

基于液体棱镜的光开关

姚黎晓 王琼华 刘超 王明欢

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 光开关是实现多光路电子切换器件的重要组成部分。提出一种基于液体棱镜的光开关,该光开关由一个液体棱镜与一个双孔挡光板组成。初始状态下,液-液界面为凸面形状,入射光经过液体棱镜后会聚到挡光板中央,被挡光板阻挡反射吸收,表现为光关状态。当把电压施加在液体棱镜单侧时,为光开状态。并且当在两侧同时施加电压时,液-液界面形变为凹面形状,入射光束发生发散,此时表现为同时光开状态。实验结果表明,该器件在自适应液体光开关中具有较快的响应时间(上升时间:~85 ms;下降时间:~140 ms)以及较高的光衰减度(~965:1)特性。提出的光开关在光阀、可调光衰减器以及光路由器等方面有着潜在的应用价值。

关键词 光学设计;光开关;电湿润;液体棱镜

中图分类号 TH744 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0616002

Optical Switch Based on Electrowetting Liquid Prism

Yao Lixiao Wang Qionghua Liu Chao Wang Minghuan

School of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract Optical switch is an important part of a multi-path electronic switch. We propose an optical switch based on a liquid prism. The device consists of a liquid prism and a non-transparent diaphragm with two holes. In initial state, the liquid-liquid surface shows a shape of the positive lens, the incident light can be focused through the liquid cell and then be blocked by the aperture slot. At this time, the device shows light-off state. When a voltage is applied to one side of the liquid prism, the device shows light-on state. Meanwhile, when voltage is applied to both sides of the sidewall electrodes, the liquid-liquid surface presents the shape of a negative lens and the incident light divergence occurs. At this time, the device expresses the both light-on state. Our experiments show that the proposed device has faster response time (rise time: ~85 ms; fall time: ~140 ms) and higher optical attenuation (~965:1) in adaptive liquid optical switches. The device has potential application in light shutters, variable optical attenuators and optical routers.

Key words optical design; optical switch; electrowetting; liquid prism

OCIS codes 220.1080; 040.1240; 130.4815; 230.2090; 230.5480

1 引言

近几年,研究人员提出了许多基于液体^[1-5]或基于聚合物液晶^[6-8]的光子器件,其中,由于液体光开关^[9-14]在通信、显示和显微镜学等方面有着广泛的应用,从而引起了众多学者的深入研究。为了更好地控制液体形状或者位置的变化,研究人员提出了很多的原理机制。其中,电湿润效应和介电效应由于可以直接通过改变电压来实现对液体的形态控制,因而这两种机制成为最有应用前景的作用机制。基于这两种机制的液体光开关也不断出现在人们的视野中。例如,有通过改变液面形状从而使得光通道打开或者关闭的方法^[10-13]。还有提出基于改变液滴位置的介电力光开关^[14]等。这些光开关都拥有很好的光学性能和机械稳定性。然而,它们都只能在单一的方向上控制光开与光关,并且大部分都是运用一个染色液滴对光束进行吸收来实

收稿日期: 2015-01-06; 收到修改稿日期: 2015-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(61320106015)、四川省科技项目(2013TD0002,2014FZ0084)

作者简介: 姚黎晓(1990—),男,硕士研究生,主要从事光学系统设计与信息显示等方面的研究。E-mail: 526754546@qq.com

导师简介: 王琼华(1969—),女,博士,教授,主要从事三维立体显示技术方面的研究。

E-mail: qhwang@scu.edu.cn (通信联系人)

现开关功能。如果设计出能够控制两个或者更多方向的光开关,那么它将会大大拓宽光开关的应用范围,例如芯片实验室的应用^[15-16]以及光路由器^[17]等。为了达到这个目的,不仅要实现液体的移动或者接触面的形变,同时需要改变部分的器件结构。

