

介电润湿液体棱镜阵列的三维空间光束指向控制

杨龙啸, 赵瑞*, 孔梅梅, 陈陶, 关建飞, 梁忠诚

南京邮电大学电子与光学工程学院微流控光学技术研究中心, 江苏 南京 210023

摘要 为实现三维空间光束指向控制, 提出了一种基于介电润湿效应的液体棱镜阵列系统。根据几何光学和介电润湿理论, 推导并分析了光束转向角与液体棱镜单元的最大偏转角、介电润湿接触角、棱镜单元间距及液体折射率等因素之间的关系; 通过 COMSOL 构建介电润湿液体棱镜阵列模型, 仿真了电压控制下液体棱镜单元内双液体界面面型的变化过程, 模拟再现了该液体棱镜阵列对光束指向的控制特性。结果表明, 基于介电润湿技术的液体光学棱镜阵列在一定范围内可实现对光束指向的连续控制。通过选取特定的液体组合, 饱和接触角降低到 45° , 棱镜单元的光束转向范围可提高到 $28^\circ(-14^\circ\sim 14^\circ)$ 。当光轴间距 r 为 6 mm 时, 液体棱镜阵列系统可以实现 28° 圆锥区域内的连续控制, 且圆锥顶点位于 Z 轴 22.58 mm 位置处。

关键词 光学设计; 介电润湿效应; 液体棱镜阵列; 偏转角; 圆锥

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.162201

Beam Steering Control of Liquid Prism Array Based on Electrowetting-on-Dielectric in Three-Dimensional Space

Yang Longxiao, Zhao Rui^{1*}, Kong Meimei, Chen Tao, Guan Jianfei, Liang Zhongcheng

Center of Optofluidic Technology, College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract To control the light steering direction in three-dimensional space, a liquid prism array system based on electrowetting-on-dielectric (EWOD) is proposed. According to the geometrical optics and EWOD theory, the relationships among the beam steering angle, maximum beam steering angle, EWOD contact angle, interval between adjacent prisms, and liquid refractive index are analyzed and discussed. A theoretical model of an EWOD liquid prism array is constructed in COMSOL. Then, the evolution of the double liquid interface in the liquid prism unit is simulated under different voltages. The beam steering control characteristics of the liquid prism array are simulated. Results demonstrate that the EWOD based liquid prism array can realize continuous beam steering control in a certain range. By selecting a specific combination of liquids, the saturation contact angle can decrease to 45° , and consequently the range of beam steering angle for the liquid prism unit reaches 28° (from -14° to 14°). As the optical axis spacing r is set to 6 mm, the steering region of the liquid prism array system is in a conical region whose apex angle is 28° , and the corresponding vertex of the cone is located at $Z=22.58$ mm in the Z -axis.

Key words optical design; electrowetting-on-dielectric effect; liquid prism array; beam steering angle; cone

OCIS codes 220.4830; 220.2740; 230.2090

1 引言

光束指向控制是通过改变导光介质的外在形态或内部属性来控制光束的转向角, 从而达到控制光束指向的目的, 在空间光通信、现代精确制导、激光

扫描等领域应用广泛。传统的机械式光束偏转技术^[1-2]通过改变光束或视轴的方向实现光束偏转, 典型代表有万向转镜和方向转架等, 依赖万向节、转向台等, 存在结构复杂、体积巨大、不易微型化、能耗高、动态性差和对振动敏感等问题。目前, 非机械式

收稿日期: 2019-01-22; 修回日期: 2019-03-11; 录用日期: 2019-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(61775102)

* E-mail: zhaor@njupt.edu.cn

光束偏转技术主要包括声光偏转技术^[3]和液晶光束偏转技术^[4-5],通过波前调制或衍射控制等方式实现纯电控的光束偏转控制。非机械式光束偏转技术^[6-8]具有能耗低、结构简单、灵活性、控制精度高等诸多优点,是目前国内外科研工作者的研究热点。

