

# 用于波前补偿的三液体透镜阵列的设计分析

赵瑞\*, 陈露楠, 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** 为了校正由活塞、倾斜和离焦而引起的波前误差,设计一种基于介电润湿效应的三液体透镜阵列。根据介电润湿的理论,构建介电润湿三液体透镜阵列模型,仿真模拟液体界面的面型随着电压的变化过程,并分析三液体透镜阵列对活塞误差、离焦误差和倾斜误差的波前补偿能力。仿真结果表明,三液体透镜阵列可以实现对不同类型波前误差的校正和补偿,峰谷值由补偿前的  $1.838\lambda$  减小到补偿后的  $0.285\lambda$ ,方均根值由补偿前的  $0.424\lambda$  减小到补偿后的  $0.053\lambda$ ,斯特列尔比由补偿前的  $0.161$  提高到补偿后的  $0.917$ 。相关研究结果表明,三液体透镜阵列在无机机械波前校正的领域中有着广阔的应用前景。

**关键词** 光学设计; 三液体透镜; 介电润湿; 波前补偿; 斯特列尔比值

**中图分类号** O439 **文献标志码** A

**doi:** 10.3788/LOP57.212202

## Design and Analysis of Triple Liquid Lens Array for Wavefront Compensation

Zhao Rui\*, Chen Lunan, Kong Meimei, Chen Tao, Guan Jianfei, Liang Zhongcheng

*Center of Optofluidic Technology, College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunication, Nanjing, Jiangsu 210023, China*

**Abstract** In this study, we designed a triple liquid lens array based on the electrowetting-on-dielectric effect to correct the wavefront errors caused by the piston, tilt, and defocus. A electrowetting-on-dielectric triple liquid lens array model is constructed herein according to the electrowetting-on-dielectric theory. The simulation of the surface shape of the liquid interface changes with the voltage. The wavefront compensation capability of the triple liquid lens array on the piston, defocus, and tilt errors are analyzed. The simulation results showed that the three-liquid lens array can realize the correction and the compensation of different types of wavefront errors. The peak-to-valley value is reduced from  $1.838\lambda$  before the compensation to  $0.285\lambda$  after the compensation. The root mean square value is reduced from  $0.424\lambda$  before compensation to  $0.053\lambda$  after the compensation. The Strehl ratio is  $0.161$  before the compensation to  $0.917$  after the compensation. The related research results show that the triple liquid lens array has broad application prospects in the field without mechanical wavefront correction.

**Key words** optical design; triple liquid lens; electrowetting-on-dielectric; wave-front compensation; Strehl ratio

**OCIS codes** 220.2740; 220.4830; 220.1080

## 1 引言

自适应光学是 20 世纪 70 年代以来发展起来的一门新兴光学技术,该技术可以通过实时测量并加以补偿来解决天文成像过程中由大气湍流或其他因素造成的波前畸变问题。由于自适应光学技术在高分辨率观测和高集中度激光能量传输等方面发挥着

重要的作用,因此国内外学者争相投入自适应光学技术的研究中。波前校正器件作为自适应光学系统中的关键器件之一,决定了自适应光学系统的性能和价格,从某种意义上来说其代表了自适应光学技术的发展水平<sup>[1-3]</sup>。

20 世纪 90 年代以前,波前校正器件主要为可变形镜,但因其存在能耗高、体积大和驱动单元少等

收稿日期: 2020-01-20; 修回日期: 2020-02-28; 录用日期: 2020-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(61775102,61905117)

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

问题,使应用范围受到了极大的限制<sup>[4-5]</sup>。自 20 世纪 90 年代开始,液晶空间光调制器<sup>[6-8]</sup>因其具有驱动单元数目多、驱动电压低、控制灵活和价格低廉等优点,逐渐受到了国内外科学工作者的关注。1997 年,Love<sup>[9]</sup>在自适应光学系统中使用了液晶空间调制器作为波前校正器件,实现了波前校正和波前模拟。2006 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所刘永军等<sup>[10]</sup>研制了新型平行排列的二维阵列液晶相位调制器,并对其进行了畸变波前调制的实验。由于受到材料特性的限制,液晶空间调制器的响应速度慢,校正频率大约在几十赫兹,当将其应用到基地大口径望远镜上并校正大气湍流时,则需要具备几千赫兹的校正频率。此外,液晶空间光调制器具有色散特性和对偏振光敏感的缺点,极大地限制了其在自适应光学系统中的应用<sup>[11]</sup>。