本文提出了一个基于液体棱镜的光开关。该光开关的形变液滴可以在电压撤消后自动恢复到初始状态,从而达到自适应变化的目的。该器件还可以控制双通道同时处于光开状态。两个通光孔的位置也可以通过驱动电压的改变而发生变化,这是因为随着驱动电压的升高,入射光的偏转角会逐渐增大,折射光的位置也会随之发生改变,最终通过确定电压的大小来选择合适的双孔挡光板。而且,它可以在不改变电极结构的基础上扩展成为一个1×4的光开关阵列。

2 器件原理与制作

图1所示为提出的光开关示意图和它的操作机制。如图1(a)所示,两种互不相溶且透明的液体填满整个腔体。其中液体-1为不导电液体,液体-2为导电液体。在初始状态下,液-液界面呈现为凸面形状。入射光束从液体棱镜中会聚出射,之后被挡光板阻挡反射吸收,表现为光关状态。如图1(b)所示,当将电压施加在左边电极上的时候,液-液界面由于电湿润效应而发生形变,液体-2向左侧倾斜,实现棱镜的功能;而在图1(c)中可以看出,当把电压施加在右侧电极上的时候,液体-2向右侧倾斜。因此,当光束通过该液体棱镜的时候,它可以对其发生偏转作用,从而使得偏转后的光束照射到双孔挡光板的通光孔位置,产生光开的效果。其中光束的偏转方向与两液体的折射率大小有关,当液体-1的折射率小于液体-2的折射率的时候,光束由光疏介质入射到光密介质,向液面倾斜方向偏转。反之亦然。而当在两侧电极上同时施加电压的时候,液-液界面形变为凹面形状,如图1(d)所示,此时双通光孔同时处于光开状态。

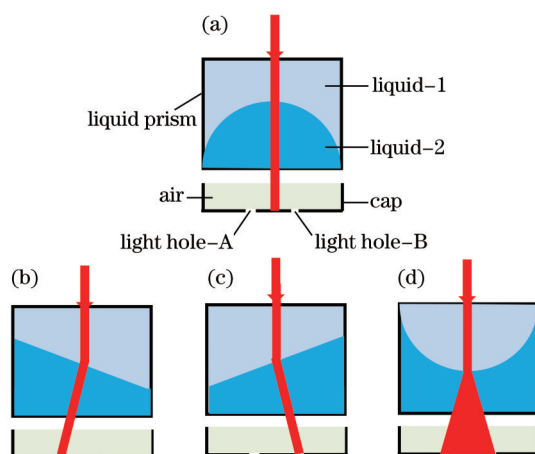


图1 光开关的侧视图。(a) 初始状态; (b) 左侧加电压; (c) 右侧加电压; (d) 两侧加电压

Fig.1 Side view of the optical switch. (a) Initiate state; (b) applied voltage to the left side;

(c) applied voltage to the right side; (d) applied voltage to the both sides

液体-1与液体-2的接触面以及介质层的三相接触线间的平衡关系可以由下式决定:

$$\gamma_{1F} = \gamma_{F2} - \gamma_{12} \cos \theta_Y, \quad (1)$$

$$\gamma_{1F}(V) = \gamma_{1F}(0) - \frac{1}{2}CU^2, \quad (2)$$

式中 γ_{1F} 表示液体-1和介电层之间的表面张力, γ_{F2} 表示介电层和液体-2之间的表面张力, γ_{12} 表示液体-1与液体-2界面之间的表面张力, θ_Y 是未施加电压时的初始接触角, $C = \epsilon_0 \epsilon_r / d$ 代表疏水介质层单位面积的电容, d 是介电层的厚度, $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ 是介电层的介电常数, 而 U 代表施加在侧壁电极上的电压。因此, 导电液体-2与侧壁之间的接触角 θ_1 和 θ_2 的变化可以表示为

$$\cos \theta_1 = \cos \theta_Y + \frac{U_1^2 \epsilon}{2d\gamma_{12}}, \quad (3)$$

$$\cos \theta_2 = \cos \theta_Y + \frac{U_2^2 \epsilon}{2d\gamma_{12}}. \quad (4)$$

