

基于液体变焦透镜的可调光衰减器性能

陈陶 梁忠诚* 钱晨 徐宁

(南京邮电大学光电工程学院微流控光学技术研究中心, 江苏 南京 210003)

摘要 设计了一种新型的低成本、小体积的基于变焦液体透镜的可调光衰减器。该器件以具有圆柱状通孔的精密套管为透镜腔,腔内放置两种互不相溶的液体(水/油/水),腔内液体构成了薄(油)透镜介质;采用导电材料制作的套管作为一个电极,另两个电极则分别是与导电水溶液相接的左右管脚。通过介质上电润湿效应(EWOD)控制导电液体与绝缘油接触面形状,实现透镜焦距的调谐,进而实现单模光纤间耦合光强的调控,达到光的衰减控制目的。理论分析表明,这种光衰减器的衰减范围为0~60 dB,而且具有很好的波长相关损耗特性。

关键词 光学器件;可调光衰减器;介质上电润湿;液体变焦透镜

中图分类号 TN253

OCIS 230.2090 060.2340

文献标识码 A

Properties of Novel Variable Optical Attenuator Device Based on Variable-Focus Microlens

Chen Tao Liang Zhongcheng Qian Chen Xu Ning

(Center of Optofluidic Technology, College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, china)

Abstract A novel low-cost, small-size variable fiber-optical attenuator (VFOA) device based on variable-focus microlens consisting of two kinds of liquids is put forward, whose basic structure includes a cylindrical precision tube sandwiched between two single-mode fibers (SMFs). Two kinds of immiscible liquids are placed inside the tube (water/oil/water), and constitute a thin liquid (oil) lens medium. The tube is made from electric conductor to acts as an electrode, and the other two electrodes are the right and left connectors connecting the conductive aqueous solution, respectively. The focal distance is tuned by changing the curvature of the meniscus through the effect of electro-wetting, so as to control SMFs coupling light intensity, and ultimately to achieve controlling optical attenuation. Theoretical analysis shows that the range of attenuation values of VFOA is 0~60 dB, and has a very good micro-loss characteristics of wavelength dependence.

Key words optical devices; variable optical attenuator; electrowetting-on-dielectric; liquid variable-focus lens

1 引言

随着光纤通信系统的广泛应用,可调光衰减器(VFOA)成为光纤通信系统中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,也可用于模拟光纤长距离传输、传输系统的动态检测等。目前市场上可调光衰减器价格昂贵,成为光纤通信系统普及的障碍之一。现有可调光衰减器的实现方式主要包括机械型、阵列波导型、液晶型和微机电系统(MEMS)型等^[1~4]。一般的可调光衰减器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^[5]。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信模块中;而且其核心部件之一的连续渐变衰减

收稿日期: 2009-11-18; 收到修改稿日期: 2010-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(60878037, 60977069)和江苏省自然科学基金(BK2009424)资助课题。

作者简介: 陈陶(1974—),男,博士,讲师,主要从事光通信器件和微流控光学技术等方面的研究。

E-mail: chent@njupt.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zcliang@njupt.edu.cn

片,镀膜工艺要求高,目前国内尚不能生产。

基于电润湿效应(EWOD)的变焦微透镜可以改变微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,作为取代传统透镜可应用于光学开关、光互连、三维光存储、静态数码相机和医学内窥镜等系统。现有的研究和应用集中于单透镜变焦成像技术,比较典型的如荷兰 Philips 公司发布的 FluidFocus 和法国 Varioptic 公司发布的小型液体变焦透镜,这些透镜的变焦是利用电控方法通过改变液体的界面曲率而调节焦距^[6,7]。这种技术采用了流动的液体作为变焦的透镜组件,相对目前的机械变焦方式将有很多的优势。但现有的研究和应用集中于透镜变焦成像技术,对于应用于光通信领域的连接器件涉及很少。最近 S. A. Reza 等^[8,9]将电湿效应变焦微透镜用于可调光衰减器的研究,但是结构复杂、器件体积较大,不易于集成。最近,我们提出了一种新颖的基于电湿效应的光衰减器装置,并申请了国家发明专利^[10],这种电调谐微流控光学变焦透镜阵列器件构思新颖,具有结构简单、容易制作、适于集成的优点,将会在光通信信息领域得到广泛的应用。