因基于介电润湿效应的液体空间光学调制器具有优良的自适应性、体积小、响应时间短和无机械可动部件等优点<sup>[12-13]</sup>,使得国内外学者尝试将其应用在自适应光学系统中。2012 年,Gopinath 等<sup>[14-15]</sup>设计了一种基于介电润湿效应的液体透镜/棱镜阵列,实现了波长为  $5\lambda$  波前误差的有效补偿,但该系统只能实时补偿曲率误差、倾斜误差或活塞误差这三种误差中的一种。2017 年,Ousati Ashtiani 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于介电润湿驱动的可调谐光学移相器,实现了相移为  $171^\circ$  的相位调制。2019 年,Wang 等<sup>[17]</sup>研制了一种基于介电润湿效应的光路可变调制器,该器件可以用来补偿成像系统的后焦距,实现了 1.15 mm 的光程变化。

本文设计一种介电润湿三液体透镜阵列,充分利用三液体透镜<sup>[18]</sup>具有双层液体分界面且每层液面可独立控制的优势,实现对多种不同类型波前误差的实时校正和补偿。首先仿真模拟三液体透镜中两个液体界面的面型,从而获得液体界面面型与工作电压的关系。然后根据系统引入的波前畸变(活塞误差、曲率误差和倾斜误差),并通过控制工作电压来改变液体界面的面型,从而实现活塞误差、曲率误差和倾斜误差的补偿和校正。最后对系统输出的波前分布和点扩展函数(PSF)分布进行分析与讨论。相关研究结果表明,设计的三液体透镜阵列有利于推动波前校正器件的应用和发展,也为三液体光学透镜阵列的实用化提供参考和依据。

## 2 结构设计与工作原理

设计的三液体透镜阵列由多个基于介电润湿效

应的三液体透镜子单元组成,而三液体透镜子单元呈蜂窝状排布,如图 1(a)所示,其中  $M$  为三液体透镜阵列的层数,每一层的透镜数量为  $6M$ 。每个三液体透镜子单元的直径均为 2 mm,高度均为 3 mm。腔体内壁上依次涂覆导电层、介电层和疏水层。为了实现上、下两层液体界面的独立控制,圆柱形腔体的中间部分均未涂覆导电层。填充液体 liquid 1、liquid 2 和 liquid 3 分别为 KCL/SDS 溶液、正十二烷( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_3$ )和 [EMIm][NTf2] 离子液体<sup>[19]</sup>,  $n_1$ 、 $n_2$  和  $n_3$  分别为各层液体的折射率。KCL/SDS 溶液为质量分数为 0.01% 的 KCL 和质量分数为 1% 的 SDS 的混合溶液。正十二烷是与导电液体不混溶的非导电液体。[EMIm][NTf2] 离子液体与正十二烷的折射率差值很小,说明其可以有效避免由液体界面  $S_2$  的曲率变化引起的误差。KCL/SDS 溶液与正十二烷的折射率差值较大,说明其可以产生足够的偏折角度来补偿倾斜误差。圆