该器件的制作流程如下:液体棱镜侧壁是由4块尺寸大小均为15 mm×6 mm的透明氧化铟锡(ITO)电极组成,并且每块电极都涂覆有12 mm×6 mm大小的聚四氟乙烯(Teflon) AF-1600与SU-8作为介质层。采用光刻胶(UV-331)将4块电极粘贴为长方体,底部粘贴一块ITO电极基板,形成液体棱镜底部,至此液体棱镜部分制作完成。其中,Teflon AF-1600的厚度大约是3 μm,液体-1选择硅油,液体-2为一定浓度的盐溶液。表1列出了所使用的两种液体的部分物理特性。最后,将制作好的双孔挡光板放置在该液体组件的正下方,两个通光孔关于液体组件中心对称。

表1 硅油与盐水的部分物理特性

Table 1 Part of the physical properties of silicon oil and NaCl solution

Material	Refractive index	Density ρ /(g/cm ³)	Viscosity η /(mPa·s)	Conductivity	Color
Silicon oil	1.39	0.98	10	No	Clear
NaCl solution	1.41	1.15	8	Yes	Clear

3 实验与讨论

为了测量液-液界面的变化以及开关的光学性能,在这个器件的正前方及正下方各放置一个电荷耦合器件(CCD)相机来记录初始状态以及驱动条件下液面与通光孔的变化情况。一束激光(氦氖激光器, $\lambda=632.8$ nm)垂直入射。图2为实验装置图。

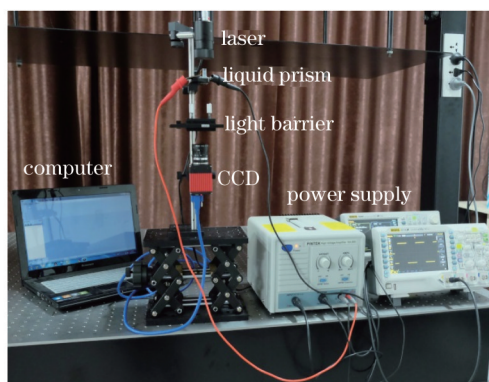


图2 实验装置图

Fig.2 Setup of the device

图3表示电压施加在不同电极上所观察到的液-液界面以及光斑的变化。 h_1, h_2, h_3, h_4 分别表示液-液界面变化的不同高度。其中 h_2 与 h_3 由于制作过程中外部环境的影响使得两者不会完全相等。图3(a)表示在不施加任何电压的情况下,液-液界面表现为凸面形状,光束会聚后直接打在挡光板中央的部分,在下方 CCD 无法检测到任何光信号。如图3(b)所示,当接通左侧电极时,液体-2向左侧倾斜,形成液体棱镜,此时入射光束发生偏转,从通光孔 A 中可以观察到出射光。同理,如图3(c)所示,当在右侧电极施加电压时,液体棱镜偏折至相反方向,此时可以从通光孔 B 观察到出射光。当同时接通左右两侧电极的时候,液-液界面由凸面形变为凹面,入射光束被液体凹面散射,如图3(d)所示,此时从通光孔 A 和通光孔 B 都可以观察到出射光。由

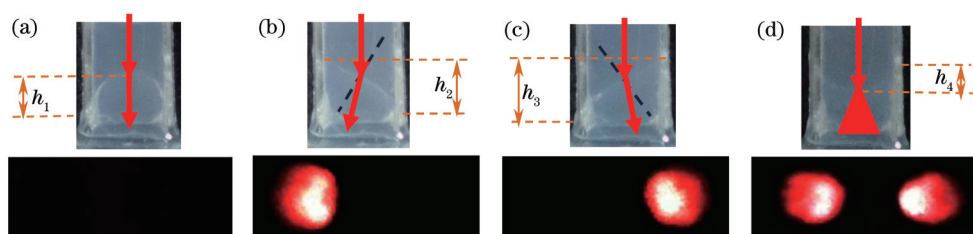


图3 液体棱镜模型的流体界面形状变化以及相对应的光孔变化情况。(a) 初始状态;(b) 左侧加电压 $U_1=75$ V;(c) 右侧加电压 $U_2=75$ V;(d) 两侧同时加电压 $U=75$ V

