

基于电润湿微棱镜技术的可调光衰减器特性分析*

陈 陶 梁忠诚† 钱 晨 徐 宁

(南京邮电大学 光电工程学院, 南京 210003)

(2009 年 12 月 27 日收到; 2010 年 4 月 7 日收到修改稿)

利用电控改变固液界面湿润角的电润湿微棱镜(EMP)技术以及双自聚焦透镜组合设计了一类新颖的可调光衰减器,并对该衰减器的衰减性能进行了原理分析和实验测量.理论分析和实验结果表明其具有良好的光衰减控制效应,在不大的电压变化范围(例如 135—139 V)内即可实现 2—60 dB 的光衰减范围.该器件构思新颖,具有结构简单、容易制作的优点,经过优化后将会在光通信领域得到广泛的应用.缺点是工作电压偏高,需要进一步筛选出介电系数高的物质来作为介电绝缘层材料,以便降低工作电压,达到实际可以使用的目的.

关键词: 微流控光学, 电湿效应, 可调光衰减器, 电润湿微棱镜

PACC: 4280S, 4281M, 4260K

1. 引 言

随着光纤通信系统的广泛应用,可调光衰减器(VFOA)已成为光纤通信系统中的一种重要的光纤无源器件,主要用于密集波分复用(DWDM)各信道的光功率均衡和调整经光纤放大器放大后的光信号等.目前市场上 VFOA 价格昂贵,成为光纤通信系统普及的障碍之一.一般的 VFOA 不能实现衰减量精确调节并锁定在特定值,而且通常为衰减片与步进电机联合型,通过微型步进电机控制连续渐变衰减片旋转或平移来达到数字化可调光衰减量^[1].但该类设计受限于步进电机成本高,体积较大,难以集成于日益缩小的光通讯模块中;而且其核心部件之一的连续渐变衰减片,镀膜工艺要求高,目前国内尚不能生产.

近年出现的电润湿调制实现的微流控光学光器件^[2]是一种利用电控改变固液界面湿润角的光束控制技术.其中最典型的电润湿光学新产品是可调的液态透镜系统^[3]和显示器^[4].最近 Syed 和 Nabeel 将电湿效应变焦液体透镜用于可调光衰减器的研究^[5,6],他们的方法是利用液体透镜曲率的电控变化,将其边沿模拟一个电控光学棱镜,从而实现光束偏转控制.这种方法在计算过程中将微透镜的接触球面折射等效为平面折射,计算误差比较

大.我们利用 EMPs^[7]进行光束控制的理论设计了一种新颖的基于电湿效应的光衰减器装置. EMPs 能通过特定电压调制液体接触角从而模拟各种几何棱镜中的折射,是一种真正意义上的电控光学棱镜,给实验和理论分析带来极大的便利.

2. 电控微棱镜理论

根据 Neil 等人^[7]提出的 EMPs 的理论,我们设计了如图 1 所示的 EMPs 单元.

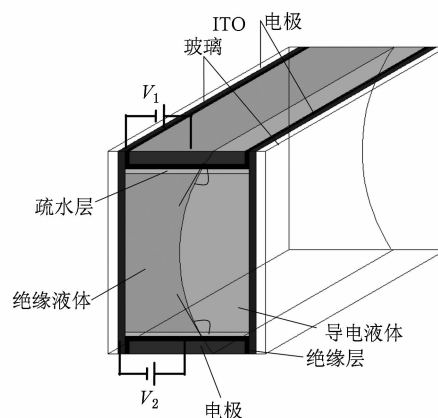


图 1 EMPs 基本结构模型

在本器件模型中,液体接触角很容易转换成棱镜顶角.在导电液体和上下导电平板电极之间的分

* 国家自然科学基金(批准号:60878037,60977069,60707006),江苏省自然科学基金(批准号:BK2009424)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zliang@njupt.edu.cn

别施加电压 V_1 和 V_2 , 可以有效地分别改变导电液体与介电层之间的界面张力, 从而改变导电液体与介电层的接触角为 θ_{v1} 和 θ_{v2} . 根据杨氏方程, 图 1 中的接触角 $\theta_{vi} (i = 1, 2)$ 取决于三相之间的界面张力, 即

$$\cos\theta_{vi} = \cos\theta_0 + \frac{\epsilon_0\epsilon_r}{2\gamma_{12}d}V^2, \quad (1)$$

其中 $i = 1, 2$; γ_{12} 为导电液体和绝缘油间的界面张力, $\epsilon_0\epsilon_r$ 和 d 分别为绝缘介电层介电系数和厚度, θ_0 为外加电压为 0 时固液初始接触角.