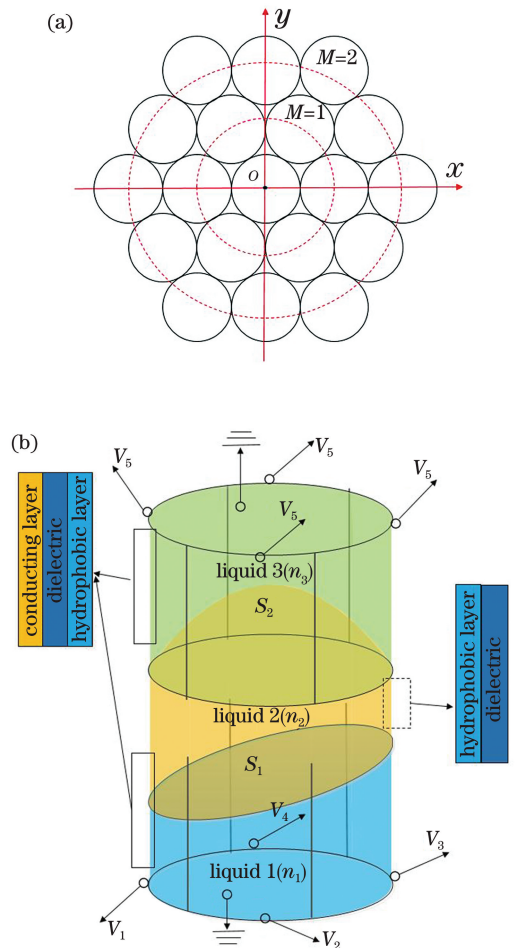


图 1 三液体透镜阵列的结构示意图。

(a) 阵列分布; (b) 子单元结构

Fig. 1 Schematic of structure of triple liquid lens array.

(a) Array distribution; (b) subunit structure

柱腔体上、下两部分的内部均由 1/4 圆弧状电极组成,彼此之间互相绝缘且不导电,液体界面  $S_1$  可以通过组合的工作电压( $V_1 \sim V_4$ )来控制。 $S_2$  可以通过工作电压  $V_5$  来控制,如图 1(b)所示。基于介电润湿效应的液体透镜和棱镜的结构和工作原理<sup>[20-22]</sup>,本课题组在前期已详细介绍,这里不再赘述。

图 2 为介电润湿三液体透镜阵列补偿畸变波前的工作过程。首先调整会聚透镜与成像面之间的距离来实现对曲率误差的校正,接着对三液体透镜阵列中的透镜子单元进行独立控制,可以实现对倾斜误差和活塞误差的补偿和校正。图 2(a)中每一条光线都是具有相同传播方向和相位的平面波,在像平面上,平面波相干叠加后形成 PSF。图 2(b)为三液体透镜子单元通过构造不同界面的面型来校正倾斜误差和活塞误差的原理。当对三液体透镜单元施加工作电压时,分别独立控制两个液体分界面的面型,使其形成具有不同倾斜角的平界面  $S_1$  和不同曲率的弯曲界面  $S_2$ 。首先控制工作电压,使得  $S_1$  界面为平界面,然后改变平界面  $S_1$  的倾斜角度,校正系统会因倾斜误差而导致光线偏折,表达式为

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \quad (1)$$

$$\alpha = \theta + \gamma_i, \quad (2)$$

$$\beta = \theta + \gamma_o, \quad (3)$$

式中: $\theta$  为平界面  $S_1$  与  $y$  轴的夹角; $\alpha$  和  $\beta$  分别为入射角和出射角; $\gamma_i$  和  $\gamma_o$  分别为入射光线和出射光线与  $z$  轴的夹角; $n_1$  和  $n_2$  为界面  $S_1$  和  $S_2$  的折射率。当  $\gamma_i = 0$  时,平行光线入射无倾斜误差;当

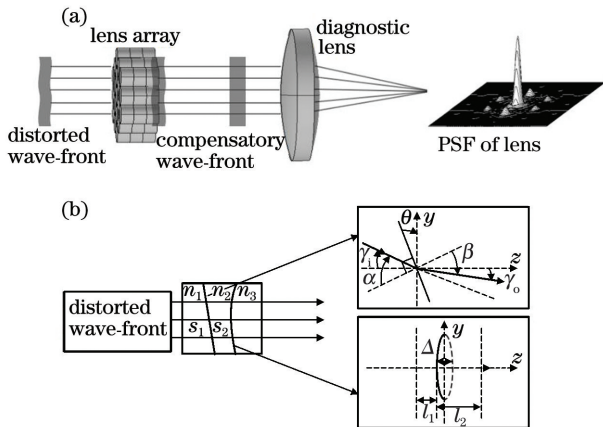


图 2 三液体透镜阵列波前畸变的补偿结构示意图。

(a) 系统示意图; (b) 子单元校正原理

Fig. 2 Schematic of compensation structure for wavefront distortion of triple liquid lens array. (a) System diagram; (b) principle of sub-unit correction