1992年,美国 Lincoln 实验室提出了基于声光偏转装置的光束跟踪,首次对非机械式的光束控制方法和作用机制进行了探讨^[9]。随后,美国 Brimrose 公司研制了一种基于二氧化碲晶体的声光偏转器,该器件的功耗为 0.5 W,响应时间为 50 μs ,偏转范围为 40 mrad^[10]。2014年,张泽红等^[11]设计了一种基于磷化镓晶体的宽带声光偏转器,峰值衍射效率达 8%,衍射光在声光介质外的动态扫描角为 5.2°。声光偏转技术虽然实现了对光束的相位光强调制,但衍射效率低、功耗高,不适合用于高速扫描。2004年,Stockley 等^[12]探讨了液晶移相器在空间光通信中代替传统机械式空间光调制器的可能性。2008年,孙亮^[13]将液晶光学相控阵用于光束扫描,采用的液晶材料的双折率为 0.35,研制出一种包含 4000 个移相器的液晶光学相控阵,可实现 0.2 rad 的角度偏转,响应时间为 39 ms。2014年,赵祥杰等^[14]利用空间分辨率较高的反射式液晶空间光调制器实现了电控光束偏转,在保持衍射效率大于 46%的前提下,可以对 632.8 nm 激光实现大于 10 mrad 量级的电控偏转。2017年,杨赫等^[15]研制出基于硅基液晶的空间光调制器,光束转向角最大可达 4°,偏转精度误差为 μrad 量级。当光束转向角在 $\pm 1^\circ$ 以内时,光斑衍射效率大于 65.2%。谢志坤等^[16]利用液晶空间光调制器构建动态的二元菲涅耳透镜相位结构,实现了对光束焦斑的轴向与横向偏移的快速精确调节。然而,由于液晶的固有物化性质,液晶光束偏转技术存在响应速度较慢、衍射效率低等问题。2017年,Clement 等^[17]尝试将三个单液体棱镜单元线性排列,用于对二维空间中光束的控制,并从实验方面进行了初步探讨。由于液体棱镜具有结构简单、易集成、无偏振依赖性、不需要克服运动过程中的惯性影响、易实现阵列化等特点,基于介电润湿技术的液体棱镜阵列系统有望成为无机机械光束控制技术的新趋势。

本文设计了一种基于介电润湿液体棱镜的二维阵列,通过 Comsol 软件建模并对其控光特性进行仿真分析。首先,根据介电润湿理论和几何光学知识,推导出光束转向角与液体棱镜单元的最大偏转角、介电润湿接触角、棱镜单元间距及液体折射率等

因素之间的关系,并通过选择特定参量的液体材料,降低饱和接触角,进而扩大系统对光束的指向控制范围;然后,构建了介电润湿液体棱镜阵列的物理模型,仿真模拟了工作电压对双液体界面面型的控制情形,再现了液体棱镜阵列对光束方向的控制和偏转,讨论了光束转向角随接触角、入射角、液体折射率及棱镜单元间距等因素的变化。相关结果将推动光束指向控制系统的应用发展,也为液体光学棱镜的进一步实用化提供了参考。

2 结构与工作原理

2.1 介电润湿液体棱镜单元

介电润湿液体棱镜单元由 2 mm \times 2 mm \times 4 mm 正方形腔体(横截面为正方形,壁面间彼此绝缘,不导电)、氧化铟锡(ITO)玻璃基板和密度相同且互不相溶的两种液体组成。侧壁 ITO 玻璃上依次涂覆介电层和疏水层,腔体内上层填充质量分数为 0.01% 的氯化钾(KCL)和质量分数为 1% 的十二烷基硫酸钠(SDS)混合溶液作为导电液体,下层填充质量分数为 50% 的十二烷与 1-氯化萘的混合液体作为绝缘油液体。上盖玻片的 ITO 玻璃基板与电源负极相连,4 个电源正极分别与正方柱形腔体 4 个壁面相连。图 1(a)给出了基于介电润湿效应的液体棱镜单元结构示意图,4 个壁面工作电压分别记为 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 。根据介电润湿效应的工作原理,当工作电压改变时,双液体界面与腔体壁面的接触角发生改变,双液体界面面型也随之发生变化。本文拟通过改变工作电压 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 来实现对液体界面面型的控制。当 4 个侧壁不施加工作电压($V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = 0$ V)时,双液体界面呈自然球形界面,球心在导电溶液一侧。当对 4 个壁面施加特定电压组合,使双液体界面与其中一对壁面的两个接触角之和为 180°,且另外一对接触角均为 90°时,双液体界面将由自然球形界面变为平界面。