Fig.3 Shape change of the fluid interface in a liquid prism module and corresponding light hole's diversification. (a) Initial state; (b) applied voltage $U_1=75$ V to the left side; (c) applied voltage $U_2=75$ V to the right side; (d) applied voltage $U=75$ V to the both sides

于激光通过液体器件之后发生一定的散射,变成发散光,故其以光斑的形式入射到光开关上。这个实验表明提出的器件结构可以实现1×2光开关的功能。

光衰减度是判断光开关光学性能的一个重要指标。为了更好地说明该器件,定义单侧加电压为模式 I,而两侧加电压为模式 II。在通光孔 A 下方放置一个光电探测器来测量光强变化。对于模式 I,如图4(a)所示,液体棱镜的驱动电压为 35 V,随着电压的升高,棱镜对入射光束产生的偏转越来越大,光束从挡光板中央逐渐靠近通光孔,当电压达到一定数值($U=75$ V)的时候,光束中心与通光孔中心重叠,光强达到最大值,此时可以在通光孔观察到一个较大亮斑。继续增大电压,光束继续发生偏转,光强逐渐衰弱,到 95 V 时,达到接触角饱和。去掉电压之后,接触面恢复到初始状态,光强变为 0。而对于模式 II 来说,如图4(b)所示,加电压之后,由于有一部分光强会被挡光板阻挡反射吸收,因而使得其光衰减能力降低。同时利用光功率计测得在光开和光关状态下的光功率分别为 96.5 mW 以及 0.1 mW。实验结果表明,该器件的光衰减度为~965:1。

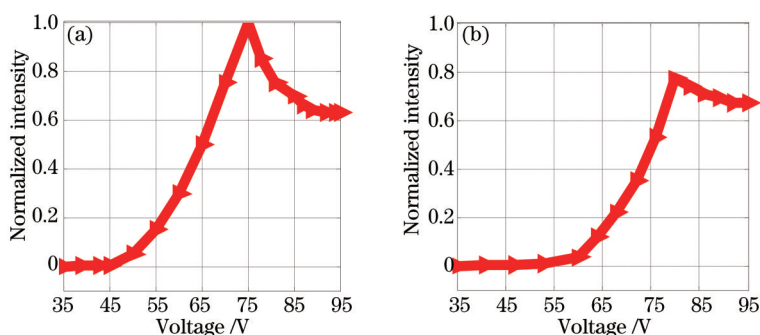


图4 光强随电压变化示意图。(a) 模式 I ; (b) 模式 II

Fig.4 Voltage-dependent normalized light intensity. (a) Mode I ; (b) mode II

实验中同样对器件的响应时间做了测量。如图5所示,定义归一化后的上升时间为光强从0变化到最大所用的时间,而下降时间则为光强从最大到0的变化时间。通过测量可以知道模式 I 的上升时间为 85 ms,下降时间为 140 ms。而模式 II 的上升时间为 97 ms,下降时间为 180 ms。