$\gamma_i \neq 0$  时,非平行光线入射存在倾斜误差。通过介电润湿效应可以实现对  $\theta$  的调整,使得夹角  $\gamma_i = 0$ 。当  $\gamma_i = 0$  时,说明由倾斜误差导致的光线偏折已被校正。

当界面  $S_2$  的曲率发生变化时,液体厚度  $l_1$  和  $l_2$  也随之改变,其中  $l_1$  和  $l_2$  是折射率分别为  $n_2$  和  $n_3$  的液体厚度。根据光程定义,得到光程  $O_{OP} = n_2 l_1 + n_3 l_2$ 。当界面  $S_2$  的顶点高度变化量为  $\Delta$  时,相应的光程变化量可表示为

$$O_{OPD} = [n_3(l_2 - \Delta) + n_2(l_1 + \Delta)] - (n_3 l_2 - n_2 l_1) = (n_2 - n_3)\Delta. \quad (4)$$

因为透镜内部的液体体积恒定,所以可以控制界面  $S_2$  的曲率来改变  $l_1$  和  $l_2$ 。当光束在通过透镜时,光程发生改变,从而产生不同的相位延迟来补偿活塞误差。

### 3 仿真建模与分析讨论

通过 COMSOL 仿真软件来构建基于介电润湿效应的三液体透镜模型,再现液体界面的面型随着工作电压的变化情况,分析不同的电压组合的上、下两层液体的界面形状,如图 3 所示,具体参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 参数的设置

Table 1 Parameters setting

Parameter	Value	Remark
$\theta_1 / (^\circ)$	134	Zero voltage contact angle ([EMIm][NTf2] & $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_3$ )
$\theta_2 / (^\circ)$	140	Zero voltage contact angle (KCL/SDS & $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_3$ )
$\gamma_1 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	0.011	Surface tension ([EMIm][NTf2] & $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_3$ )
$\gamma_2 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	0.069	Surface tension (KCL/SDS & $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_3$ )
$\epsilon$	2.650	Relative dielectric constant
$l$	1	Dielectric thickness

从图 3 可以看到,当施加特定的电压组合时,三液体透镜中两个界面分别为不同曲率的弯曲界面和不同倾斜角的平界面。当  $V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = 63.0 \text{ V}$  和  $V_5 = 25.5 \text{ V}$  时, $S_1$  和  $S_2$  均为与水平方向夹角为零的平界面,此时液体透镜单元对于系统引入的波前误差将不起到任何的补偿作用,如

图 3(a)所示。当  $V_1 = 57.0 \text{ V}$ 、 $V_2 = V_4 = 63.0 \text{ V}$ 、 $V_3 = 68.0 \text{ V}$  和  $V_5 = 18.0 \text{ V}$  时,  $S_1$  和  $S_2$  分别为倾斜平面和弯曲界面, 如图 3(b)所示。当  $V_1 = 68.0 \text{ V}$ 、 $V_2 = V_4 = 63.0 \text{ V}$ 、 $V_3 = 57.0 \text{ V}$  和  $V_5 = 32.0 \text{ V}$ ,  $S_1$  和  $S_2$  分别形成与图 3(b)对称互补的倾斜平面和弯曲界面, 如图 3(c)所示。根据上述介绍可知, 通过调整工作电压组合, 可以改变界面  $S_1$  的倾斜角度  $\theta$  和界面  $S_2$  的曲率, 从而实现对倾斜误