2 可调光衰减器的结构设计

可调光衰减器的结构原理^[10]如图 1 所示。这种新颖的电调谐光衰减器,其特征在于以具有圆柱状通孔的导电精密套管为主体,套管位于左连接器管脚和右连接器管脚之间。这三者之间的空隙形成透镜腔,用于存储液体透镜材料;透镜腔内放置互不相溶的液体即第一导电液体、绝缘液体和第二导电液体,腔内液体构成透镜组介质;采用导电材料制作的精密套管作为一个电极,另两个电极则是用导电材料制作的左连接器管脚和右连接器管脚。精密套管的内侧设有绝缘层,绝缘层与流体接触的内侧设有疏水层。左、右连接器管脚中空为尾纤的插入口,插入口与液体接触处用薄玻璃片密封防止液体泄漏。

精密套管采用金属不锈钢柱精密机械加工而成,并进行了抛光处理,在此作为一个电极。左右连接器管脚采用导电硅橡胶铸模而成,中空为固定光纤预留通孔,孔的大小和单模光纤(SMF)外径相匹配,由于硅橡胶的柔韧性使得光纤的插入与拔出更方便,结合其他设备使尾纤固定得更牢固。为防止导电液体在低温使用时可能有的冰冻问题,用高浓度的盐溶液来降低冰点。为了保持盐水的低密度和折射率,采用氯化锂质量分数为 0.2 的溶液可导致冰点低于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,密度 ρ 为 1.12 kg/m^3 ,折射率为 1.38。绝缘液体油采用混合的苯基甲基硅氧烷,它具有高折射率和良好的电湿性能。溶解几个百分点碳四溴化合物($\rho=2.96\text{ kg/m}^3$)的绝缘液体的密度与盐溶液的密度相匹配,以去除重力的影响。由此得到的折射率为 1.55。绝缘介电层采用真空镀膜法生成微米量级厚的派瑞林(Parylene-N)。疏水层采用聚四氟乙烯聚合物材料涂层来实现。通过电湿效应,外加电压控制绝缘流体和导电液体界面的形状来调整焦点位置,从而调整出射光纤-透镜-接收光纤的光强耦合。

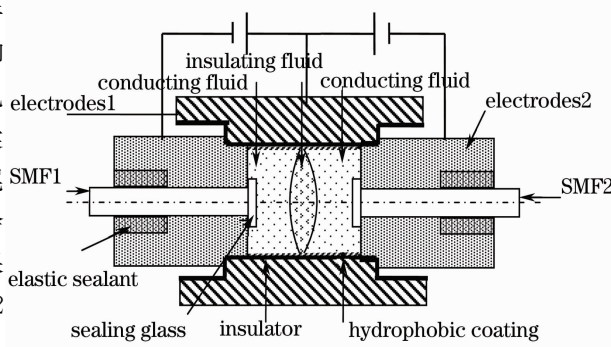


图 1 微流控可调光衰减器的结构原理

Fig.1 Structure and principle of optofluidic VFOA

3 光衰减控制理论

3.1 变焦透镜理论

基于微流控技术的可调光衰减器的结构简化图,如图 2 所示。涂覆有绝缘疏水介电层的圆柱形精密套管填充有折射率分别为 $n_{\text{water}}/n_{\text{oil}}/n_{\text{water}}$ 的“水/油/水”导电水溶液和绝缘油。在导电液体和电极之间的电压即疏水介电层两边的电压改变,可以有效地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 θ ,为讨论方便两边导电液与套管所加电压相等为 U 。根据杨氏方程,图 2 中的接触角 θ 取决于三相之间的界面张力,即^[11]

