

doi:10.3788/gzxb20134212.1478

可变透镜边沿模拟顶角可调棱镜的可变光衰减器

陈陶, 梁忠诚, 徐荣青

(南京邮电大学 光电工程学院, 南京 210023)

摘要:设计并制作了一种集成可变透镜的可变光衰减器. 该器件以具有圆柱状通孔的精密套管为透镜腔, 套管两端的侧壁上分别连接输入/输出光纤准直器. 准直器的光轴穿过可变透镜边沿而非中心, 可变透镜边沿模拟顶角可调棱镜, 形成“输入准直器+可调液体棱镜+输出准直器”的结构. 通过电湿效应形成顶角可调的棱镜效应, 使输入光纤准直器发出的光偏离输出光纤准直器最佳接收位置, 进而实现光纤准直器耦合光强的调控, 达到光的衰减控制目的. 实验结果表明, 该光衰减器的衰减范围达到 2~53 dB, 可用于光通信实验的演示和学生实验等场合.

关键词:光通信; 可变光衰减器; 可变液体透镜; 模拟棱镜; 顶角可调

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)12-1478-4

A Variable Optical Attenuator Based on Liquid Optical Wedge

CHEN Tao, LIANG Zhong-cheng, XU Rong-qing

(College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210003, China)

Abstract: A novel variable optical attenuator device of based of variable-focus liquid lens was proposed and fabricated, of which basic structure included a cylindrical precision tube as the lens chamber and its side wall sandwiched between two collimators. Liquid lens approximated as optical wedge to form structure of “input collimator+adjustable lens prism+output collimator”, the optical axis of the collimator run through the edge of the variable lens. The light emitted by the input fiber collimator deviated from the output fiber collimator best receiver position, through liquid lens electrowetting on dielectric analoging prism, to realize the fiber collimators coupling light intensity and control optical attenuation. The experimental results show that the range of attenuation values of variable optical attenuator rise up to 2~53 dB, and can be used for demonstration of optical communication experiment, experimental teaching or other occasions.

Key words: Optical communications; Variable optical attenuator; Variable-focus liquid lens; Analog prism; Angle adjustable

0 引言

随着光纤到户(Fiber To The Home, FTTH)的进一步推广, 光纤通信器件的研制获得了国内外研究人员的格外青睐. 可变光衰减器(Variable Optical Attenuator, VOA)作为光纤通信器件中一种重要的光无源器件, 主要用于波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)系统

中各信道的光功率均衡、光纤放大器放大后的光信号调整、模拟光纤长距离传输、传输系统的动态检测等^[1-4].

可变液体透镜可以通过改变液体界面形状来实现焦距变化或光的可控偏转, 具有良好的操控性和低廉的成本, 将取代传统透镜可应用于光学开关和光互连等信息器件^[5-12]. 南京邮电大学微流控光学中心近年来推出了基于变焦液体透镜的可调光衰减

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60878037)、江苏省自然科学基金(No. BK2009424)和南京邮电大学项目(No. NY212061)资助
第一作者: 陈陶(1974-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为光通信、微流控光学信息器件技术. Email: chent@njupt.edu.cn
导师(通讯作者): 梁忠诚(1958-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电信息技术. Email: zliang@njupt.edu.cn
收稿日期: 2013-04-28; 录用日期: 2013-07-05

器^[13,14].文献[15]提出了一种新颖的、集成压控可变液体透镜的光衰减器装置,利用可变透镜的边沿模拟棱镜,通过外置压力控制可变透镜顶角的偏光效应从而控制一对准直器光强耦合.本文使用电湿液体透镜取代该文献中的压控液体透镜,利用液体透镜极方便地电控改变接触面形状技术来模拟顶角可变棱镜,从而使光衰减器集成度更高、控制更灵活.

1 VOA 的结构设计

VOA 结构原理如图 1^[3],以经过精密加工的金属套管为主体,套管的两端设置左连接器管脚、右连接器管脚.这样,套管内的空隙形成透镜腔,用于存储液体透镜的介质;透镜腔内注入三种互不相溶且折射率各异的液体并分别为导电液体、绝缘液体和导电液体,这三种液体构成透镜介质,用于构成顶角可调的棱镜;套管因采用导电材料制作因而可作为一个电极,另外的电极是用导电材料制作的左连接器管脚和右连接器管脚;将输入、输出光纤准直器设置于透镜边沿两侧;外加电压通过电湿效应控制液体透镜的形状,以实现透镜顶角角度的调节来模拟顶角可调的棱镜,从而控制从两光纤准直器的光强耦合效率以实现光的衰减可控调节;由此形成具有“输入光纤准直器+顶角可调的棱镜+输出光纤准直器”结构的 VOA.