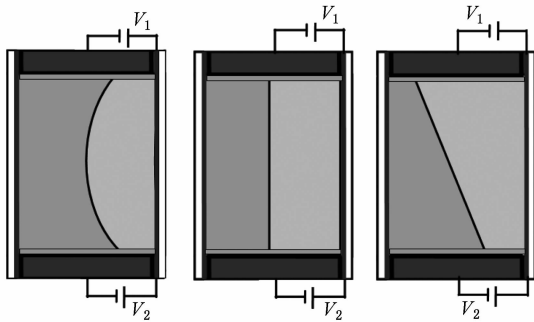


图 2 EMPs 调制过程示意图 (a) $V_1 = V_2 = 0$; (b) $V_1 = V_2 = V_0$; (c) $V_1 < V_0 < V_2$

EMPs 调制过程如下所述. 如图 2(a), 当外加电压为 0 时, 由于器件侧壁上涂覆有疏水的含氟聚合物, 它与导电溶液接触角很大 ($\theta_0 \sim 115^\circ$), 水和油之

间接触面会形成一个球面. 在绝缘介电层中加电压 (电荷), 液体和含氟聚合物间的有效表面张力将会减小, 从而会导致接触角 (θ_{v1} 和 θ_{v2}) 的减小. 当所加电压满足条件 $\theta_{v1} = \theta_{v2} = 90^\circ$ 时, 形成图 2(b) 所示的扁平面. 当同时满足 $\theta_{v1} > 90^\circ, \theta_{v2} < 90^\circ$ 和 $\theta_{v1} + \theta_{v2} = 180^\circ$ 时, 形成如图 2(c) 所示的液体棱镜. 考虑到目前可用的导电液体和含氟聚合物限制了接触角 θ_v 在 70° 就产生了饱和, θ_v 的取值范围为 $70^\circ - 110^\circ$. 此时棱镜的顶角为 $\alpha = |90^\circ - \theta_v|$, 取值范围为 $0 - 20^\circ$, 这个顶角变化范围已经远远大于 VOFA 的需要.

3. EMPs 可调光衰减器结构设计

EMPs 可调光衰减器结构如图 3 所示. 图中 EMPs 在特定电压调制下形成各种光学棱镜形状. 输入/输出单模光纤通过相同型号的自聚焦透镜 GRIN1 和 GRIN2 耦合, 自聚焦透镜的束腰位置 (距离) 位于它们连线的中点. 在 EMPs 为图 3(a) 形状时, GRIN2 能全部接收 GRIN1 的出射光; 为图 3(b) 棱镜形状时, GRIN2 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/输出单模光纤连同各自的自聚焦透镜加上棱镜顶角 α 可变的 EMPs 组成了一个微流控 VOFA.

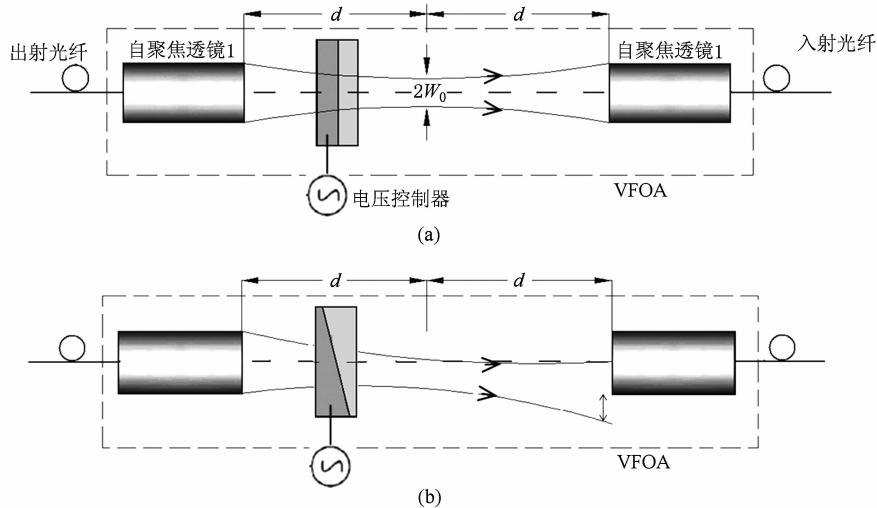


图 3 EMPs 可调光衰减器结构 (a) EMPs 液体界面为竖直平面; (b) EMPs 液体界面为倾斜平面

为了获得最大轴向偏转距离, 设 EMPs 紧贴 GRIN1 输出端面. 光偏转角的计算如图 4 所示.

