

介电润湿液体光学棱镜

赵 瑞 田志强 刘启超 王 评 梁忠诚

(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 210023)

摘要 为实现光束控制系统的无机械化、快速化和微小化,研制基于介电润湿效应的液体光学棱镜。分析界面形状随电压的变化,推导接触角与两侧工作电压的关系,测量系统对光束的偏转角,讨论接触角饱和及液体折射率对系统控光能力的影响。采用 COMSOL 软件仿真研究液体粘性对棱镜性能的影响。结果表明,在不同电压组合下,双液体界面从初始弯曲界面变为与水平方向呈不同倾斜角的平界面,从而实现对人射光束方向的控制和偏转。受电润湿饱和现象的影响,该液体棱镜的偏转范围为 $-10^{\circ}\sim+10^{\circ}$ 。若选用的液体组合可降低甚至消除接触角饱和,且具有大的折射率比,则系统的控光能力将得到大幅提高。当动力粘度取 $0.03\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时,系统的响应速度和稳定性能最佳。

关键词 光学器件;棱镜;电润湿;偏转

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1223003

Electrowetting-Based Liquid Prism

Zhao Rui Tian Zhiqiang Liu Qichao Wang Ping Liang Zhongcheng

(Center of Optofluidic Technology, College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract A liquid micro-optical prism based on electrowetting is developed for wide angle beam tracking and steering. The shape of the two liquid interfaces is analyzed, the relationship between contact angle and two voltages is derived, and the deflection of the beam from the system is detected. In the meantime, COMSOL software is employed to analyze the effect of dynamic viscosity on the prism's response time and stability. The results indicate that the contact angle between the conductive fluid and wall changes, then interface of the immiscible liquids is rendered into plane accordingly when different voltages are applied on the wall. It succeeds in controlling beam tracking and steering as traditional optical prism. Due to electrowetting saturation, the maximum deflection of the liquid prism approaches to 20° ($-10^{\circ}\sim+10^{\circ}$); If the electrowetting saturation is decreased or even eliminated while ratio of the refractive indexes of two liquids is increased, the ability of deflection of the system will be enhanced largely. To achieve stable performance and stability of the prism, the optimal dynamic viscosity should be $0.03\text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Key words optical devices; prism; electrowetting; deflection

OCIS codes 230.5480; 120.4570

1 引 言

光束偏转技术是对激光光束方向精确控制的技术,在目标探测、激光通信、光信息处理与存储、生物医学等诸多领域有着广泛的应用前景^[1-2]。传统的光束偏转依靠机械装置改变光轴方向实现对光束方向的偏转,但其结构复杂、精确度低、质量大、能耗高,在运动过程中还需要克服惯性的影响,从而使其

性能受到制约且不利于微型化^[3]。近年来,寻找新型光束操控方法已经成为研究的重点^[4-6]。目前,液晶光学相控阵^[5-6]和微光机电系统(MOEMS)^[7]受到广泛关注。然而,尽管上述两种方法取得了巨大的进步,但是有些功能还是无法实现,例如经典玻璃棱镜无法实现对多波长及无偏振光束的控制^[8]。为了满足快速成像、3D显示以及自由空间光通信^[9]

收稿日期: 2014-05-05; **收到修改稿日期**: 2014-07-28

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2011752)

作者简介: 赵 瑞(1977—),女,博士,副教授,主要从事微流控光学和基于电润湿理论及器件方面的研究。

E-mail: zhaor@njupt.edu.cn(通信联系人)

等领域对光束控制的需求,亟待寻求一类能够模仿经典光学棱镜折射功能的可调谐器件。基于介电润湿原理的液体光学器件^[10-12]具有结构简单、制作简便、易于实现阵列型结构、易于集成、响应速度快和无偏振依赖性等诸多优点,成为近年来的研究热点^[13-19]。