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

式中 γ_{12} 为导电水溶液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 时固液接触角。

假定图 2 中绝缘油层的厚度比较薄, 且 $n_{oil} > n_{water}$, 则在界面张力作用下绝缘油层形成一薄透镜(凸或凹透镜, 取决于 θ)。由几何关系, 水/油界面曲率为 $r = \frac{R}{\cos \theta}$, 其中 R 为套管半径。根据光线追迹, 很容易得到液体透镜模型的焦距

$$f = \frac{r}{n_{oil} - n_{water}} = \frac{R}{(n_{oil} - n_{water}) \cos \theta} \quad (2)$$

如果取 $n_{oil} = 1.55$, $n_{water} = 1.38$, $\gamma_{12} = 38.1 \times 10^{-3} \text{ N/m}$, $\theta_0 = 115^\circ$, $d = 1 \mu\text{m}$, $\epsilon_r = 1.993$, $R = 1 \text{ mm}$, 则当 $U = 0$ 时, 焦距 $f = -13.9 \text{ mm}$ 为凹透镜; 当 $U = 42.7 \text{ V}$ 时, $f = \infty$ 为扁平面; 当 $U = 57.5 \text{ V}$ 时, $\theta = 70^\circ$, $f = 17.2 \text{ mm}$ 为凸透镜。此后 θ 不再随 U 的增加而变化, 通常称这种现象为接触角饱和现象^[12]。由此本模型中液体透镜的有效焦距变化范围为 $-13.9 \sim 17.2 \text{ mm}$ 。

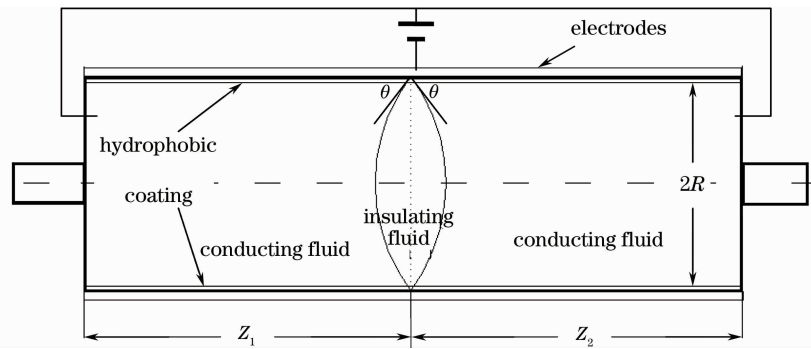


图 2 基于微流控技术的可调光衰减器的结构简化图

Fig. 2 Schematic diagram for VFOA device based on microfluidic technology

3.2 变焦透镜耦合的模场与衰减理论

“出射光纤-透镜-接收光纤”系统模场耦合简化系统, 如图 3 所示。保持油透镜为凸透镜状态, 初始电压状态应大于扁平面电压 42.7 V , 例如 U 取 57.5 V 。图 3 中, $r_0(z=0)$ 平面表示出射 SMF1 端面所在平面; $r_1(z=Z_1)$ 代表液体透镜(油)所在平面; $r_2(z=Z_1+Z_2)$ 表示接收 SMF2 端面所在平面; w_0 为出射光纤端面模场半径; w_1 为距离光纤 SMF1 为 Z_1 处的光斑半径; Z_2 为薄透镜(油)到接收 SMF2 端面的距离; w_2 为距离透镜为 Z_2 处的光斑半径。