差和活塞误差的有效补偿。

根据上述面型数据, 在 ZEMAX 光学仿真软件中构建三液体透镜阵列, 并对其波前补偿特性进行分析。光学系统的波长为  $0.587 \mu\text{m}$ , 通光孔径为  $10 \text{ mm}$ 。表 3 为光学系统的结构参量, 其中 radius 为曲率半径, thickness 为各透镜间的间隔, glass 为玻璃材料, semi-diameter 为透镜的半口径, OBJ 为物平面, STO 为光阑面, IMA 为像平面。

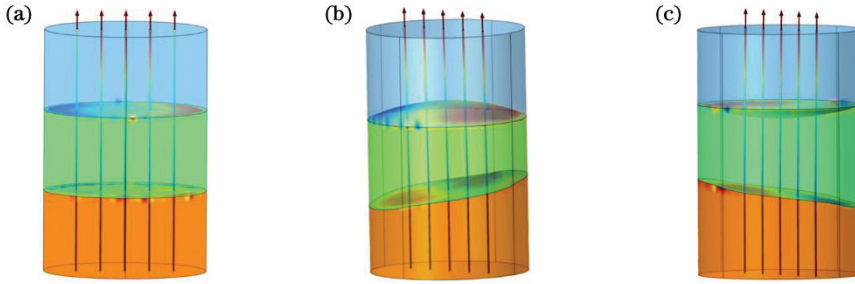


图 3 不同情况下三液体透镜单元界面的面型。(a)  $V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = 63.0 \text{ V}$  和  $V_5 = 25.5 \text{ V}$ ; (b)  $V_1 = 57.0 \text{ V}$ 、 $V_2 = V_4 = 63.0 \text{ V}$ 、 $V_3 = 68.0 \text{ V}$  和  $V_5 = 18.0 \text{ V}$ ; (c)  $V_1 = 68.0 \text{ V}$ 、 $V_2 = V_4 = 63.0 \text{ V}$ 、 $V_3 = 57.0 \text{ V}$  和  $V_5 = 32.0 \text{ V}$

Fig. 3 Surface shapes of triple liquid lens element interface under different conditions. (a)  $V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = 63.0 \text{ V}$  and  $V_5 = 25.5 \text{ V}$ ; (b)  $V_1 = 57.0 \text{ V}$ ,  $V_2 = V_4 = 63.0 \text{ V}$ ,  $V_3 = 68.0 \text{ V}$  and  $V_5 = 18.0 \text{ V}$ ; (c)  $V_1 = 68.0 \text{ V}$ ,  $V_2 = V_4 = 63.0 \text{ V}$ ,  $V_3 = 57.0 \text{ V}$  and  $V_5 = 32.0 \text{ V}$

表 2 液体参数的设置

Table 2 Liquid parameters setting

Liquid	Density/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Refractive dynamic index	Dynamic viscosity/[ $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ]
[EMIM][NTf2]	1380	1.4227	32.00
KCL/SDS	1000	1.3300	2.70
Dodecane	753	1.4206	1.36

表 3 系统的结构参量

Table 3 Structural parameters of system

Surface	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0
1	Zernike standard phase	Infinity	0		5
STO	Standard	Infinity	2.000		5
3	Non-sequential component	Infinity	—		5
4	Standard	Infinity	0		5
5	Standard	$-3.291 \times 10^{11}$	2.000	BK7	5
6	Standard	-7.752	15.017		5
IMA	Standard	Infinity	—		1

图 4 为经过三液体透镜阵列补偿前后的波前分布。从图 4(a)可以看到, 未经过补偿的波前有明显倾斜, 波前畸变误差主要是由倾斜误差引起的, 此处对应的峰谷(PV)值为  $1.838\lambda$ , 方均根(RMS)为

$0.424\lambda$ ; 经过三液体透镜阵列补偿后, 波前的 PV 则有效降低到  $0.285\lambda$ , RMS 也相应地减小到  $0.053\lambda$ 。从图 4(b)可以看到, 三液体透镜阵列可以实现对系统倾斜误差的有效补偿。