介电润湿液体棱镜单元的光路偏转示意图如图 1(b)所示,其中 n_1 、 n_2 分别为绝缘油液体和导电液体的折射率。假定双液体平界面与左右侧壁面的接触角分别为 θ_2 和 θ_4 ,适当选择电压组合值,可实现双液体平界面沿着空间任意方向呈不同角度倾斜。为了简化计算,假设入射光束沿着竖直方向入射,且系统环境为空气。当入射光经双液体界面发生折射时,假定 α_1 为光束抵达双液体界面时的入射角, α_2 为光束即将进入空气时的入射角, β 为光束出射角

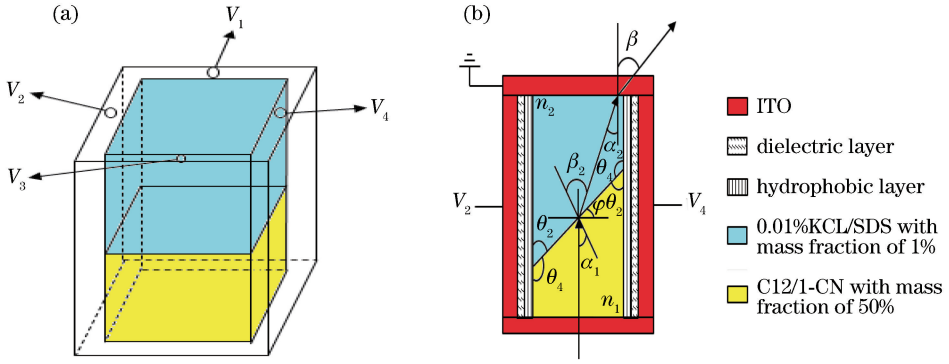


图 1 液体棱镜单元结构图。(a)施加电压控制示意图;(b)光路偏转示意图

Fig. 1 Structural diagram of liquid prism unit. (a) Diagram of applied voltage control; (b) diagram of optical path deflection

(即光束转向角,并记最大光束转向角为 β_{\max}), φ 为双液体平界面与水平方向的夹角,简称倾斜角。图1(b)中的倾斜角 φ 和接触角 θ_2 满足

$$\varphi = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \theta_2, & \theta_2 < \frac{\pi}{2} \\ \theta_2 - \frac{\pi}{2}, & \theta_2 > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (1)$$

根据马吕斯定律和几何知识,有

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \beta_2, \quad (2)$$

$$n_2 \sin \alpha_2 = \sin \beta, \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \beta_2 - \varphi, \quad (4)$$

$$\alpha_1 = \varphi. \quad (5)$$

由(2)式得

$$\sin \beta_2 = \frac{n_1 \sin \alpha_1}{n_2}. \quad (6)$$

将(4)式代入(3)式,则可得

$$\sin \beta = n_2 \sin(\beta_2 - \varphi) = n_2 (\sin \beta_2 \cos \varphi - \sin \varphi \cos \beta_2), \quad (7)$$

将(6)式代入(7)式得

$$\sin \beta = n_2 \left[\frac{n_1 \sin \varphi}{n_2} \cos \varphi - \sin \varphi \sqrt{1 - \left(\frac{n_1 \sin \varphi}{n_2} \right)^2} \right]. \quad (8)$$

进一步整理得光束转向角为

$$\beta = \arcsin \left[n_1 \sin \varphi \cos \varphi - n_2 \sin \varphi \sqrt{1 - \left(\frac{n_1 \sin \varphi}{n_2} \right)^2} \right]. \quad (9)$$