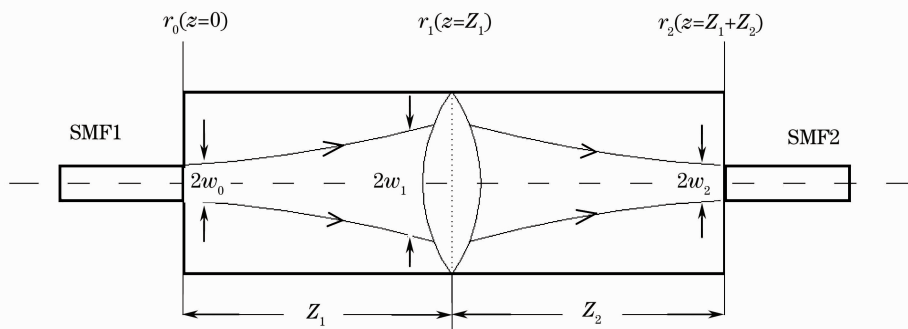


图 3 耦合系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram for coupling system

根据文献[13]提出的光纤二阶矩模场直径定义, 对于折射率对称阶跃分布的单模光纤基模(LP_{01} 模)端面衍射光束, 二阶矩近场模场半径为

$$w_{SMF} = \frac{\sqrt{6}a}{3} \left[1 - \frac{2}{X^2} + \frac{2}{W^2} + \frac{2J_0(X)}{XJ_1(X)} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

式中 X, W 分别为归一化芯层驻波参量和包层衰减参量, a 为芯层半径。为简化讨论, 对于 SMF1, 其模场半

径 ω_{SMF} 可近似^[14]为

$$\frac{\omega_{\text{SMF}}}{a} = 0.65 + \frac{1.619}{Y^{3/2}} + \frac{2.879}{Y^6}, \quad (4)$$

式中 $Y = (2\pi a/\lambda)NA$ 为归一化频率, 决定了光纤中的光束传输模式, NA 为光纤的数值孔径。故入射 SMF1 端面的场分布为

$$\psi_{\text{SMF}}(r_0) = \sqrt{2/\pi}\phi_0 \exp(-r_0^2/\omega_{\text{SMF}}^2), \quad (5)$$

式中 ϕ_0 为单模光纤中心的场振幅。设 $\frac{2}{\pi}\phi_0^2 = I_0$, 则单模光纤端面的光强分布为

$$I(r_0) = I_0 \exp\left(\frac{-2r_0^2}{\omega_{\text{SMF}}^2}\right). \quad (6)$$

假定入射 SMF1 端面为其出射场的束腰处, 则其束腰半径为 $\omega_{\text{SMF}0}$, 引入 q 参数 q_0 为

$$q_0 = \frac{\pi\omega_{\text{SMF}0}^2}{\lambda}i. \quad (7)$$

因此, 光束由 SMF1 传播 Z_1 后经透镜聚焦后再传播 Z_2 到达 SMF2 端面, 该处的 q 参数 q_2 为^[15]

$$q_2 = \frac{Aq_0 + B}{Cq_0 + D}, \quad (8)$$

式中 A, B, C 和 D 为上述传播途径中光束 ABCD 传播矩阵, 此传播矩阵^[15]可写为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{d_1}{f} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式并化简, 可得

$$q_2 = \frac{(f - d_2)q_0 + (d_1 + d_2)f - d_1d_2}{-q_0 - d_1 + f}, \quad (10)$$

很显然, SMF2 端面上接收到的光强由与 SMF1 出射光强 P_0 有关的函数决定, SMF2 捕获的光强 P_R 为

$$P_R = KP_0 \left[1 - \exp\left(\frac{-2\omega_{\text{SMF}}^2}{\omega_2^2}\right) \right]. \quad (11)$$

根据光斑半径的定义, ω_{SMF} 为输出光纤 SMF1 峰值光强 $1/e^2$ 的光斑半径, ω_2 为落在接收光纤 SMF2 上峰值光强 $1/e^2$ 的光斑半径。设 $\omega_{\text{SMF}} = \omega_2$, 则理想情况下 $P_R = P_0$, 由此确定系数 $K = (1 - 1/e^2)^{-1}$ 。假定 SMF2 的位置为透镜折射后光束的束腰处, 则利用(7)式得

$$\frac{\lambda}{\pi\omega_2^2} = \text{Im}\left(\frac{1}{q_2}\right) \Rightarrow \omega_2 = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi \text{Im}(1/q_2)}}, \quad (12)$$