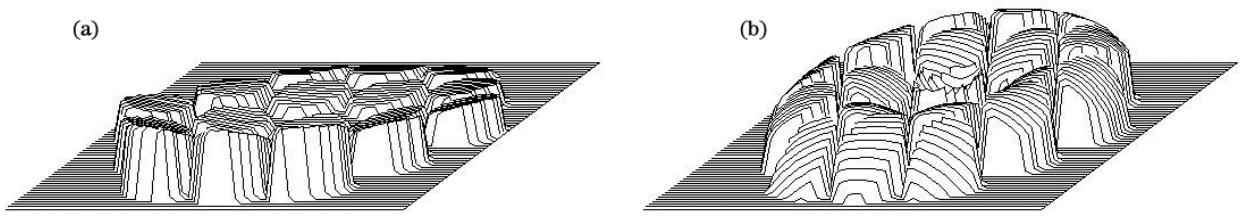


图 4 经过三液体透镜阵列补偿前后的波前分布。(a)补偿前;(b)补偿后

Fig. 4 Wavefront distribution before and after compensation by triple liquid lens array.

(a) Before compensation; (b) after compensation

图 5 为补偿前后系统像面 PSF 的分布情况。从图 5 可以看到,补偿前存在倾斜误差和离焦误差,这会导致系统能量分散,PSF 峰值低,输出的斯特

列尔比仅为 0.161;经过三液体透镜阵列补偿后,系统输出的 PSF 峰值明显提高,相应的斯特列尔比也提高到 0.917。

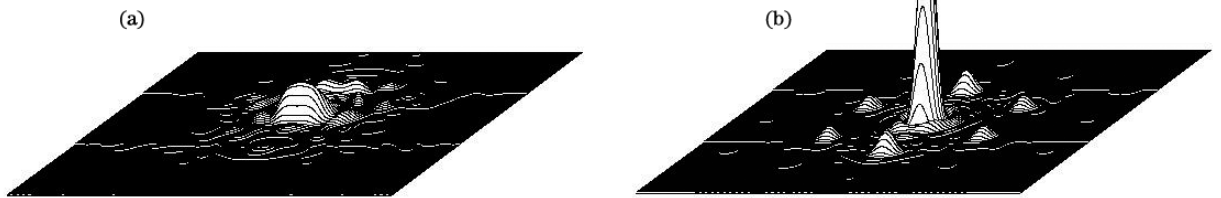


图 5 PSF 分布图。(a)补偿前;(b)补偿后

Fig. 5 Distribution of PSF. (a) Before compensation; (b) after compensation

## 4 结 论

设计一种基于介电润湿效应的三液体透镜阵列,并应用该阵列来补偿由活塞、倾斜和离焦引起的波前误差。构建三液体透镜子单元物理模型,模拟不同组合电压下三液体透镜界面的面型变化,并分析三液体透镜阵列的波前补偿特性。仿真结果表明,基于介电润湿效应的三液体透镜阵列可以有效补偿波前畸变误差。经过三液体透镜阵列补偿后,波前 PV 值由  $1.838\lambda$  减小到  $0.285\lambda$ ,RMS 值相应地从  $0.424\lambda$  减小到  $0.053\lambda$ ,而斯特列尔比则由 0.161 提高到 0.917。

## 参 考 文 献

[1] Zhang H T. Research of real-time wavefront reconstruction based on multi-core DSP [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.  
张浩田. 基于多核 DSP 的实时波前复原研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.

[2] Zhou R Z, Yan J X. Theory of adaptive optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996: 135.  
周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论[M]. 北京: 北京

理工大学出版社, 1996: 135.

[3] Cai D M, Yao J, Jiang W H. Performance of liquid-crystal spatial light modulator using for wave-front correction[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 285-291.  
蔡冬梅, 姚军, 姜文汉. 液晶空间光调制器用于波前校正的性能[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 285-291.

[4] Wei W, Hu X Y, Xie Y J. Aberration correction using MEMS-DM[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(5): 1163-1166.  
魏伟, 胡晓云, 谢永军. 利用可变形镜进行像差校正研究[J]. 光子学报, 2009, 38(5): 1163-1166.