本文设计并制作了基于介电润湿效应的液体微棱镜,介绍了系统工作原理,分析了双液体界面形状随电压变化,给出了接触角与两侧施加电压的关系,测试了该光学器件对入射光束的偏转角度,讨论了电润湿饱和现象及液体折射率对系统控光能力的影响。与此同时,采用 COMSOL 软件建立了理论模型,模拟仿真了非极性绝缘油粘度对液体棱镜性能的影响,给出器件的最佳动力学粘度系数,研究结果表明该系统基本实现了对光束方向的快速控制和大范围偏转功能。该器件不仅结构简单、体积小、制备方便,且易于阵列化,研究结果将推动光束控制系统的应用发展。

2 结构设计与器件制备

液体光学棱镜器件是基于介电润湿原理设计制作的。所谓的介电润湿效应是一种物理化学现象,通过在固体-液体界面施加外部电压来增加液体对固体的湿润程度,从而改变固液接触角^[16]。图 1 给出介电润湿效应的示意图,外加电压为零时,液体界面形状如虚线所示,此时液滴与介电层之间的接触角为 θ_0 ,该接触角与三相表面张力满足杨氏方程^[16]。

$$\cos \theta_0 = \frac{\gamma_{23} - \gamma_{13}}{\gamma_{12}}, \quad (1)$$

式中 γ_{12} , γ_{13} 和 γ_{23} 分别为导电液体和绝缘液体、导电液体和绝缘介质以及绝缘液体和绝缘介质层的界面张力。当液滴上施加电压 V 后,三相接触线将发生移动,最终达到新的平衡状态,如图 1 中实线所示。

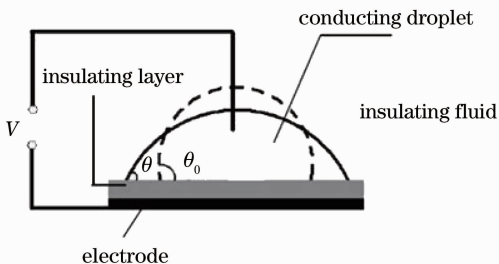


图 1 介电润湿效应实验原理图

Fig. 1 Diagram of electrowetting-on-dielectric

此时导电液体与绝缘介电层之间的接触角 θ 与外加电压 V 的关系满足 Young-Lippmann 方程^[16]:

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

式中 d 为绝缘层厚度, ϵ_0 和 ϵ_r 分别为是真空和绝缘层材料的介电常数。

基于介电润湿效应的液体光学棱镜结构如图 2 所示,腔体及基底均采用高透射率的导电聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)材料。通过激光切割法切断导电层随后围成 $\phi 3 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的柱状腔体,上下底面尺寸均为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。需要指出的是,实验中待激光切割好尺寸后,再将 PET 导电层上覆盖的蓝色贴膜揭掉使其露出导电层。采用紫外胶对棱镜侧壁及基底封装,并采用紫外光对其进行固化。在成型棱镜腔体及基底上蒸镀一定厚度的派瑞林,随后采用浸润式涂覆约 100 nm 的氟化聚合物(FluorPel)作为疏水层;最后,用导电银胶将细铜丝粘附在 PET 导电内壁面和基底。制作的液体棱镜填充液体分别为 2%(质量分数)的 NaCl 电解质盐溶液($n_1 = 1.3, \gamma = 75 \text{ mN/m}$)和非极性绝缘油($\gamma = 20 \text{ mN/m}, n_2 = 1.65$)。

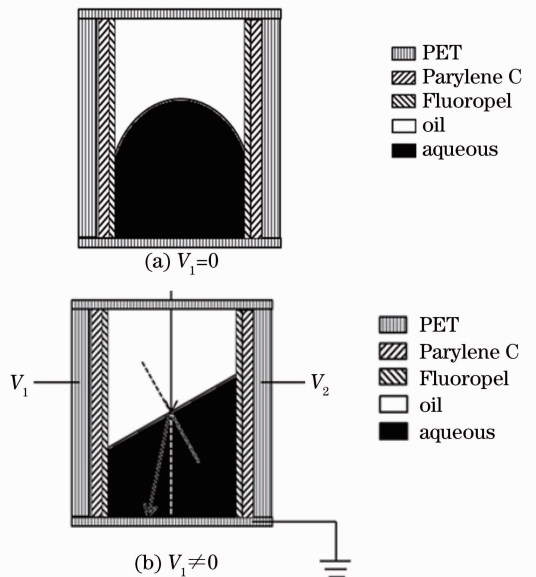


图 2 液体光学棱镜结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the liquid optical prism