Z_2 位置由

$$\frac{1}{R(Z_2)} = \text{Re}\left(\frac{1}{q_2}\right) = 0 \quad (13)$$

确定。综上, 可调谐光衰减器件的耦合效率为

$$L_{\text{loss}}(\text{dB}) = 10\lg\left(\frac{P_R}{P_0}\right) = 10\lg\left\{(1 - 1/e^2)^{-1} \times \left[1 - \exp\left(\frac{-2\omega_{\text{SMF}}^2}{\omega_2^2}\right)\right]\right\}. \quad (14)$$

根据文献[16]该耦合效率也可以用另一种方式得到。

对于光纤端面 ($z=0$) 基模高斯光束传播到薄透镜(油) ($z=Z_1$) 左表面时, 其场分布可表示为

$$\psi_1(r_1, Z_1) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\psi_{\text{SMF}}\omega_{\text{SMF}}}{\omega_1} \exp(-ikZ_1 - \frac{ik}{2q_1}r_1^2), \quad (15)$$

式中 $\omega_1 = \omega_{\text{SMF}} \sqrt{1 + (Z_1/Z_c)^2}$, $Z_c = \pi\omega_{\text{SMF}}^2/\lambda$, q_1 满足

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{R_1} - i\lambda/(\pi\omega_1^2), \quad (16)$$

式中 $R_1 = Z_1[1 + (Z_c/Z_1)^2]$ 。采用薄透镜进行光纤耦合, 其透过因子^[17]为

$$\psi_t(r_1) = \exp[-ikr_1^2/(2f)], \quad (17)$$

因此 SMF1 基模高斯光束经过油透镜后的场分布可表示为

$$\psi'_1(r_1, Z_1) = \psi_1(r_1, Z_1) \cdot \psi_t(r_1, Z_1). \quad (18)$$

场 ψ' 在自由空间传输 Z_2 距离后在光纤端面上的场分布 ψ_2 由菲涅耳衍射公式得出

$$\psi_2(r_2, Z_2) = \frac{1}{i\lambda Z_2} \exp(ikZ_2) \iint \psi'_1(r_1, Z_1) \exp\{[ik/(2Z_2)](r_2 - r_1)^2\} r_1 dr_1. \quad (19)$$

将(14)式代入(15)式化简可得

$$\psi_2(r_2, Z_2) = -\frac{2i\psi_{\text{SMF1}}\omega_{\text{SMF1}}\exp(ikZ_2)}{\sqrt{ik(1/f + 1/q_1 - 1/Z_2)}} \times \frac{1}{\omega_1 Z_2 \lambda \sqrt{ik(1/f + 1/q_1 - 1/Z_2)}} \times \exp\left\{-\frac{ik[fr_2^2 + 2z_1 f(q_1 - Z_2) + q_1(r_2^2 - 2z_1 Z_2)]}{2fq_1 - 2(f + q_1)Z_2}\right\} \sqrt{2\pi}, \quad (20)$$

由耦合效率的定义得到单模光纤的单透镜耦合效率 T_s [18] 为

$$T_s = \frac{\left| \int_{s_2} \psi_2 \cdot \psi_{\text{SMF2}}^* ds_2 \right|^2}{\int_{s_1} |\psi'_1|^2 ds_1 \times \int_{s_2} |\psi_{\text{SMF2}}|^2 ds_2}, \quad (21)$$