将(1)式代入(9)式,得光束转向角为

$$\beta = \begin{cases} \arcsin \left\{ n_1 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_2 \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta_2 \right) - n_2 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_2 \right) \sqrt{1 - \left[\frac{n_1 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_2 \right)}{n_2} \right]^2} \right\}, & \theta_2 < \frac{\pi}{2} \\ \arcsin \left\{ n_1 \sin \left(\theta_2 - \frac{\pi}{2} \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta_2 \right) - n_2 \sin \left(\theta_2 - \frac{\pi}{2} \right) \sqrt{1 - \left[\frac{n_1 \sin \left(\theta_2 - \frac{\pi}{2} \right)}{n_2} \right]^2} \right\}, & \theta_2 > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (10)$$

由(10)式可知,介电润湿棱镜单元的最大光束转向角 β_{\max} 取决于接触角 θ_2 和棱镜腔体内填充液体的折射率大小,而接触角 θ_2 的变化范围则受限于电润湿饱和接触角^[18]。

2.2 基于介电润湿技术的液体棱镜阵列

本文设计的液体棱镜阵列由2.1中的5个介电润湿液体棱镜单元呈十字型等间距排布构成,如图2所示。假定三维坐标原点位于中心液体棱镜单元的上表面中心位置,垂直纸面向外方向为 X 轴正方向,水平向右方向为 Y 轴正方向,竖直向上方向为

Z 轴正方向。

当对5个棱镜单元分别施加特定电压组合,使双液体界面为沿水平方向的平界面时,光束沿 Z 轴正方向垂直入射时出射光线不发生偏转,此时的出射光在 Z 轴上的焦距为无穷,如图2(a)所示;当施加在中间棱镜单元上的电压不变,对称地改变周围4个棱镜单元的工作电压,使光束通过液体棱镜单元后发生最大偏转,且会聚在 Z 轴上同一点(M 点)时,该棱镜阵列在 Z 轴上实现对光束会聚焦点的控制,如图2(b)所示。根据需求,通过调节施加在各

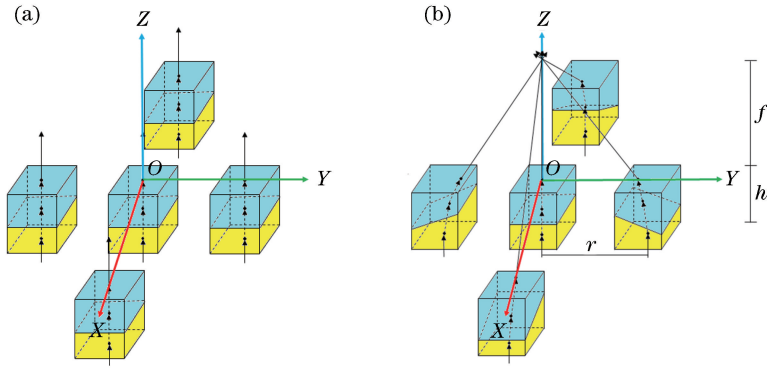


图2 液体棱镜的光束指向图。(a)焦距无穷;(b) Z轴上聚焦

Fig. 2 Beam steering diagrams of liquid prism. (a) Infinite focal length; (b) focusing on Z axis

个棱镜单元上的电压组合,该系统可实现三维空间一定范围内的光束指向控制。

通过分析可知,棱镜单元之间的间距将影响系统在 Z 轴方向的最小聚焦点。为方便说明问题,图 3 给出沿水平方向排布的三个液体棱镜单元,其中焦距为 f ,棱镜间的光轴间距为 r ,棱镜高度为 h 。

将(3)式适当变形整理后得

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{\sin \beta}{n_2}\right). \quad (11)$$

根据图 3 中的几何关系,可得

$$f = (r - \delta) \cot \beta, \quad (12)$$

$$\delta = \frac{h}{2} \tan(\alpha_2). \quad (13)$$

结合(11)~(13)式,得到焦距 f 和棱镜间光轴间距 r 的关系为

$$f = \left\{ r - \frac{h}{2} \tan\left[\arcsin\left(\frac{\sin \beta}{n_2}\right)\right] \right\} \cot \beta. \quad (14)$$