当电极上调控电压为零,由于两种液体密度近似相等并且互不相溶,在腔体内形成双液体界面,且自然状态下呈现球形界面,如图 2(a)所示。通过外加电压来调控 NaCl 导电盐溶液和棱镜腔体壁面的接触角,从而实现电压对双液体界面形状的调控。设左侧施加电压为 V_1 ,右侧施加电压为 V_2 ,导电液

体与腔体壁面的接触角分别为 θ_1 和 θ_2 。根据(2)式， θ_1 和 θ_2 与工作电压 V_1 和 V_2 之间的关系分别为

$$\cos \theta_1 = \cos \theta_0 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r V_1^2}{2d\gamma}, \quad (3)$$

$$\cos \theta_2 = \cos \theta_0 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r V_2^2}{2d\gamma}. \quad (4)$$

当腔体壁面施加的电压 V_1 和 V_2 满足特定组合时，相应的接触角 θ_1 和 θ_2 满足 $\theta_1 + \theta_2 = \pi$ ，此时双液体界面呈现为平界面。将 $\theta_1 + \theta_2 = \pi$ 代入(3)、(4)式并整理得

$$V_2 = \sqrt{V_1^2 - \frac{4d\gamma \cos \theta_1}{\epsilon_0 \epsilon_r}}. \quad (5)$$

由(5)式可以看出，在液体棱镜系统中，当左侧施加的工作电压为 V_1 ，对应地导电液体与左侧壁面的接触角为 θ_1 ，则腔体右侧壁面的工作电压 V_2 必须满足(5)式。此外，当在系统上施加能够满足(5)式的不同 V_1 和 V_2 组合，可获得不同倾斜程度 θ_1 的平界面，从而实现光学棱镜对光束方向的控制和偏转功能，如图2(b)所示。反过来，根据设定的倾斜角，亦可由(3)式和(5)式计算出系统所需要的工作电压组合。

3 性能测试与结果分析

图3为液体光学棱镜对入射光束偏转角的测试装置示意图，其中数字显微镜电荷耦合器件(CCD) (DH-HV2002UC)放置于液体棱镜侧面，记录在电压驱动过程中双液体界面的变化情况，并输入计算机。He-Ne激光器作为探测光源，沿着光轴垂直入射，其中 L 为待测液体棱镜下边界与接收屏之间的距离， H 为双液体界面与接收屏之间的距离， D 为光斑位移。鉴于研制的液体棱镜尺寸在厘米量级，可近似认为 $H \approx L$ 。当调控电压为零时，透射光线沿光轴方向出射。施加特定电压组合，双液体界面变为平面，且倾斜度随电压的改变而发生变化，此时经

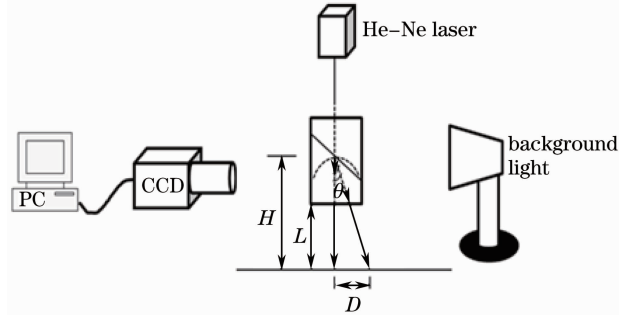
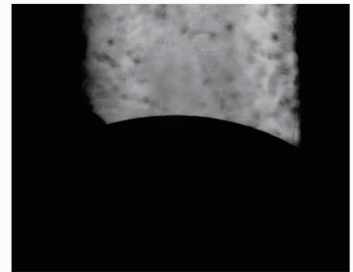


