

文章编号:1007-2780(2022)06-0687-07

高电阻浮置电极液晶透镜的仿真研究

黄志宇, 于涛*, 潘国彬, 陶婷婷, 张广翔
(大连海事大学理学院, 辽宁大连 116026)

摘要:设计了采用薄膜介质层分隔浮置电极与模式控制电极的液晶透镜,浮置电极与模式控制电极处于基板的同一侧,避免了浮置电极与模式控制电极处于基板两侧而需要采用薄型基板的限制。采用 Comsol Multiphysics 仿真软件仿真研究了浮置电极方块电阻和薄膜介质层厚度对液晶透镜波前误差的影响规律。对于直径 2 mm 的液晶透镜,当浮置电极方块电阻在 $150\ \Omega\cdot\Box^{-1}\sim 300\ \text{M}\Omega\cdot\Box^{-1}$ 间变化时,液晶透镜波前误差先减小后增大,在 $40\ \text{M}\Omega\cdot\Box^{-1}$ 时波前误差达到极小值。当介质层厚度在 50~5 000 nm 间变化时,液晶透镜波前误差最小的浮置电极方块电阻由 $50\ \text{M}\Omega\cdot\Box^{-1}$ 减小到 $2\ \text{M}\Omega\cdot\Box^{-1}$,最佳方块电阻参数呈现单调减小规律。取浮置电极方块电阻 $40\ \text{M}\Omega\cdot\Box^{-1}$ 和介质层厚度 250 nm 时,研究了液晶透镜的调焦特性和波前误差特性,当焦距在 250 mm 至无限远间变化时,589 nm 光波长下的波前均方根误差最大值为 $0.0412\ \mu\text{m}$,小于 $\lambda/14$,满足 Marechal 判据的要求。

关键词:浮置电极;液晶透镜;仿真;方块电阻;波前误差

中图分类号:O753⁺.2 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2022-0018

Simulation of high resistance floating electrode liquid crystal lens

HUANG Zhi-yu, YU Tao*, PAN Guo-bin, TAO Ting-ting, ZHANG Guang-xiang

(School of Science, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: A thin film dielectric layer was used to separate the floating electrode and the mode control electrode. The floating electrode and the mode control electrode were on the same side of the substrate, which avoided the restriction of using a thin substrate. Comsol Multiphysics software was used to simulate the influence of the square resistance of floating electrode and the thickness of thin film on the wavefront error of liquid crystal lens. For the liquid crystal lens with a diameter of 2 mm, when the square resistance of floating electrode varies from $150\ \Omega\cdot\Box^{-1}$ to $300\ \text{M}\Omega\cdot\Box^{-1}$, the wavefront error of liquid crystal lens decreases first and then increases, and reaches a minimum value at $40\ \text{M}\Omega\cdot\Box^{-1}$. When the thickness of the dielectric layer varies from 50 nm to 5 000 nm, the square resistance of the floating electrode with the smallest wavefront error decreases from $50\ \text{M}\Omega\cdot\Box^{-1}$ to $2\ \text{M}\Omega\cdot\Box^{-1}$, and the optimal square resistance parameters decrease monotonically. When the square resistance of floating electrode is $40\ \text{M}\Omega\cdot\Box^{-1}$ and the thickness of dielectric layer is 250 nm, the focusing characteristics and wavefront error characteristics of liquid crystal lens are studied. When the focal length varies from 250 mm to infinity, the maximum root mean square error of

收稿日期:2022-01-16;修订日期:2022-02-27.

基金项目:国家自然科学基金(No. 11404048);中央高校基本科研业务费(No. 3132016349)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 11404048); Fundamental Research Funds for the Central Universities(No. 3132016349)

*通信联系人, E-mail: yutao@dlmu.edu.cn

wavefront at 589 nm is $0.0412\ \mu\text{m}$, less than $\lambda/14$, which satisfy the Marechal criterion.

Key words: floating electrode; liquid crystal lens; simulation; square resistance; wavefront error

1 引言

液晶材料由于具有独特的电光特性,不仅在平板显示技术领域取得了巨大的成功,而且还在可控型光学器件中有着广泛的应用,目前已经研究开发了液晶透镜^[1]、液晶光栅^[2]、液晶空间光调制器^[3]、液晶调光膜^[4]和液晶全息光学器件^[5]等多种类型的可控光学器件。液晶透镜通过电压驱动在液晶层中产生不均匀的电场,使液晶分子发生不同角度偏转而形成折射率的梯度分布,实现透镜的调焦功能^[6-7],具有结构小巧、驱动电压低、焦距可调、功率消耗低等优点,在裸眼 3D 显示系统、VR/AR 眼镜中具有较大的应用价值^[8-9]。