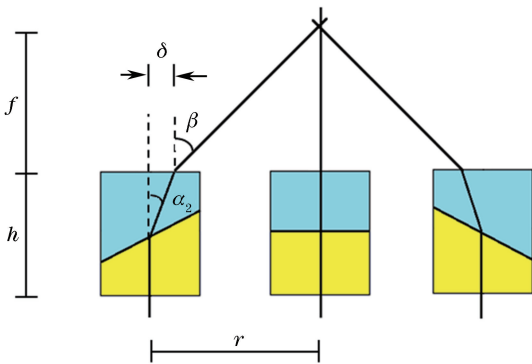


图3 水平方向上液体棱镜排列图

Fig. 3 Liquid prism arrangement in horizontal direction

本文设计的介电润湿液体棱镜阵列对光束的指向控制区域是圆锥角为 $2\beta_{\max}$ 的圆锥面,如图 4 红色区域所示。设光束的会聚焦点为 M_0 (圆锥面的顶点),坐标为 $(0,0,f)$ 。假定 $M(x,y,z)$ 为圆锥面上

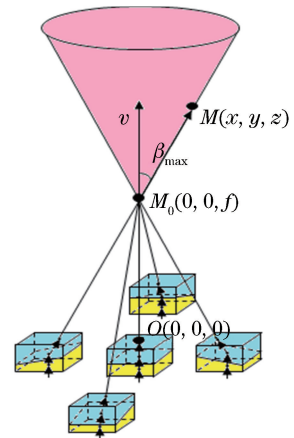


图4 液体棱镜阵列的光束指向区域

Fig. 4 Beam steering region of liquid prism array

的任意一点,则圆锥面方程可表示为

$$\frac{(x,y,z-f) \cdot (0,0,f)}{\sqrt{x^2+y^2+(z-f)^2}} = \pm \cos \beta_{\max}. \quad (15)$$

3 仿真建模与分析讨论

在 COMSOL 软件仿真过程中,将液体棱镜单元的腔体长和宽都设定为 2 mm,高度设定为 4 mm,棱镜单元的光轴间距设定为 6 mm;棱镜单元腔体内部涂覆的绝缘层和疏水层的厚度分别设为 $3 \mu\text{m}$ 和 100 nm ;棱镜腔体内下层液体选取质量分数为 50% 的十二烷与 1-氯化萘混合液体 ($n_1 = 1.539$) 作为绝缘油液体,上层液体则选取含有质量分数为 0.01% 的 KCL 和质量分数为 1% 的 SDS 水溶液 ($n_2 = 1.33$) 作为导电液体,相关数据见表 1 和表 2。

课题组前期针对单液体棱镜的工作特性进行了非常详细的研究^[18-19],在此不再赘述。当施加特定的电压组合,双液体界面可呈现为平界面。随着工作电压组合的不同,双液体平界面的倾斜方向

表 1 参数设置

Table 1 Parameter settings

Variable	Value
Zero voltage contact angle $\theta / (^{\circ})$	165
Surface tension $\gamma / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	0.0069
Relative dielectric constant ϵ	2.65
Dielectric thickness $d_f / \mu\text{m}$	3
Applied voltage $V_{\text{app}} / \text{V}$	120

表 2 液体参数设置

Table 2 Settings of liquid parameters

Liquid	Density / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Refractive dynamic index n	Dynamic viscosity / $(10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s})$
0.01% KCL/ 1% SDS	1000	1.33	2.7
50% C12/1-CN	1000	1.539	4.13

随之发生相应变化。图 5 给出了不同工作电压组合下光束经介电润湿液体棱镜阵列后的指向偏转情况。可以看出:当对每个液体棱镜单元均施加 $V_1 = 41 \text{ V}, V_2 = 41 \text{ V}, V_3 = 41 \text{ V}, V_4 = 41 \text{ V}$ 的电压时,棱镜单元内的双液体界面为水平界面,此时入射光束经过棱镜阵列后方向不发生改变,如图 5(a) 所示;不改变施加在位于原点位置的棱镜单元的电压, X 正半轴对应棱镜单元施加电压 $V_1 = 21 \text{ V}, V_2 = 41 \text{ V}$,