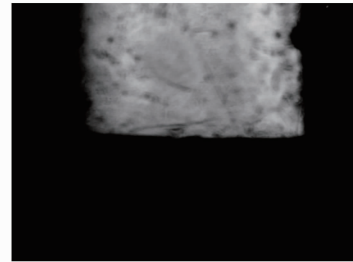
图3 液体光学棱镜偏转角测试结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of liquid optical prism angle test structure

过系统的出射光方向发生偏转，并最终导致光斑位移发生改变。通过测量光斑位移 D 和 L ，可计算光束经系统出射的偏转角为 $\delta = \arctan(D/L)$ 。

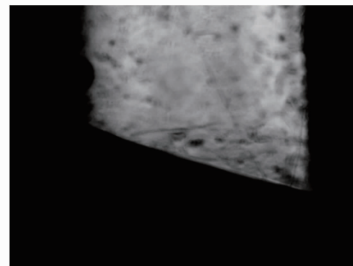
图4为侧面拍摄的不同电压组合下双液体界面形变照片。上层液体为不导电硅油，下层液体为NaCl电解质盐溶液。从图中可以发现，两种液体界面形状随着施加电压的变化而发生变化。不施加电压，双液体界面呈自然球形弯曲状态，如图4(a)所示；随着电压增大，NaCl盐溶液与腔体壁面的接触角减小，且电压和角度变化关系满足 Young-Lippmann 方程[(2)式]。当左右两侧电压增至142 V时，氯化钠与双侧壁面的接触角均减小至 90° ，此时双液体界面曲率为零，双液体界面为平面，如图4(b)所示。当左右两侧电压 V_1 和 V_2 分别为175 V和105 V时，液体界面曲率依然为零且双液体平界面与水平方向有一定的倾斜角度，此时界面与左右两侧壁面的接触角 θ_1 和 θ_2 分别约为 65° 和 115° ，如图4(c)所示。采用图3的测试装置，计算出系统对入射光束的偏转角度约为 7° ，即操作电压分别为175 V和105 V



(a) $V_1=V_2=0$ V



(b) $V_1=V_2=142$ V



(c) $V_1=175$ V, $V_2=105$ V

图4 不同电压下，液体棱镜的双液体界面系列图
Fig. 4 Photos of double liquid interface liquid prism at different voltages

时,该系统具备传统光学棱镜对光束的偏折功能,对应的偏转范围为 $(-7^\circ, +7^\circ)$ 。

根据几何光学原理和介电润湿理论,基于介电润湿技术的液体光学棱镜的最大光束偏转角取决于两种液体的折射率以及介电润湿效应的接触饱和角。鉴于选用的液体已经确定(NaCl 电解质盐溶液和硅油),故系统对光束的偏转能力仅取决于介电润湿发生饱和现象时的接触角大小。实验发现,当工作电压增大至约 180 V 时,NaCl 电解质盐溶液在硅油环境中的接触角减小到约 60° 左右^[17],不再随工作电压变化,此时经系统后的出射光束偏离入射光束的角度约为 10° 。根据(3)式和(5)式,可分别算出当一侧壁面的接触角取饱和值时系统的工作电压 V_1 和 V_2 分别约为 176 V 和 96 V,此时棱镜系统对光束的偏转角度约为 9.5° ,即系统对光束的最大偏转范围约为 $(-9.5^\circ, +9.5^\circ)$,这与实验测量的偏转范围 $(-10^\circ, +10^\circ)$ 吻合较好。若选择适当的液体组合降低甚至消除电润湿饱和现象的影响,系统对光束的控制和偏转能力将不再受限于饱和接触角,仅取决于两种液体的折射率。提高两种液体的折射率比将大大提高系统的控光能力,因此,下面讨论液体的折射率对系统控光能力的影响。