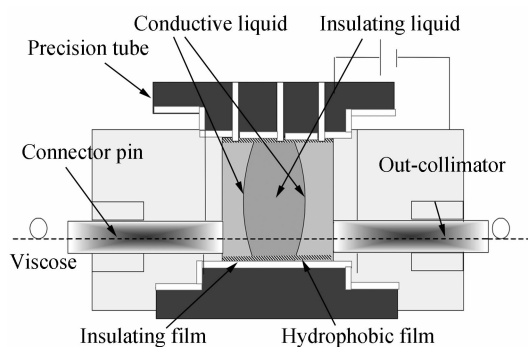


图 1 可变光衰减器的结构原理

Fig. 1 Structure and principle of variable optical

为形成电湿效应,精密套管的内侧涂覆有绝缘层,绝缘层与液体接触的内侧设有疏水层.套管侧面开设有三个注液小孔分别用于三液体的注入.控制电湿效应的电压源为直流电压源.给一个初始电压 V_0 .利用电湿效应使液体接触面呈平面形状,输入/输出光纤准直器端面设置于光通过三液体后最佳耦合位置处.外加电压通过电湿效应控制液体透镜的形状实现透镜顶角角度的调节,从而模拟顶角可调的棱镜,控制从输入光纤准直器耦合到输出光纤准直器的光强耦合效率以实现光的衰减可控调节.

2 器件制作

精密套管的制备采用金属铝柱精密经机械加工成管套并抛光而成,可以作为公共电极.套管的侧面预留三个注液小孔,套管的内壁上刻上一 V 型小槽用于两根光纤准直器的定位和存放.连接器管脚利用导电硅橡胶铸模而成,作为另一电极,边沿圆形通孔为光纤预留位置,硅橡胶的柔韧性使得光纤准直器的插入与拔出更方便.导电液和绝缘液分别采用盐水和绝缘油.绝缘层采用真空镀膜法生成 $4 \mu\text{m}$ 厚的派瑞林.疏水层采用 Teflon@ AF1600 涂层来实现.密封胶采用环氧树脂.

注液时,按照计算好的液体体积依次在三个注液小孔内缓缓注入导电液体、绝缘液体.由于左右连接器管脚与导电液体直接接触,电压施加在导电液体和套管之间的绝缘介电层上,其界面张力因电湿效应作用而降低,从而改变导电液体和绝缘液体界面的形状,实现透镜形状的控制.给一个初始电压 V_0 .约 70 V,控制电湿效应使三液体接触面呈平面如图 2,输出光纤准直器端面设置于出射光通过三液体后束腰位置处.两光纤准直器设置于透镜边沿两侧呈最佳耦合态;增加或减小外加电压,三液体接触面重新形成弯月面,即液体透镜的形状随之改变,实现透镜顶角角度的调节来模拟顶角可调的棱镜,从而控制从出射光纤准直器耦合到接收光纤准直器的光强耦合效率以实现光的衰减可控调节.其电压与输出光强的关系由设计方案计算求得或通过实验测得.

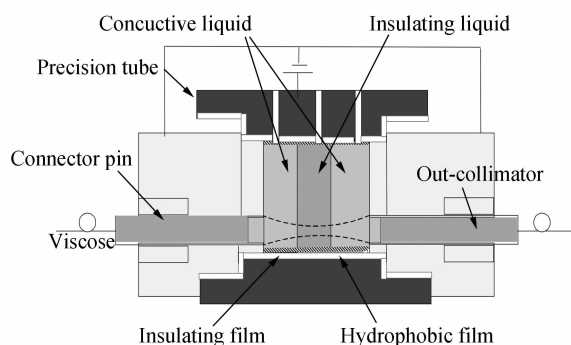


图 2 可变光衰减器的工作状态

Fig. 2 Work status of variable optical attenuator

3 光衰减控制理论

等效棱镜模型及偏光控制分析如图 3,当施加特定调制电压 V_m 时,棱镜的初始工作状态为图 2,棱镜顶角为 0,设置输入/输出光纤准直器为最佳耦合状态,即准直器光斑束腰位置为其中心连线中点.