式中 ψ_{SMF2}^* 为 ψ_{SMF2} 的共轭场, s_1 为激光束在透镜上所在平面, s_2 为待耦合光纤端面。

3.3 光纤耦合效率与外加电压的关系

接收 SMF2 的端面位置为透镜折射后光束的腰斑平面为最佳耦合位置, 为使该处耦合效率为 100%, 理想情况下由(14)式令 $L_{\text{loss}} = 0$, 可得 $\tau_{u_2} = \tau_{\text{SMF1}}$, 根据(13)式可得最佳耦合位置 $Z_2 = Z_1 = f_0 + \sqrt{f_0^2 - |q_0 q_2|} \approx 2f_0$, f_0 为本器件初始化时油透镜的焦距。此式表明, 本衰减器设计的长度应为薄透镜焦距的 4 倍左右, 为减少其长度应尽量使用短焦距的油透镜, 而根据(2)式, 应尽量使用折射率差的两种液体组合, 同时减小圆柱套管的内径, 或减小固液饱和接触角 θ 。选择恰当的绝缘系数高的(如 SiO_2)和介电系数高的(如钛酸锶钡)介电层材料可以有效地降低工作电压。疏水性和电润湿饱和问题将会是未来减小 VFOA 的主要问题。

单模光纤的纤芯直径一般在 $5 \sim 10 \mu\text{m}$, 典型值为 $8 \mu\text{m}$, 典型 NA 值在 $0.1 \sim 0.17$ 。由(4)~(14)式计算出光纤-透镜-光纤耦合系统的耦合效率与液体透镜的外加电压之间的关系。当忽略 SMF1 与 SMF2 的耦合失准损耗时, 耦合效率与液体透镜外加电压之间的关系如图 4 所示。模拟计算中的相关参数为: 单模光纤纤芯直径 $D = 8 \mu\text{m}$, 数值孔径 $NA = 0.11$; 波长为 1545 nm , 光束质量因子 $M^2 = 1$, 为理想基模高斯光束; SMF1 与油透镜的距离为 17 mm ; SMF2 端面位于激光束经油透镜汇聚后的腰斑平面上。从图 4 可以看出, 通过优化设计该装置的尺寸, 调节外加电压以保持油透镜为凸透镜状态, 且使油透镜保持为最凸状态的临界电压, 例如 U 取 57.5 V 时, 可使可调光衰减器的衰减量接近 0。当减小外加电压时可以使可调光衰减器的衰减量大幅度改变, 外加电压为零时衰减量可达到甚至超过 60 dB 。使用 $1530 \sim 1560 \text{ nm}$ 波长范围对器件进行波长相关仿真时, 可以得到小于 0.2 dB 的波长相关损耗, 显示该器件具有相当平稳的衰减性, 如图 5 所示。

对纯二氧化硅芯的光纤, 一个端面的菲涅耳反射损耗 $R_{\text{SMF-water}} = (n_{\text{SiO}_2} - n_{\text{water}})^2 / (n_{\text{SiO}_2} + n_{\text{water}})^2 \approx 0.08\%$, 输

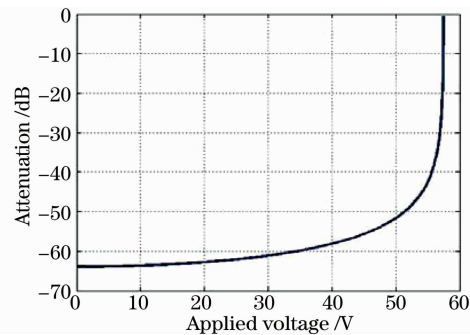


图 4 可调光衰减器耦合效率与外加电压关系
Fig. 4 Coupling efficiency of VFOA versus liquid lens applied voltage

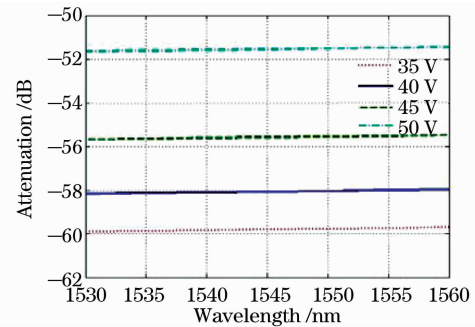


图 5 VFOA 的波长相关损耗特性
Fig. 5 Wavelength dependent loss of VFOA

入和输出光纤端面的总反射损耗约为 0.16%。油透镜的两个面的损耗可用 $R_{oil} = (n_{oil} - n_{water})^2 / (n_{oil} + n_{water})^2 \approx 0.34\%$ 估算。