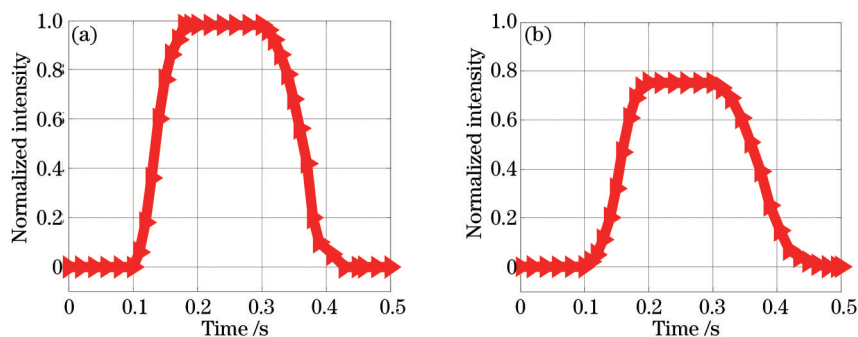


图5 光强随时间变化示意图。(a) 模式 I ; (b) 模式 II

Fig.5 Time-dependent normalized light intensity. (a) Mode I ; (b) mode II

提出的光开关可以在不改变电极结构的情况下扩展成为1×4的光开关阵列。如图6(a)所示,初始状态下4个通光孔都没有光束的通过,当分别给前、后、左、右4个电极施加电压的时候,如图6(b)~(d)所示,光束通过的通光孔会依次发生改变,由于液体的体积未发生改变,所以驱动电压不变。当将电压同时施加在这

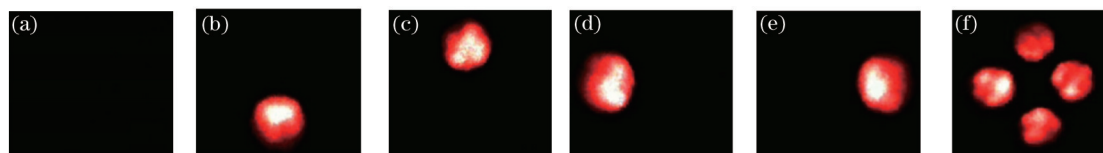


图6 1×4 光开关阵列实验效果图。(a) 初始状态; (b)~(e) 电压分别施加在不同侧壁上; (f) 同时在4个侧壁上施加电压

Fig.6 Experimental results of 1×4 optical switch array. (a) Initial state; (b)~(e) applied voltage to each side, respectively; (f) applied voltage to the four sides at the same time

4个电极上的时候,液面发生更加明显的变化,入射光束在该液面的作用下严重发散,此时4个通光孔同时出现光束。所以该光开关可以实现 1×4 光开关阵列同时通光的效果。

由于受实验条件限制,所制作的器件在尺寸上为厘米级,故光开关的响应时间不理想。正在寻找精度更高的实验环境,同时尽最大努力降低液-液界面的表面张力。通过上述方法,理论上可以将响应时间有效控制在10 ms以内。这样的话,提出的 1×2 光开关可以很好地应用在光开关系统中。由于同时处于光开状态是通过光的发散,即增大光斑尺寸得到的,故一部分光能被浪费,同时有着比较高的插入损耗。如何优化结构,充分利用光能也是今后研究的方向。另外,实验中所使用的两种液体的密度匹配并不是很好,所以如果该器件水平放置仍会受到重力作用的影响,以后可以利用两种密度完全匹配的液体来解决该问题。最后,由于光束聚焦于挡光板中央位置会发生漫反射,所以对挡光板进行了优化设计,得到较理想的光开关性能。

4 结 论

提出了一种基于液体棱镜的光开关。该光开关由一个液体棱镜以及一个双孔挡光板组成。当给一侧电极施加电压时,导电液体向同一侧倾斜,形成棱镜模型,从而对入射光束产生偏折作用,实现光开关的效果。撤消电压之后,由于表面张力以及侧壁的吸附力的作用,液面会迅速恢复到初始状态。实验结果表明,该器件在自适应液体光开关中有着较高的光衰减度以及较快的响应时间。提出的光开关在光阀、可变光衰减器以及光路由器等方面有着潜在的应用。