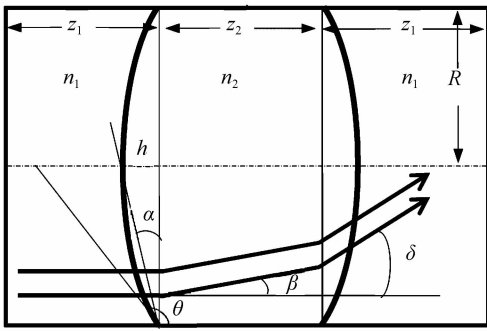


图3 等效棱镜模型及偏光控制分析

Fig. 3 Liquid lens approximately as optical wedge and control the deflection of ray trace

图3中, n_1 、 n_2 分别为导电、绝缘液体的折射率, 设 $n_1 < n_2$; R 是精密套管半径, θ 导电液体和绝缘液体间接触角, 接触球面半径 $r = -R/\cos \theta$, $h = r - \sqrt{r^2 - R^2}$; 因棱镜顶角是小角度, 本分析系统中用 α 来代表棱镜顶角, $\alpha = h/R$; β 和 δ 为出射光纤准直器出光第一和第二偏转角; $\cos \theta(V) = \cos \theta_0 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2\gamma_{12} e} V^2$, 其中 γ_{12} 为导电液体和绝缘油间的界面张力, $\epsilon_0 \epsilon_r$ 和 e 分别为绝缘介电层介电系数和厚度, θ_0 为外加电压为 0 时液-液初始接触角。

输入/输出光场通过相同型号的光纤准直器耦合, 准直器的束腰位置(距离)位于它们连线的中点. 在液体透镜形状如图 2 时, 输出光纤准直器能全部接收输入光纤准直器的出射光; 为图 3 棱镜形状时, 只能接收到部分光强, 控制棱镜顶角 α 便可控制光的耦合效率. 从而输入/输出光纤准直器加上棱镜顶角 α 可变的可变透镜组成了一个 VOA. 光偏转角的计算如图 3.

由 Snell 定律及图 3 几何关系可知

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \delta = 2\beta \quad (1)$$

则

$$\delta = 2 \arcsin (n_1/n_2 \sin \alpha) \quad (2)$$

因此, 通过电湿效应控制棱镜的顶角 $\alpha(V)$, 就可从出射准直器出射光束的偏转角 $\delta(V)$, 从而建立两准直器之间的耦合衰减关系, 进而构成 VOA. 两准直器在自由空间的倾斜角度耦合适配光能损失关系由以下两部分组成^[16], 即离轴(含纵向)损耗 L_{offset} 和倾斜损耗 L_{tilt} , 总的衰减损耗为

$$L_{\text{total}} = L_{\text{offset}} + L_{\text{tilt}} \quad (3)$$

此像离轴距离

$$X_0 = z_1 \tan (\delta(V)) + z_2 \tan (\beta(V)) \quad (4)$$

纵向距离

$$Z_0 = z_1 \left(\frac{1}{\cos (\delta(V))} - 1 \right) + z_2 \left(\frac{1}{\cos (\beta(V))} - 1 \right) \quad (5)$$

式(4)和(5)中 z_2 为绝缘液体厚度, $d = z_1 - z_2/2$ 为

自聚焦透镜束腰位置.

$$L_{\text{offset}} = A_{\text{offset}} X_0^2 \quad (6)$$

$$L_{\text{tilt}} = A_{\text{tilt}} \delta^2 (V) \quad (7)$$

式中, 离轴系数

$$A_{\text{offset}} = \frac{-5}{\ln 10} \frac{1}{|F|^2} \left\{ F_r \left[\frac{4}{w^4 (Z_0 - d)} - \frac{k^2}{R^2 (Z_0 - d)} - \frac{4F_r}{w^2 (Z_0 - d)} \right] + F_i \frac{4}{w^2 (Z_0 - d)} \left[\frac{k}{R(Z_0 - d)} - F_i \right] \right\} \quad (8)$$

倾斜系数

$$A_{\text{tilt}} = \frac{5k^2 F_r}{\ln(10)} \frac{1}{|F|^2} \quad (9)$$

式中

$$F = F_r + iF_i = \frac{1}{w^2 (Z_0 - d)} + \frac{1}{w^2 (d)} + i \frac{k}{2} \left[\frac{1}{R(Z_0 - d)} - \frac{1}{R(d)} \right] \quad (10)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (11)$$

$$w^2(z) = w_T^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_T^2} \right)^2 \right] \quad (12)$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_T^2}{\lambda z} \right)^2 \right] \quad (13)$$

式中 w_T 为高斯光束束腰位置 $z = d$ 处的光斑半径.