$V_3 = 54 \text{ V}, V_4 = 41 \text{ V}$, X 轴负半轴棱镜单元施加电压 $V_1 = 54 \text{ V}, V_2 = 41 \text{ V}, V_3 = 21 \text{ V}, V_4 = 41 \text{ V}$, Y 轴正半轴对应棱镜单元施加电压 $V_1 = 41 \text{ V}, V_2 = 21 \text{ V}, V_3 = 41 \text{ V}, V_4 = 54 \text{ V}$, Y 轴负半轴棱镜单元施加电压 $V_1 = 41 \text{ V}, V_2 = 54 \text{ V}, V_3 = 41 \text{ V}, V_4 = 21 \text{ V}$ 。此时光束经过棱镜阵列后,在 Z 轴上会聚,最小焦距为 $f = 22.58 \text{ mm}$,如图 5(b) 所示。

当对位于 X 轴正半轴的液体棱镜单元施加电压 $V_1 = 41 \text{ V}, V_2 = 41 \text{ V}, V_3 = 41 \text{ V}, V_4 = 41 \text{ V}$ 时,此时双液体界面为水平界面,入射光束经该棱镜底部后传播方向未改变。对位于原点的液体棱镜单元分别施加电压 $V_1 = 52 \text{ V}, V_2 = 41 \text{ V}, V_3 = 26 \text{ V}, V_4 = 41 \text{ V}$, X 轴负半轴的液体棱镜单元施加电压 $V_1 = 54 \text{ V}, V_2 = 41 \text{ V}, V_3 = 21 \text{ V}, V_4 = 41 \text{ V}$ 的工作电压, Y 轴正半轴棱镜单元施加电压 $V_1 = 53 \text{ V}, V_2 = 24 \text{ V}, V_3 = 24 \text{ V}, V_4 = 53 \text{ V}$, Y 轴负半轴棱镜单元施加电压 $V_1 = 53 \text{ V}, V_2 = 53 \text{ V}, V_3 = 24 \text{ V}, V_4 = 24 \text{ V}$,此时,平行光束经液体棱镜阵列后会聚,焦点位于 X 正半轴上的棱镜单元光轴上,如图 5(c) 所示;同理,通过在各棱镜单元上施加特定的电压组合,也可使出射光束聚焦位于 Y 轴上的棱镜单元的光轴上,如图 5(d) 所示。分析表明:本文设计的液体棱镜阵列可以在三维空间一定范围内对光束的指向控制。

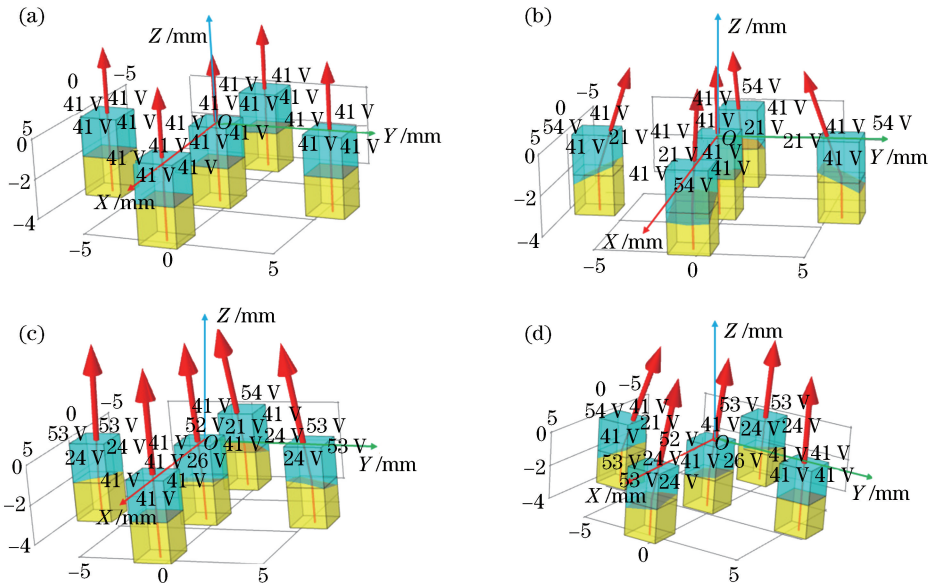


图 5 光束指向控制图。(a) 焦距无穷;(b) Z 轴上聚焦;(c) X 轴上聚焦;(d) Y 轴上聚焦

Fig. 5 Diagrams of beam steering control. (a) Infinite focal length; (b) focusing on Z axis; (c) focusing on X axis; (d) focusing on Y axis