由 Snell 定律及图 4 几何关系, $n_{oil}\sin\alpha = n_{water}\sin\beta$, $\gamma = \beta - \alpha, n_{water}\sin\gamma = \sin\delta$,

则

$$\begin{aligned} \delta &= \sin^{-1}(n_{water}\sin\gamma) \\ &= \sin^{-1}\left[n_{water}\sin\left(\sin^{-1}\left(\frac{n_{oil}\sin\alpha}{n_{water}}\right)\right)\right]. \quad (2) \end{aligned}$$

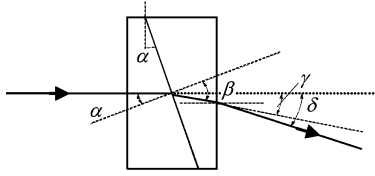


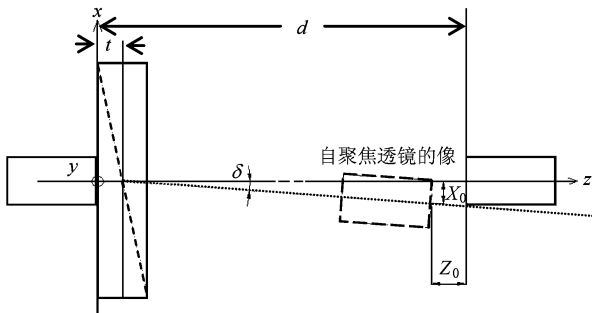
图4 EMPs 偏转角计算

因此,通过电湿效应控制 EMPs 的顶角 $\alpha(V)$, 就可从出射单模光纤 SMF_In 通过 GRIN1 出射光束的偏转角 $\delta(V)$, 从而建立 SMF_In 和入射单模光纤 SMF_Out 之间的耦合衰减关系, 进而构成 VOFA. GRIN1 和 GRIN2 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, 即离轴(含纵向)损耗 L_{offset} 和倾斜损耗 L_{tilt} , 总的衰减损耗为

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

如图5, GRIN1 的自聚焦像位置为虚线所示, 此像离轴距离

$$X_0 = (2d - t) \tan(\delta(V)), \quad (4)$$

图5 自聚焦透镜间耦合的三种损耗, 分别是纵向 (Z_0)、离轴 (X_0) 和角度 (δ) 损耗

纵向距离

$$Z_0 = (2d - t) \left(\frac{1}{\cos(\delta(V))} - 1 \right), \quad (5)$$

(4—5) 式中 t 为油层厚度, d 为自聚焦透镜束腰位置.

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

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

其中, 离轴系数为

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

倾斜系数为

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

其中

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

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

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

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

(13) 式中 w_r 为高斯光束束腰位置 $z = d$ 处的光斑半径.

4. 性能分析与测试

实验中, 对 EMPs 的材料选取为: 导电液体用水、丙三醇和 KCl 按照质量比 80:20:0.1 来混合. 这个混合液的表面张力非常接近于纯水的表面张力 (73 MV/cm). 用阿贝折射计测量出这个混合液的折射率是 $n = 1.36$. 绝缘油选用溴代十二烷 ($C_{12}H_{25}Br$), 折射率为 1.458, 密度为 1.019 g/cm³, 与导电混合液密度差不多, 以去除重力影响. 绝缘介电层材料使用 100 nm 厚的 SiO₂, SiO₂ 与液体接触的部位涂覆一层 Teflon-AF2400 以保持疏水性, 这样固液间的表面张力大约为 38.1 MV/cm^[7]. 绝缘油层厚度 $t = 1$ mm. 如图6所示, 当电压变化范围为 (130—140 V) 时, EMPs 的顶角变化范围为 0—1.8°, 已经大大满足 VFOA 的要求.

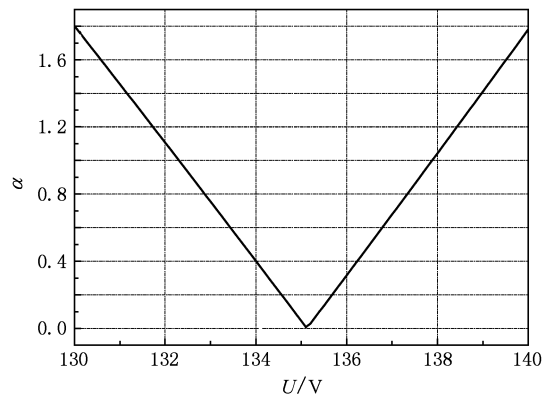


图6 EMPs 顶角与外加电压仿真关系

自聚焦透镜参数选取 $w_T = 0.5 \text{ mm}$, $d = 100 \text{ mm}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$. 则联合公式(1—13)可得总的衰减系数 L_{total} 与外加电压理论计算关系为图 7 所示. 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 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 测试中使用的光功率计为 AQ2160-01(测量范围 $-70 \sim -5 \text{ dBm}$). 图 7 显示测试结果与理论计算曲线的对比. 由图 6 和图 7 可以看出, 当外加电压为 135 V 时, EMPs 的界面为顶角等于 0 的棱镜即垂直平面, 此时 VFOA 衰减量为最小(测量值为 2.0 dB , 在忽略插损时理论计算值为 0), 随着外加电压增大(或减小), 棱镜顶角线性增加, VFOA 的衰减量迅速增加, 当电压为 139 V (或 131 V) 时, 衰减量已接近 60 dB , 完全满足光通讯中对 VFOA 的需要.