4 光衰减特性的实验

由上述讨论可知, 输出光纤准直器的端面位置为折射后光束的腰斑平面为最佳耦合位置. 实验中, 衰减器主体采用金属铝柱经精密机械加工而成芯径 4 mm 的子母套管, 子套管内侧蒸镀 4 μm 的派瑞林-N 作为绝缘膜层, 再涂刷 1% 的特氟龙溶液并经两次烘烤成疏水层. 子套管内预留 V 形槽和定位销以精确设置准直器, 准直器工作距离选取 10 mm, 工作波长 1.55 μm , 束腰半径 0.5 mm. 绝缘液体选用折射率较高, 与水互不相溶的透镜液体溴代十二烷($\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{Br}$)的折射率均为 1.458; 导电液体采用 5% 的氯化锂水溶液, 折射率为 1.34. 器件工作需设定初始电压 V_0 , 本器件经测试该电压为 74 V, 通过加压或减压电控调谐, 以光功率计测试光强变化. 图 4 为实验样品, 图 5 为减压驱动光衰减量理论和实验关系曲线. 由图 5 看出, 在约 20 V 的控制电压变化范围内光衰减量范围可达 2~53 dB; 当控制电压由 65 V 逐渐降低到 53 V, 光强衰减量由 12 dB 变为 53 dB 且线性度较好; 电压由 74 V 调节到 65 V 时, 实验值与理论值相比衰减量约高 2 dB, 这是由于偏光控制光路上存在 4 个面反射损失以及液体本身对光有一定的吸收造成的, 可通过选用与准直器

折射率匹配的、透光度更高的液体组合来减少反射损失和吸收损耗以增强初始化光强耦合效率.此外,由于液体折射率和液面形状易受温度的影响,可通过微调初始工作电压加以补偿.

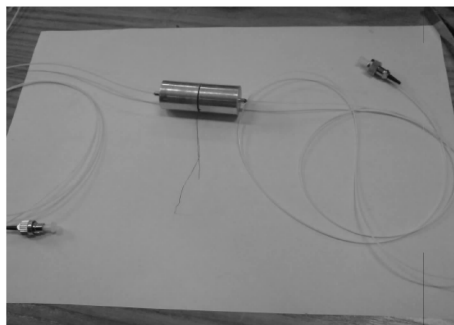


图4 集成可变透镜的可变光衰减实验样品

Fig. 4 The experimental sample of VOA integrated variable lens

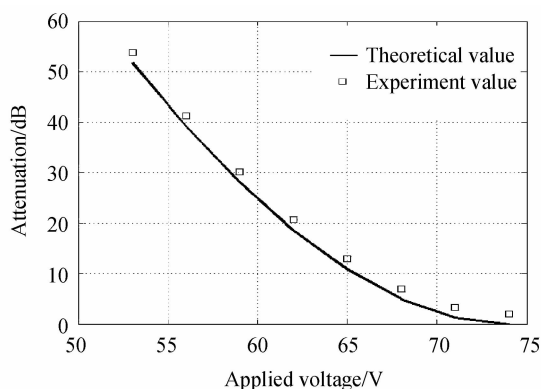


图5 衰减器耦合效率与外加电压关系

Fig. 5 Calculated and measured VOA attenuation values versus liquid lens applied voltage

5 结论

可变液体透镜可以改变光学系统的光通量和视场性能,具有良好的操控性和适应性,将取代传统透镜可应用于光学开关和光互连.基于上述背景,本文提出一种集成电湿驱动可变液体透镜的可变光衰减器件,实验结果表明,这种光衰减器的衰减范围达到2~53 dB,且具有结构简单、容易制作等优点.然而这种新颖的可变光衰减器,由于采用了多种液体组合限制了透光性,反射损耗较多,初始化时的损耗已达2 dB.且该器件尺寸过大,这样就限制了这种可变光衰减器的集成应用,减小插损和尺寸问题将会是未来研究的主要问题.当然现阶段可用于光通信实验的演示和学生实验等低端场合,经过改进后有望在其他领域得到广泛的应用.