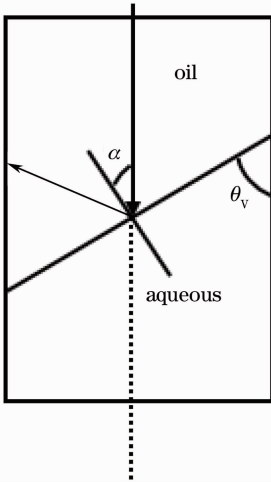


图 5 液体棱镜反射模式示意图

Fig. 5 Schematic of reflective mode of liquid prism

首先,分析光束经折射率大的液体入射到折射率小的液体时系统对光束的控制和偏折能力。图 5 为液体棱镜发生全反射时的示意图,设发生全反射时临界角为 β , α 为光束的入射角, θ_v 为电解质盐溶液与侧壁小于 90° 的接触角。需要指出的是,入射光线始终沿垂直方向入射,系统中入射光束的入射角 α 的变化主要源自双液体界面倾斜角度 θ_v 的变化,且两者之间满足 $\theta_v + \alpha = 90^\circ$ 。当入射角 α 小于临界

角 β ($\alpha < \beta$) 时,入射光束经界面折射,使得出射光束方向发生偏转,此时系统对光束的控制行为表现为透射模式。当侧壁施加特定的电压组合使得界面与水平方向重合时,出射光束与入射光束方向保持一致,不发生偏转,即偏转角为零。当改变电压使入射角接近临界角时,此时折射光束几乎沿着界面方向出射,系统对光束的偏折角最大,接近 $90^\circ - \beta$ 。考虑到两侧壁面接触角的互补性,在透射模式 ($\alpha < \beta$) 下,该系统对光束的偏转范围为 $[-(\pi/2 - \beta), (\pi/2 - \beta)]$; 当入射角大于或等于临界角 ($\alpha \geq \beta$) 时,根据几何光学理论,入射光束经界面将发生全反射,此时液体棱镜对光束的控制能力由原来的透射模式转换为反射模式。当入射角等于临界角 ($\alpha = \beta$) 时,电解质溶液与棱镜侧壁接触角为 $\theta_v = 90^\circ - \beta$, 光束经界面发生全反射后偏离原入射方向的角度为 $\pi - 2\beta$ 。在电压作用下,导电溶液与棱镜侧壁接触角 θ_v 继续减小,经棱镜系统反射后的反射光束偏离入射光束的幅度随之减小。当导电溶液与棱镜侧壁接触角 θ_v 降至接近零时,此时入射光束经系统后的出射光束将几乎沿原来方向即偏转角为零。因此,在反射模式 ($\alpha \geq \beta$) 下,系统对光束的偏折范围为 $[-(\pi - 2\beta), 0) \cup (0, \pi - 2\beta]$ 。综上所述,入射光束单向从折射率大的液体入射到折射率小的液体时,系统对光束方向的偏转范围由两部分组成,一部分来源于反射模式 ($\alpha \geq \beta$), 另一部分来源于透射模式 ($\alpha < \beta$), 总的光束偏转范围为 $[-(\pi/2 - \beta), (\pi/2 - \beta)] \cup [-(\pi - 2\beta), 0) \cup (0, \pi - 2\beta]$; 当入射光束单向经折射率小的液体入射到折射率大的液体时,无全反射现象发生。通过几何光学计算,系统对光束的最大偏转范围为 $[-(\pi/2 - \beta), (\pi/2 - \beta)]$ 。