根据理论分析,光束指向控制范围的大小主要取决于液体棱镜单元的最大转向角 β_{max} 和棱镜间光轴间距 r 。最大转向角 β_{max} 取决于液体折射率和接

触角 θ ,而 θ 变化范围则受限于饱和接触角。当液体组合选用硅油($n_1 = 1.4$)和 NaCl 溶液($n_2 = 1.33$)时,饱和接触角为 60° ,光束从棱镜底部垂直入射,

出射光束最大转向角 β_{\max} 为 2.3° 。当采用折射率为 $n_1 = 1.65$ 的甲基硅油作为绝缘油时,饱和角度仍为 60° ,此时出射光束最大转向角 β_{\max} 增大到 11° [19]。

棱镜单元间距发生改变,则液体棱镜阵列的会聚焦点也随之发生变化。图 6 给出了液体棱镜阵列系统的焦距 f 随棱镜单元间距 r 的变化关系曲线。当棱镜间光轴间距 r 分别为 4, 6, 12 mm 时,液体棱镜阵列系统的最小焦距 f 分别为 14.4, 22.58, 46.64 mm。随着间距 r 的增加,聚焦焦距 f 随之增大,即棱镜在 Z 轴方向的控制范围变小。

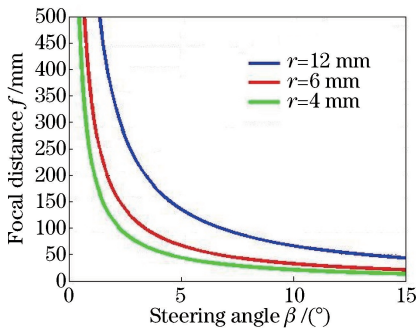


图 6 不同间距 r 对应的焦距 f 和转向角的关系曲线

Fig. 6 Relationship between focal length f and steering angle under different spacing r

由于 KCL 可以提高水的导电性, SDS 可以降低水油之间的界面张力,故可使饱和接触角降低到 45° [20]。当棱镜间距取 $r = 6$ mm 时,棱镜单元的最大转向角 β_{\max} 达到 14° 。此时对应的棱镜阵列系统实现了顶点位于 $Z = 22.58$ mm、锥角为 28° 的圆锥区域内的光束指向控制。

4 结 论

设计了一种基于介电润湿技术的液体棱镜阵列系统,介绍了系统结构和工作原理,推导了光束转向角与接触角的关系式,分析了光束转向角与液体棱镜单元的最大偏转角、介电润湿接触角、棱镜单元间距及液体折射率等因素之间的关系;采用 COMSOL 仿真软件构建了基于介电润湿效应的液体棱镜阵列的物理模型,验证了系统对光束指向的控制特性。结果表明:该介电润湿液体棱镜阵列在三维空间的一定范围内实现了对光束的连续指向控制。当液体棱镜单元的间距 $r = 6$ mm 时,通过选择特定填充液体组合,该液体棱镜阵列系统对光束指向实现了圆锥顶点位于 $Z = 22.58$ mm、锥角为 28° 的圆锥区域内的连续控制。相关研究结果为液体光学棱镜阵列的进一步实用化提供了理论参考和依