参考文献

[1] SHAO Guo-cheng, DAI Xu-han, YANG Hao-yu, *et al.* A close-loop controlled off set type MEMS variable optical attenuator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1888-1891.
邵国成,戴旭涵,杨昊宇,等.一种闭环控制的错位型MEMS可调光衰减器[J].光子学报,2006,**35**(12): 1888-1891.

[2] WAN Peng, YUAN Ye, WU Xing-kun. A micromachining based miniature variable optical attenuator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(10): 1505-1508.
万鹏,袁野,吴兴坤.超小型非硅基微机械可调光衰减器[J].光子学报,2006,**35**(10): 1505-1508.

[3] YAN Hui-ming, CAO Zhong-hui, WU Xing-kun. Micromachining based direct-coupled variable optical attenuator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 718-721.
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[J].光子学报,2005,**34**(5): 718-721.

[4] YUAN Ye, CAO Zhong-hui, BAO Jun-feng, *et al.* Measurement and dynamic response analysis on a MEMS variable optical attenuator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 439-442.
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[J].光子学报,2004,**33**(4): 439-442.

[5] REZA S A, RIZA N A. A liquid lens-based broadband variable fiber optical attenuator[J]. *Optics Communications*, 2009, **282**(7): 1298-1303.

[6] REZA S A, RIZA N A. High dynamic range variable fiber-optical attenuator using digital micro mirrors and opto-fluidics [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(13): 845-847.

[7] SMITH N R, ABEYSINGHE D C, HAUS J W, *et al.* Agile wide-angle beam steering with electrowetting micropisms[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(14): 6557-6563.

[8] KUIPER S, HENDRIKS B H W. Variable-focus liquid lens for miniature cameras[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(7): 1128-1130.

[9] HAYES R A, FEENSTRA B J. Video-speed electronic paper based on electrowetting[J]. *Nature*, 2003, **425**(6956): 383-385.

[10] HEIKENFELD J, STECKL A J. Intense switchable fluorescence in light wave coupled electrowetting devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **86**: 011105.

[11] CHEN Tao, LIANG Zhong-cheng, HUANG Yong-lin, *et al.* Design of novel plane optical switch array device based on optofluidic[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(11): 1065-1068.
陈陶,梁忠诚,黄勇林,等.一种基于微流控技术的二维电光开关阵列设计与研制[J].光电子·激光,2010,**21**(11): 1065-1068.

[12] CHEN Tao, LIANG Zhong-cheng, XU Ning, *et al.* Novel space optical switch device of optofluidic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 797-801.
陈陶,梁忠诚,徐宁,等.新颖的微流控电调谐空间光开关[J].光子学报,2010,**39**(5):797-801.

[13] CHEN Tao, LIANG Zhong-cheng, QIAN Chen, *et al.* Properties of novel variable optical attenuator based of electrowetting micropisms[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(11): 371-375.
陈陶,梁忠诚,钱晨,等.基于电润湿微棱镜技术的可调光衰减器特性分析[J].物理学报,2010,**59**(11): 371-375.

[14] CHEN Tao, LIANG Zhong-cheng, QIAN Chen, *et al.* Properties of novel variable optical attenuator device based of variable-focus microlens [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(8): 082302.
陈陶,梁忠诚,钱晨,等.基于液体变焦透镜的可调光衰减器性能[J].激光与光电子学进展,2010,**47**(8): 082302.

[15] CHEN Tao, LIANG Zhong-cheng, XU Rong-qing, *et al.* A VFOA based of liquid lens approximately as optical wedge: China, ZL201110049070.2[P]. 2011-09-21.
陈陶,梁忠诚,徐荣青,等.一种利用变焦透镜边沿顶角可调的可变光衰减器:中国,ZL201110049070.2[P].2011-09-21.

[16] BUREN M, RIZA N A. Foundations for low-loss fiber gradient-index lens pair coupling with the self-imaging mechanism[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(3): 550-565.