臂柔性框架和衔铁的固定问题成为了关键. 因此, 我们使用了光纤传输激光点焊技术. 这种技术以 Nd:YAG 晶体为激光工作物质, 其输出能量为 60 J , 合金焊接最大深度可达 5 mm 以上, 最小焦斑直径为 $0.2 \text{ mm} \sim 0.3 \text{ mm}$.

⑥ 为保证长臂柔性框架自由端离器件上表面距离约 $16 \text{ }\mu\text{m}$, 我们在衔铁上表面附加固定了一块压板.

此外, 衰减器的活动和固定光纤采用了紫外线

固化胶固定封装.

2 器件的理论分析

在设计过程中, 我们使用 ANSYS 软件对器件进行了优化结构参量和模拟状态分析. ANSYS 软件是融结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元软件^[6], 包含了前置处理、求解处理以及后置处理, 将有限元分析、计算机图形学和优化技术相结合, 已成为现代工程学问题必不可少的有力工具.

2.1 驱动系统磁场状况分析

首先我们研究了低电压下软磁材质衔铁不同位置受电磁力情况. 在这一过程中, 我们基于微分标量势法(DSP)的 3D 静电磁场进行分析, 根据铁芯、线圈和衔铁对称关系建立了 3D 实体模型^[7]. 由于不封闭的驱动系统具有漏磁现象, 所以我们对一定范围内的空气也进行了建模并加载了远场边界条件. 这里我们给出了在最大驱动电压 8 V 下, 衔铁和铁芯间隙为 $200 \text{ }\mu\text{m}$ 时(即活动柔性框架紧靠器件上表面时)H 磁通量密度分布状况, 如图 4 可以看出线圈磁场并未形成回路, 而衔铁离铁芯越接近, 其所受磁场作用力也越大. 并基于虚功法得出了整个衔铁在衔铁和铁芯垂直距离方向上作用力 1.588 mN , 基于 MAXWELL 法得出作用力为 1.812 mN .

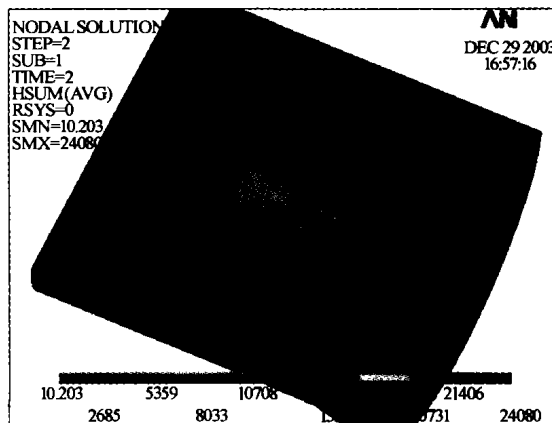


图4 三维静态场 H 磁通量密度
Fig.4 3D static magnetic field flux intensity

2.2 柔性框架受力分析

在 VOA 制作过程中, 长臂柔性框架结构参数也必须得到合理优化, 使其在电磁场力和自身回复力作用下达到微位移控制, 从而实现光衰减量控制. 这也是本器件设计过程中的关键. 因此, 我们运用 ANSYS 建立了长臂柔性框架 3D 实体模型, 并分析了受力微位移状况, 这里的柔性框架采用了 0.102 mm 厚度, 弹性优良的专业不锈钢材质. 在 3D 模型分析中我们设定了柔性框架的材料属性, 施加了载荷和位移约束条件, 结果发现 8 V 电压下 21 mm 长度的柔性框架整个均压孔长和自由端最大微位移具有

如图5所示拟合线性关系. 根据图5,我们将孔长设置为15 mm,并重新得出如图6在8 V电压下模型受力微位移状况. 可以看出柔性框架变形后的自由端最大微位移为16.3 μm.

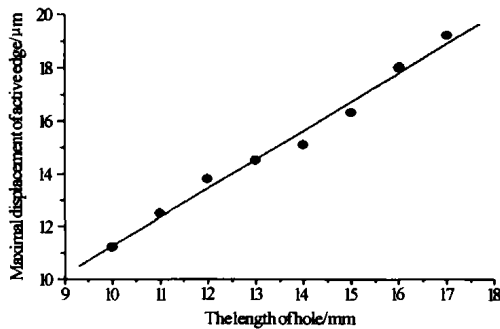


图5 柔性框架孔长和自由端最大位移的线性关系
Fig.5 The linear fit of the length of hole and the maximal displacement of active edge