参 考 文 献

- 1 B Berge, J Peseux. Variable focal lens controlled by an external voltage: an application of electrowetting[J]. *Eur Phys J E*, 2000, 3(2): 159-163.
- 2 Yao Jianquan, Wang Ran, Miao Yinping, *et al.* Novel photonic functional devices based on liquid-filling microstructured optical fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0101002.
姚建铨, 王 然, 苗银萍, 等. 基于液体填充微结构光纤的新型光子功能器件[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0101002.
- 3 Li Qiang, Sun Licun, Meng Weidong, *et al.* Refractive index of liquid measured by liquid-core zoom cylindrical lens[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 39(10): 1008005.
李 强, 孙丽存, 孟伟东, 等. 用液芯变焦柱透镜精确测量液体折射率[J]. *中国激光*, 2013, 39(10): 1008005.
- 4 Wan Jing, Guo Anjin, Yan Feng, *et al.* New optical attenuator based on microfluidic technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0923001.
万 静, 郭安金, 严 峰, 等. 基于微流控技术的新型可调光衰减器[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0923001.
- 5 N R Smith, D C Abeyasinghe, J W Haus, *et al.* Agile wide-angle beam steering with electrowetting micropisms[J]. *Opt Express*, 2006, 14(14): 6557-6563.
- 6 Luo Duanbin, Yan Kun, She Weilong, *et al.* All optical switch with response time in millisecond magnitude based on azo-doped polymer films[J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(1): 92-96.
罗锻斌, 严 岷, 余卫龙, 等. 毫秒有机聚合物薄膜全光开关[J]. *中国激光*, 2004, 31(1): 92-96.
- 7 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghui, *et al.* 2×2 total-internal-reflection optical switch using thermo-optic effect of polymer[J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 30(2): 137-140.
杨建义, 江晓青, 杨方辉, 等. 2×2 有机聚合物的全内反射型热光光开关[J]. *中国激光*, 2003, 30(2): 137-140.
- 8 Xiong Caoshui, Xiong Yonghong, Zhao Tianpeng, *et al.* An approach for optical switch property and mechanism of AgOx thin films[J]. *Chinese J Lasers*, 2002, 29(5): 436-438.
熊曹水, 熊永红, 赵天鹏, 等. AgOx 薄膜的光开关特性和机理研究[J]. *中国激光*, 2002, 29(5): 436-438.
- 9 L Li, C Liu, Q H Wang. Optical switch based on tunable aperture[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(16): 3306-3308.
- 10 R A Hayes, B J Feenstra. Video-speed electronic paper based on electrowetting[J]. *Nature*, 2003, 425(6956): 383-385.
- 11 H Ren, S Xu, D Ren, *et al.* Novel optical switch with a reconfigurable dielectric liquid droplet[J]. *Opt Express*, 2011, 19(3): 1985-1990.
- 12 C U Murade, J M Oh, D V D Ende, *et al.* Electrowetting driven optical switch and tunable aperture[J]. *Opt Express*, 2011, 19(16): 15525-15531.

- 13 H Ren, S Xu, Y Liu, *et al.*. Liquid-based infrared optical switch[J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(4): 041104.
- 14 K Campbell, A Groisman, U Levy, *et al.*. A microfluidic 2×2 optical switch[J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(25): 6119–6121.
- 15 Xue Quanxi, Jiang Shaoen, Zhao Xueqing, *et al.*. Research and analysis of focal spot overlapping for excimer laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0302003.
薛全喜, 江少恩, 赵学庆, 等. 准分子激光靶面焦斑合束研究分析[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0302003.
- 16 Meng Weidong, Sun Licun, Li Qiang, *et al.*. Variable-focus cylindrical lens based on a PDMS substrate[J]. Chinese J Optics, 2013, 6(3): 365–370.
孟伟东, 孙丽存, 李 强, 等. 基于PDMS基片的可变焦柱透镜[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 365–370.
- 17 H Okayama, Y Okabe, T Arai, *et al.*. Two-module stage optical switch network[J]. J Lightwave Technol, 2000, 18(4): 469–476.

栏目编辑: 韩 峰