4 电润湿效应实验

采用特定的“导电基片/介电绝缘膜层”内芯材料对其表面的 EWOD 特性进行实验研究。测量 0~60 V 电压范围内氯化锂盐溶液液滴在“不锈钢基片/Parylene 层”芯片表面的接触角变化情况,其变化规律与电润湿理论模型^[11]相吻合,如图 6 所示,表明本文提出的技术方案具有现实可行性。

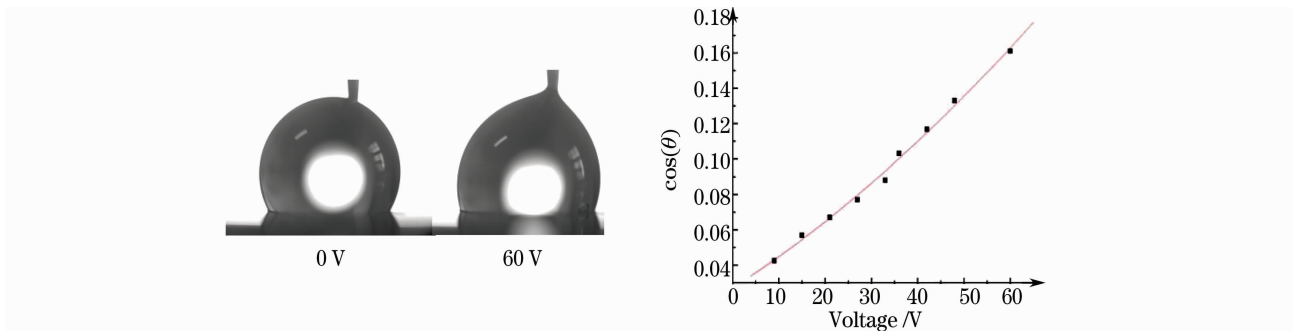


图 6 内芯表面的电润湿特性实验图片与数据

Fig. 6 Test images and data of EWOD characteristics on inner core surface

5 结 论

微流控光学将现代微流控技术和光电子技术相结合,研制各类能够根据外界环境变化、具有结构重组和调节能力的微流控光电子集成器件和自适应光学系统,在通信、成像、传感、信息处理等领域有着重要的应用前景^[19~21]。基于上述背景,本文提出一种基于微流控电润湿效应变焦液体透镜的 VOFA 器件,仿真分析表明,这种光衰减器的衰减范围达到 0~60 dB,而且具有很好的波长相关损耗特性。然而这种新颖的 VOFA,由于现有材料疏水性和电润湿饱和的限制使得该器件尺寸过大,限制了 VOFA 的集成应用,疏水性和电润湿饱和问题将会是未来减小尺寸的主要问题。当然也可以从结构方面进行进一步优化,例如薄的油透镜改造成厚透镜,让 SMF1 端面位于厚透镜的左焦距处在厚透镜的内部变成平行光束然后在右焦点附近放置 SMF2,这样也可以缩小透镜的尺寸。另外,本器件工作电压偏高,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 的钛酸锶钡材料可将工作电压降低 10 倍。同时,VOFA 的非线性情况较严重,但如果工作在 0~40 dB 范围内,线性度是可以保证的。