在实际应用中,非极性绝缘油的粘度不仅对介电润湿液体光学棱镜的响应时间有重要的影响,而且一定程度上决定了系统能否具备快速稳定的工作状态。过小或过大粘度将导致液体棱镜出现振荡或过阻尼现象,显然这对光束方向偏转的精确化、快速化是十分不利的,因此,选择适宜的粘度系数尤为重要。采用 COMSOL Multiphysics 4.3 版本中的“Microfluidics Module”模块,建立基于介电润湿效应的双液体棱镜物理模型,分析非极性绝缘油的粘度对系统响应时间及稳定性能的影响,相关参数见表 1。

仿真过程中,设定上层液体为硅油,下层液体为电解质盐溶液(质量分数),表 2 给出两种不混溶液体的相关物理参数。

表 1 参数设置

Table 1 Parameter setting

Item	Parameter	
Theta	120°	Zero voltage contact angle
Gamma	0.02 N/m	Surface tension
Muoil	1.3 Pa·s	Insulating fluid viscosity
EPSR	2.65	Relative dielectric constant
d_f	1.5 μm	Dielectric thickness
V_{app}	80 V	Applied voltage

表 2 液体参数设置

Table 2 Liquid parameters setting

Liquid	Density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Refractive index n	Dynamic viscosity / ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
2% NaCl	1000	1.3	2.7×10^{-3}
Silicon oil	1000	1.65	1.3

鉴于研制的介电润湿液体光学棱镜对光束方向的控制和偏转主要依赖双液体界面形状的变化,因此,通过跟踪电解质盐溶液与腔体壁面接触线长度的变化,即可获得液体粘性对棱镜性能的变化情况。

图 6 给出双相液体界面位移与动力粘度关系,从图中看出动力粘度对界面位移影响不大,但对响应时间的影响极大。当 $\mu_{\text{oil}} \sim 0.01 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时,双液体界面在 $T=0.02 \text{ s}$ 时出现了振荡的现象,认为这是由于液体阻尼系数过小造成的。从图 6 中也可以得出粘度 $\mu_{\text{oil}} \sim 0.03 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 为最佳粘度,此时双相液体交界面位移较大,且无阻尼振荡和过阻尼现象。

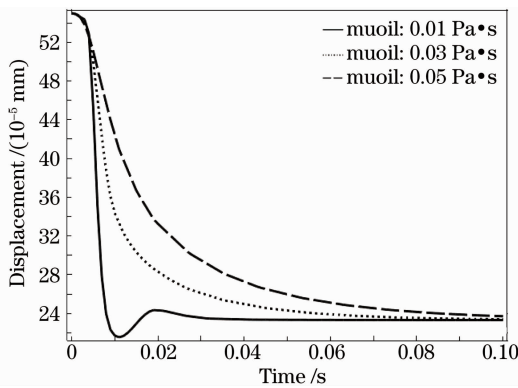


图 6 双相液体界面位移与动力粘度关系

Fig. 6 Relationship between interface displacement and dynamic viscosity of insulating fluid

4 结 论

设计并制作了一种基于介电润湿原理的双液体光学棱镜,介绍了系统的工作原理,分析了双液体界面形状随电压的变化,推导了接触角与系统工作电压的关系,计算并讨论了光束经系统后的偏转角范围与电润湿饱和及液体折射率的关系,模拟仿真了

动力粘度系数对系统响应时间及稳定性的影响。结果表明,在不同的电压组合下,双液体界面呈现平面状态,且与水平方向呈不同的倾斜角。相应地入射光束经界面折射或反射发生不同角度的偏转,从而实现光学棱镜对入射光束的控制和偏转。由于电润湿饱和现象的影响,该系统对光束方向的最大偏转范围约为 20° 。通过降低甚至消除接触角饱和现象以及提高两种液体的折射率比,可大幅度提高系统对光束方向的偏转和控制范围。当动力粘度取 $0.03 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时,对应的液体光学棱镜器件响应速度及稳定性能最佳。相关研究结果为液体光学棱镜进一步实用化提供了理论参考和实验依据,未来液体光学棱镜必将在自由空间光通信等诸多领域有着广阔的应用空间。