[5] Ziph-Schatzberg L, Bifano T, Cornelissen S, et al. Secure optical communication system utilizing deformable MEMS mirrors[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7209: 72090C.

[6] Zhang H X, Zhang J, Qiao Y J, et al. Wavefront generation and error compensation by liquid crystal spatial light modulator[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2013, 24(5): 838-842.  
张洪鑫, 张健, 乔玉晶, 等. 液晶空间光调制器波前模拟及误差补偿[J]. 光电子·激光, 2013, 24(5): 838-842.

[7] Ke X Z, Han K N. Wavefront simulation and

- wavefront correction of liquid crystal spatial light modulator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 051403.
- 柯熙政, 韩柯娜. 液晶空间光调制器的波前模拟及波前校正 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 051403.
- [8] Wang Z H, Yu X. Measuring of the phase modulation of liquid crystal spatial light modulator and correcting of the wavefront [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(2): 196-199, 201.
- 王治华, 俞信. 液晶空间光调制器相位调制测量及波前校正 [J]. *光学技术*, 2005, 31(2): 196-199, 201.
- [9] Love G D. Wave-front correction and production of Zernike modes with a liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Applied Optics*, 1997, 36 (7): 1517-1520.
- [10] Liu Y J, Hu L F, Cao Z L, et al. A novel liquid crystal phase modulator for the optical imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(4): 527-530.
- 刘永军, 胡立发, 曹召良, 等. 一种用于光学成像系统的新型液晶相位调制器 [J]. *光学学报*, 2006, 26(4): 527-530.
- [11] Peng Z H, Cao Z L, Yao L S, et al. The review of liquid crystal wavefront corrector with fast response property [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2017, 47(8): 17-25.
- 彭增辉, 曹召良, 姚丽双, 等. 快速响应液晶波前校正器的研究进展 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47(8): 17-25.
- [12] 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.
- [13] Zohrabi M, Lim W Y, Cormack R H, et al. Lidar system with nonmechanical electrowetting-based wide-angle beam steering [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4404-4415.
- [14] Gopinath J T, Bright V M, Cogswell C C, et al. Simulation of electrowetting lens and prism arrays for wavefront compensation [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(27): 6618-6623.
- [15] Niederriter R D, Watson A M, Zahreddine R N, et al. Electrowetting lenses for compensating phase and curvature distortion in arrayed laser systems [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(14): 3172-3177.
- [16] Ousati Ashtiani A, Jiang H R. A liquid optical phase shifter with an embedded electrowetting actuator [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2017, 26(2): 305-307.
- [17] Wang Q H, Xiao L, Liu C, et al. Optofluidic variable optical path modulator [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 7082.
- [18] Zhao R, Ma J Q, Dang Z Y, et al. Design and analysis of an optical zoom system using electrowetting-based triple liquid lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(6): 0622005.
- 赵瑞, 马建权, 党智勇, 等. 基于介电润湿三液体透镜的变焦光学系统的设计与分析 [J]. *光子学报*, 2017, 46(6): 0622005.
- [19] Hu X D, Qu C, Zhang S G, et al. Variable focus ionic liquid lens based on electrowetting [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(2): 53-58.
- 胡晓东, 曲超, 张世国, 等. 电润湿离子液体变焦透镜 [J]. *光电工程*, 2012, 39(2): 53-58.
- [20] 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.
- [21] Yang L X, Zhao R, Kong M M, et al. Beam steering control of liquid prism array based on electrowetting-on-dielectric in three-dimensional space [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(16): 162201.
- 杨龙啸, 赵瑞, 孔梅梅, 等. 介电润湿液体棱镜阵列的三维空间光束指向控制 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(16): 162201.
- [22] Wang P. Optical design and performance analysis of the variable-focus optical system using electrowetting-based double liquid lens [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- 王评. 基于介电润湿技术液体透镜的变焦光学系统设计及性能分析 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.