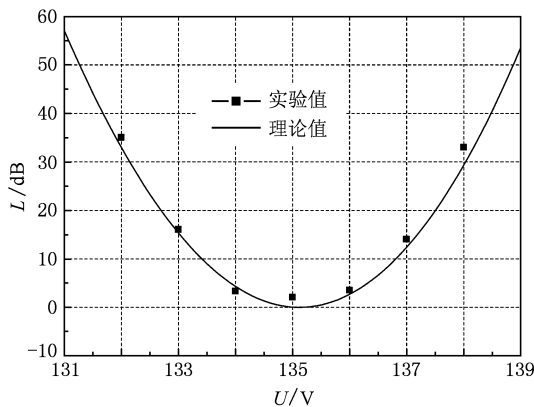


图 7 VFOA 衰减量与 EMPs 外加电压关系

对于插损, 对纯二氧化硅芯的光纤, 两个端面的菲涅尔反射损耗约为 8% , 两个柱状透镜端面的菲涅尔反射损耗约为 8% , 输入和输出端面的总反射损耗约为 8% , 油水界面的损耗可用 $R_{\text{oil}} = (n_{\text{oil}} - n_{\text{water}})^2 / (n_{\text{oil}} + n_{\text{water}})^2 \approx 0.34\%$ 估算, 加上镀膜带来的额外损耗, 插损总计约为 30% . 考虑到整个系统结构理论分析模型中使用了理想化的镀膜材料, 并忽略了液体的粘滞力, 此理论分析给出了与实测数据相当一致的结果.

5. 结 论

本文利用 EMPs 和双自聚焦透镜组合设计了一类新颖的 VOFA, 并对该衰减器的衰减性能进行了原理分析和实验测量. EMPs 通过特定电压调制特定的液体接触角从而模拟各种几何棱镜中的折射. 理论分析和实验结果表明使用 EMPs 和自聚焦透镜组构造的 VFOA 具有良好的光衰减控制效应, 在不大的电压变化范围(例如 $135 \sim 139 \text{ V}$) 内即可实现 $2 \sim 60 \text{ dB}$ 的光衰减范围. 不过, 本器件工作电压偏高, 但如果改用介电系数高的物质来作为介电绝缘层材料, 可以大大降低工作电压, 例如采用介电系数约为 200 的 BST 材料可将工作电压降低 10 倍. 本器件构思新颖, 具有结构简单、容易制作的优点, 经过优化后将会在光通信领域得到广泛的应用.

[1] Yuan Y, Zou Y Z, Bao J F, Cao Z H, Wu X K 2004 *Acta Optica Sinica* **24** 463 (in Chinese) [袁 野、邹勇卓、鲍俊峰、曹钟慧、吴兴坤 2004 光学学报 **24** 463]
 [2] Chen T, Liang Z C, Zhao R 2009 *Proc. SPIE* **7381** 73811L
 [3] Kuiper S, Hendriks B H W 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 1128
 [4] Heikenfeld J, Steck A J 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 011105

[5] Syed A R, Nabeel A R 2009 *Optics Communications* **282** 1298
 [6] Syed A R, Nabeel A R 2009 *IEEE Photonics Technology Letters* **21** 845
 [7] Neil R S, Don C A, Joseph W H, Jason H 2006 *Optics Express* **14** 6557

Properties of novel variable optical attenuator based on electrowetting microprisms^{*}

Chen Tao Liang Zhong-Cheng[†] Qian Chen Xu Ning

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

(Received 27 December 2009; revised manuscript received 7 April 2010)

Abstract

A novel variable fiber optical attenuator (VFOA) using an electrowetting microprisms (EMPs) and two self-focusing lenses is proposed. EMPs can change the wetting angle of solid-liquid interface technology by electronic control methods. The attenuation of the VFOA is analyzed by the theory and experimental measurements. Theoretical analysis and experimental results show that a good control effect of light attenuation in the small voltage range (such as 135—139 V), and the optical attenuation range can achieve in 2—60 dB. With the merits of novel conception, easy production, low cost and simple structure, the device will be widely used in communications fields after the optimized design. Disadvantage of this device is high voltage, in order to reduce the operating voltage to achieve the purpose of actual use, screening of high dielectric constant material as the dielectric layer material is topic of future research.

Keywords: optofluidics, variable optical Attenuator(VFOA), electro-wetting effect, microprisms(EMPs)

PACC: 4280S, 4281M, 4260K

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60878037, 60977069, 60707006), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Grant No. BK2009424).

[†] Corresponding author. E-mail: zcliang@njupt.edu.cn