传统的模式控制型液晶透镜在图案型通光孔区域涂覆一层透明高电阻薄膜,形成弱导电层 (Weakly Conductive Layer, WCL) 使透镜边缘到中心电压缓慢下降,达到通光孔内液晶指向矢倾角平滑变化的效果,相对圆孔电极型液晶透镜具有较低的驱动电压,但其折射率分布与理想的抛物线分布仍有较大的误差,像差特性有较大的改进空间^[10-11]。为了获得更低的波前误差,近年来 Galstian 等人通过增加一个不通电的低电阻 ITO 浮置电极,在模式控制型液晶透镜中引入额外的电阻抗,液晶透镜的波前误差降低到 0.08λ ^[12-13],但其浮置电极的基板厚度需要薄到 $100\ \mu\text{m}$ 的尺寸,在批量生产上会面临较大的破损问题;HSU 等人将 3 层 $0.55\ \text{mm}$ 厚的玻璃叠层组合成液晶透镜的一侧的基板,在通光孔内不同层的玻璃基板上制备一个低电阻 ITO 浮置环电极,所研究的液晶透镜具有良好的聚焦质量、低的波前误差和调整焦距时不需要改变驱动电压的频率等优点^[14],但三层玻璃基板精密对准叠层,增加了制作的复杂性和液晶透镜的厚度;Sova 等人仿真研究了附加低电阻 ITO 浮置电极和在模式控制电极中增加一个施加驱动电压的内环电极的液晶透镜结构,通过优化内环电极的驱动电压,可以显著降低液晶透镜的波前误差^[15],然而内环电极需要额外电压驱动,增加了驱动的复杂性。

本文在这些研究成果的启发下,提出了一种

新型的具有浮置电极的液晶透镜,在液晶透镜内部上玻璃基板上制作透明的高电阻浮置电极,在浮置电极上制作百纳米厚度的透明绝缘介质,在透明绝缘介质上制作传统的模式控制电极。浮置电极与模式控制电极间形成电阻电容耦合,以达到平滑液晶透镜内部电压分布,使液晶透镜的折射率分布与理想的抛物线分布间的误差减小,进而实现液晶透镜成像效果的提高。此设计采用了薄膜型的绝缘介质层,浮置电极与模式控制电极制作于基板的同一侧,对基板的厚度没有严格的尺寸要求,有利于提高制造过程中的良品率。

2 结构与理论建模

2.1 高电阻浮置电极液晶透镜的结构

所提出的透镜结构如图 1(a)所示,平行取向的液晶层夹在两个玻璃基板之间,下基板覆盖均匀透明电极 (ITO) 和 PI 取向层。在上基板的内表面制作高电阻透明浮置电极,在浮置电极上制作百纳米厚度的 SiO_2 介质绝缘层,在绝缘层上制

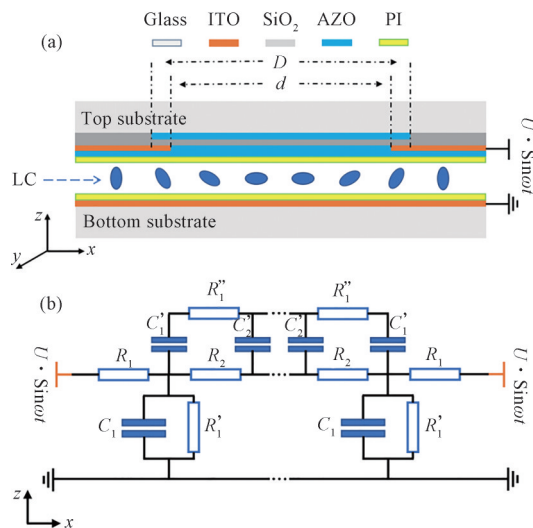


图 1 (a) 浮置电极液晶透镜的结构示意图; (b) 浮置电极液晶透镜电阻电容等效电路图。

Fig. 1 (a) Schematic diagram of floating electrode liquid crystal lens; (b) Capacitance equivalent circuit diagram of floating electrode liquid crystal lens resistor.