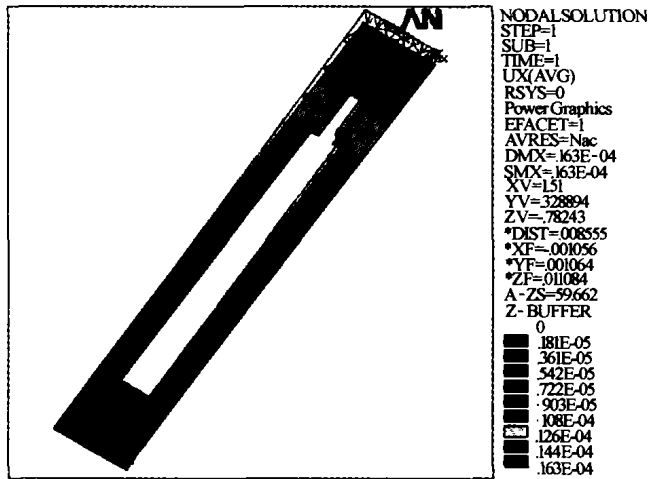


图6 柔性框架受力微位移
Fig.6 Simulation results for displacement

根据上述定态模拟分析,经过结构优化的 VOA 理论上足以通过 0 ~ 8 V 电压来控制耦合光纤的横向错位 0 ~ 16 μm,从而实现 0 ~ 50 dB 范围内的光衰减量可调.

3 性能测试

我们对新型光纤直接耦合的 VOA 成品性能进行了测试. 实验表明在 0 ~ 8 V 电压控制下,该器件实现了 0 ~ 65 dB 范围内的光衰减量可调,其中插入损耗小于 0.8 dB. 这里我们给出了如图 7 新型 VOA 光衰减量随小线圈电压变化的实测点和理论曲线. 其中衰减与电压的拟合函数为

$$LOSS(V) = 72.251e^{-V/2.664} - 5.429$$

式中 V 为电压,单位为 V,且 $0 \leq V \leq 8V$; LOSS(V) 为电压引起的衰减,单位为 dB.

从图中可以看出,该器件在零电压下,光衰减量达到最大为 65 dB. 当电压逐渐增大,光衰减量的降幅越来越小. 电压达到最大时,衰减量的变化趋于平缓,其值在 0.7 ~ 0.8 dB 之间. 此外该成品在升

降压重复性能测试中表现稳定,固定电压下衰减量最大偏差在 0.4 dB 以内.

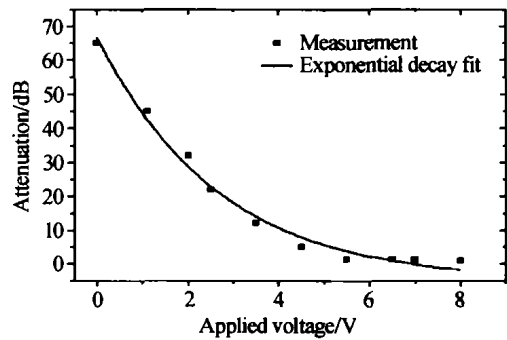


图7 光衰减量随电压变化曲线
Fig.7 The attenuation Loss as a function of voltage

4 结论

基于 CNC 雕刻技术和激光点焊技术研制了一种新的微加工型 VOA,其实现原理利用了光纤直接耦合的横向错位. 本文对器件进行了模拟状态分析,并对性能进行了测试. 结果表明:该 VOA 工作范围为 0 ~ 65 dB,响应速度小于 2.3 ms,插入损耗小于 0.8 dB.

参考文献

- 1 赵小林,李文军,周光亚,等. 电磁驱动 MEMS 可调式光衰减器的设计. 微细加工技术,2000,(4):60~67
Zhao X L, Li W J, Zhou G Y, et al. Microfabrication Technology,2000,(4):60~67
- 2 Wilfried Noell, Pierre-Andre Clerc, Laurent Dellmann, et al. Applications of SOI-Based optical MEMS. IEEE J Select Top Quantum Electron, 2002,8(1):148~154
- 3 Nemoto S, Makimoto T. Analysis of splice loss in single-mode fibers using a gaussian field approximation. Optical and Quantum Electronics, 1979,11(5):447~457
- 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 曹钟慧,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 Photonica Sinica,2004,33(7):826~829
- 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 Guoqiang. Practical numerical simulation techniques by ANSYS. Xi'an: Published by Northwestern Polytechnical University Press, 2001
- 7 晏辉鸣,万鹏,吴兴坤. 光纤直接耦合微加工型 1×2 光开关. 光子学报,2004,33(5):536~539
Yan H M, Wan P, Wu X K. Acta Photonica Sinica,2004,33(5):536~539

Micromachining Based Direct-Coupled Variable Optical Attenuator

Yan Huiming, Cao Zhonghui, Wu Xingkun

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

Received date: 2004-03-15

Abstract A design of micromachining based direct-coupled variable optical attenuator (VOA) is presented. The device operates by misaligning a fiber-to-fiber coupling through a lateral displacement of one of the fibers mounted on a micro-machined flexure driven electromagnetically. The VOA was fabricated using CNC engraving and laser spot welding technologies and features a fast dynamic response (< 2.3 ms), great dynamic range (0 ~ 65 dB) and wide bandwidth. In order to optimize micro-mechanical structure an FET software package ANSYS was employed and simulation of the device operation is reported in details.

Keywords Variable optical attenuator (VOA); Direct couple; Fiber-optic communications



Yan Huiming received his B. E. degree from Zhejiang University in 2002 and is currently pursuing the M. E. degree in optical engineering at Zhejiang University. His research interest is in the field of fiber-optic devices.