据,未来液体光学棱镜系统必将在激光雷达和自由空间光通信等诸多领域得到广泛应用。

参 考 文 献

- [1] Kim B S, Gibson S, Tsao T C. Adaptive control of a tilt mirror for laser beam steering [C]//Proceedings of the 2004 American Control Conference, June 30-July 2, 2004, Boston, MA, USA. New York: IEEE, 2005: 3417-3421.
- [2] Chen C B. Beam steering and pointing with counter-rotating grisms [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6714: 671409.
- [3] Zhou X Y, Wang J S, Liang X, *et al.* 126 W high-stability acousto-optical Q-switched 532 nm laser based on LiB_3O_5 crystal intracavity frequency-doubling [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 051401.
周旭阳, 王劲松, 梁旭, 等. 基于 LiB_3O_5 晶体腔内倍频的 126 W 高稳定性 532 nm 声光调 Q 激光器 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 051401.
- [4] Zhang C, Huang Y M, Qi B, *et al.* Beam steering control based on liquid crystal spatial light modulator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(9): 0905005.
张彩, 黄永梅, 亓波, 等. 基于液晶空间光调制器的光束偏转控制 [J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0905005.
- [5] Xu J H, Wang X R, Huang Z Q, *et al.* PID tracking method of space laser communication based on liquid crystal optical phased array [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 021202.
许剑华, 汪相如, 黄子强, 等. 基于液晶光学相控阵的空间激光通信 PID 跟踪方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 021202.
- [6] Hao Y J. The research of non-mechanical beam steering controller in laser communication [D]. Chengdu: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2014: 35-60.
郝雅静. 光通信中非机械式光束偏转控制器研究 [D]. 成都: 中国科学院研究生院, 2014: 35-60.
- [7] Liu Y J, Xuan L, Hu L F, *et al.* Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure phase [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(12): 1682-1686.
刘永军, 宣丽, 胡立发, 等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究 [J]. 光学学报, 2005, 25(12): 1682-1686.
- [8] Oleski P J, Dorrian K W, Busch T E.

- Nonmechanical laser beam steering/beam spoiling methods for intersatellite cross links[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2123: 336-348.
- [9] Tamada S, Nakane Y. Laser scanning apparatus having two, parallel, acousto optic deflectors for the horizontal scan: US 5086341 [P/OL]. (1992-02-04) [2019-01-05]. <https://patents.glgoo.top/patent/US5086341A/en>.
- [10] Nikulin V, Khandekar R, Sofka J. Performance of a laser communication system with acousto-optic tracking: An experimental study[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6105: 61050C.
- [11] Zhang Z H, Lu C, He X L, *et al.* Study on acousto-optic deflector based on gallium phosphide [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(5): 694-697.
张泽红, 陆川, 何晓亮, 等. 磷化镓声光偏转器[J]. 压电与声光, 2014, 36(5): 694-697.
- [12] Stockley J, Serati S. Advances in liquid crystal beam steering[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5550: 32-40.
- [13] Sun L. The study of light-beam scanning based on optical phased array [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008: 50-65.
孙亮. 基于光学相控阵的光束扫描研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008: 50-65.
- [14] Zhao X J, Zhang D Y, Luo Y Q. Electro-controllable optical beam deflection employing reflective liquid crystal spatial light modulator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6): 1324-1328.
赵祥杰, 张大勇, 骆永全. 反射式液晶空间光调制器电控光束偏转[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1324-1328.
- [15] Yang H, Tong S F, Zhang L, *et al.* Beam deflection control technology based on liquid crystal spatial light modulator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 110603.
杨赫, 佟首峰, 张磊, 等. 基于液晶空间光调制器的光束偏转控制技术[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 110603.
- [16] Xie Z K, Qian W A, Zhang J H, *et al.* Real-time feedback control method and system of beam focusing based on spatial light modulation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 072201.
谢志坤, 钱伟岸, 张金辉, 等. 基于空间光调制的光束聚焦实时反馈控制方法及系统[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 072201.
- [17] Clement C E, Thio S K, Park S Y. An optofluidic tunable Fresnel lens for spatial focal control based on electrowetting-on-dielectric (EWOD) [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 240: 909-915.
- [18] Zhao R, Tian Z Q, Liu Q C, *et al.* Electrowetting-based liquid prism[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1223003.
赵瑞, 田志强, 刘启超, 等. 介电润湿液体光学棱镜[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1223003.
- [19] Chen D L. Design, modeling and simulation of microfluidic optical device based on electrowetting [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016: 23-35.
陈德良. 基于介电润湿技术的微流体光学器件设计、建模与仿真[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016: 23-35.
- [20] Hou L L. Advanced 3D microfabrication and demonstration of arrayed electrowetting micropisms [D]. Cincinnati: University of Cincinnati, 2011: 15-50.