参 考 文 献

- Jelalian V Albert. Laser Radar Systems [M]. London: Artech House, 1992. 31–40.
- Hou Linlin. Advanced 3D Microfabrication and Demonstration of Arrayed Electrowetting Microprisms [D]. Cincinnati: University of Cincinnati, 2011. 15–50.
- McManamon F Paul, Dorschner A Tarry, Corkumet L David, *et al.*. Optical phased array technology [C]. IEEE, 1996, 84(2): 268–298.
- Qu Ronghui, Ye Qing, Dong Zuoren, *et al.*. Progress of optical phased array technology based on electro-optic material [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(12): 1861–1867.
瞿荣辉, 叶青, 董作人, 等. 基于电光材料的光学相控阵技术研究进展[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1861–1867.
- McManamon F Paul, Bos J Philip, Escutiet J Michael, *et al.*. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems [J]. IEEE, 2009, 97(6): 1078–1096.
- Shi Yubin, Ma Haotong, Ma Yanxing, *et al.*. Numerical simulation of high accuracy and high efficiency beam steering based on liquid crystal optical phase array [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0202002.
师宇斌, 马浩统, 马阎星, 等. 基于液晶相控阵高精度高效率光束偏转数值仿真[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0202002.
- Paul F McManamon. Agile nonmechanical beam steering [J]. Opt Photonics News, 2007, 17(3): 24–29.
- Lin Yeong Jyh, Chen Kuan Ming, Wu Shin Tson. Broadband and polarization independent beam steering using dielectrophoresis-tilted prism [J]. Opt Express, 2009, 17(10): 8651–8656.
- Smith R Neil, Abeyinghe C Don, Haus W Joseph, *et al.*. Agile wide-angle beam steering with electrowetting microprisms [J]. Opt Express, 2006, 14(14): 6557–6563.
- Zhao Rui, Cumby Brad, Russell Ann, *et al.*. Large area and low power dielectrowetting optical shutter with local deterministic fluid film breakup [J]. Appl Phys Lett, 2013, 103(22): 223510.
- Hagedon Matthew, Yang Shu, Russel Ann, *et al.*. Bright-paper by transport of ink through a white electrofluidic imaging film [J]. Nat Communication, 2012, 3(10): 1173.
- Wang Dazhen, Peng Runling, Chen Jiabi, *et al.*. Variable-focus hysteresis of double-liquid variable-focus lens [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0612001.
王大振, 彭润玲, 陈家璧, 等. 双液体变焦透镜变焦迟滞现象的

- 研究[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0612001.
- 13 Wei Han, Haus W Joseph, McManamon F Paul, *et al.*. Beam steering performance of electrowetting microprism arrays [C]. SPIE, 2009, 7339: 73390J.
- 14 Cheng Jiangtao, Chen Chunglung. Adaptive beam tracking and steering via electrowetting-controlled liquid prism [J]. Appl Phys Lett, 2011, 99(19): 191108.
- 15 T Satyanarayana, G S Ajay KumarReddy, V S P Rajesh. Design and simulation of micro electro wetting liquid lens for miniature cameras [J]. International Journal of Science and Research, 2013, 2(2): 180–185.
- 16 Frieder Mugele. Fundamental challenges in electrowetting: from equilibrium shapes to contact angle saturation and drop dynamics [J]. Soft Matter, 2009, 5: 3377–3384.
- 17 Chevalliot Stéphanie, Kuiper Stein, Heikenfeld Jason. Experimental validation of the invariance of electrowetting contact angle saturation [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012, 26(12-17): 1909–1930.
- 18 Marguerite Bienia, Catherine Quilliet, Marcel Vallade. Modification of drop shape controlled by electrowetting [J]. Langmuir, 2003, 19(22): 9328–9333.
- 19 Roura Pere. Thermodynamic derivations of the mechanical equilibrium conditions for fluid surfaces: Young's and Laplace's equations [J]. Am J Phys, 2005, 73(12): 1139–1147.

栏目编辑: 韩 峰