参考文献

- 1 A. Neukermans, R. Ramaswami. MEMS technology for optical net working applications[J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2001, **39**(1): 62~69
- 2 C. R. Giles, V. Aksyuk, B. Barber *et al.*. A silicon MEMS optical switch attenuator and its use in light wave sub systems [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1999, **5**(1): 18~25
- 3 Xiang Jinshan, Chen Bo, Huang Hezhen. Analysis on attenuation of light-blocked attenuator[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2002, **A29**(12): 1071~1074
向金山, 陈波, 黄河振. 挡光型可变光衰减器的衰减量构成的分析[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(12): 1071~1074
- 4 Xie Xiaoqiang, Dai Xuhan, Zhao Xiaolin *et al.*. Research on an offset-type micro mechanical variable optical attenuator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 717~718
谢晓强, 戴旭涵, 赵小林等. 位错型微机械可变光衰减器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 717~718
- 5 Yuan Ye, Zou Yongzhuo, Bao Junfeng *et al.*. A novel variable optical attenuator based on micro-electromechanical system (MEMS)[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 364~368
袁野, 邹勇卓, 鲍俊峰等. 一种新型微机电系统可调光衰减器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 364~368
- 6 S. Kuiper, B. H. W. Hendriks. Variable-focus liquid lens for miniature cameras [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(7): 1128~1130
- 7 <http://www.varioptic.com/en/technology.php>

- 8 S. A. Reza, N. A. Riza. A liquid lens-based broadband variable fiber optical attenuator[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(7): 1298~1303
- 9 S. A. Reza, N. A. Riza. High dynamic range variable fiber-optical attenuator using digital micromirrors and opto-fluidics [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(13): 845~847
- 10 Liang Zhongcheng, Chen Tao, Qian Chen *et al.*. A Novel Variable Optical Attenuator Device; China, CN101464558 [P]. 2009. 梁忠诚, 陈陶, 钱晨等. 一种电调谐光衰减器: 中国, CN101464558[P], 2009
- 11 F. Mugele, J. C. Baret. Electrowetting; from basics to applications[J]. *J. Phys. Condens. Matter*, 2005, **17**(28): R705-R774
- 12 V. Peykov, A. Quinn, J. Ralston. Electrowetting: a model for contact-angle saturation[J]. *Colloid Polym. Sci.*, 2000, **278**: 789~793
- 13 K. Petemrann. Fundamental mode microbending loss in graded-index and W fibers[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1977, **9**(2): 167~175
- 14 D. Marcuse. Loss analysis of single-mode fiber splices [J]. *Bell Syst. Tech. J.*, 197, **56**: 703~718
- 15 H. Kogelnik, T. Li. Laser beams and resonators[J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(10): 1550~1567
- 16 Xiao Zhigang, Li Bincheng. Single-lens coupling efficiency of a fundamental gaussian beam to an optical fiber [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(8): 29~35
肖志刚, 李斌成. 高斯光束到光纤的单透镜耦合[J]. *光电工程*, 2008, **35**(8): 29~35
- 17 J. I. Sakai, T. Kimura. Design of a miniature lens for semiconductor laser to single-mode fiber coupling [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **16**(10): 1059~1066
- 18 Zhao Faying, Zhang Quang, Tang Haiqing. The coupling between a butt fiber and a spherical lensed fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 218~221
赵发英, 张全, 唐海青. 平端光纤与锥端球透镜光纤的耦合[J]. *光子学报*, 2003, **32**(2): 218~221
- 19 Liang Zhongcheng, Zhao Rui. Microfluidic optics and its application[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*. 2008, **45**(6): 1~3
梁忠诚, 赵瑞. 微流控光学及其应用[J]. *激光与光电子学进展*. 2008, **45**(6): 1~3
- 20 Liang Zhongcheng, Xu Ning, Tu Xinghua *et al.*. Novel integrated device of optofluidic variable-focus microlens array[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(9): 32~35
梁忠诚, 徐宁, 涂兴华等. 新颖的微流控光学变焦透镜阵列集成器件[J]. *光电工程*, 2008, **35**(9): 32~35
- 21 T. Chen, Z. C. Liang, R. Zhao. A novel device of dual-tuner variable-focus microlens [C]. *SPIE*, 2009, **7381**: 73811L