作传统的由低电阻圆孔电极和WCL构成的模式控制型液晶透镜的电极。浮置电极和WCL使用掺铝氧化锌(AZO)材料,通过Al离子掺杂浓度的变化实现AZO材料阻值的调控^[16]。模式控制型电极上面是PI取向层,通过取向处理使液晶层形成均一的平行取向。

相应的器件参数如下,浮置电极圆盘直径 D 为2.5 mm,低电阻的圆孔电极的直径 d 为2 mm, WCL方块电阻取为 $20 \text{ M}\Omega \cdot \square^{-1}$,液晶层厚度为 $40 \text{ }\mu\text{m}$,PI取向层厚度取为 100 nm 。为了仿真研究的方便,选用了物理参数研究较为全面的E7型液晶,其物理参数为 $\Delta\epsilon = 14.7$, $\epsilon_{\perp} = 5.1$, $k_{11} = 12 \text{ pN}$, $k_{22} = 9 \text{ pN}$, $k_{33} = 19.5 \text{ pN}$, $n_o = 1.528$, $\Delta n = 0.227$,电导率 $\sigma = 10^{-9} \text{ S/m}$,液晶预倾角取为 5° ,液晶分子在与基板的界面上采用强锚定的假设。通过考虑浮置电极层、WCL和液晶层形成一个分布式电阻电容电路如图1(b)所示,液晶层建模为并联的电容和高电阻模型,WCL和浮置电极建模为等效电阻模型,WCL与浮置电极之间建模为等效电容模型。

2.2 高电阻浮置电极液晶透镜的理论建模

本文采用Comsol Multiphysics仿真软件对高电阻浮置电极液晶透镜进行理论建模与仿真研究,详细的建模与仿真方法在Galstian的文献中有较为详细的论述^[12],本文仅作较为简略的介绍。为了降低模型的复杂程度,保证COMSOL软件中有限元计算的稳定性,并且考虑到液晶透镜的圆孔电极半径远大于液晶层厚度,液晶层中的电场横向分量远小于纵向分量,可以合理地忽略电场的横向分量。液晶材料采用连续体弹性理论进行建模,液晶的自由能密度函数形式如下:

$$f = f_{\text{elastic}} + f_{\text{electric}} = \frac{1}{2} \left\{ k_{11} [\nabla \cdot \vec{n}(r)]^2 + k_{22} [\vec{n}(r) \cdot \nabla \times \vec{n}(r)]^2 + k_{33} [\vec{n}(r) \times \nabla \times \vec{n}(r)]^2 \right\} - \frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{D}, \quad (1)$$

其中: f_{elastic} 是弹性能的贡献(K_{11} 、 K_{22} 、 K_{33} 分别为展曲、扭曲和弯曲常数), f_{electric} 是电场贡献($\vec{E}$ 为电场强度矢量, $\vec{D}$ 为电位移矢量)。为降低方程的非线性程度,使用单一弹性常数近似($K_{11} = K_{33} = K$),本文中 K 取 K_{11} 与 K_{33} 的平均值。由自由能的最

小化原理产生Euler-Lagrange二阶微分方程为公式(2):

$$\frac{d^2\theta}{dz^2} + \frac{\epsilon_0 \Delta\epsilon}{2K} \cdot \sin(2\theta) \cdot \left(\frac{dV}{dz} \right)^2 = 0, \quad (2)$$

其中 ϵ_0 为真空的介电常数, $\Delta\epsilon$ 为LC的介电各向异性, θ 为液晶指向矢倾角, V 为电势。

液晶层可被视为电容模型,在施加交流驱动信号时,可以引入位移电流的假设,位移电流与传导电流共同形成连续电流。电流密度满足公式(3):

$$\nabla \cdot (\vec{J}_c + \vec{J}_d) = 0, \quad (3)$$

其中: $\vec{J}_c = \sigma \vec{E}$ 为传导电流密度, $\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ 为位移电流密度。利用COMSOL软件中的参数型偏微分方程方法在液晶区域建立公式(2)的方程,并在全部区域添加电流场,在电极等各向同性的介质中,介电常数 ϵ 是常数,在液晶层中 ϵ 为二阶张量^[17]。采用COMSOL内置的求解器进行求解,得到液晶指向矢倾角分布。

在获得液晶指向矢的倾角分布后,液晶层内任意位置的有效折射率与该位置的液晶指向矢倾角的关系满足公式(4):

$$n_{\text{eff}}(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{(n_e \sin \theta)^2 + (n_o \cos \theta)^2}}, \quad (4)$$

式中: n_o 和 n_e 分别为液晶材料的寻常光折射率和非寻常光折射率, θ 为液晶指向矢倾角。液晶透镜的光程(O)可以根据公式(5)计算:

$$O = \int_0^h n_{\text{eff}}(\theta) ds, \quad (5)$$

式中 h 为液晶盒盒厚。

由于液晶材料的折射率一般在589 nm钠黄光波长下测得,因此计算时选取光源波长为589 nm,这一波长也是可见光波段成像研究的重要光谱线之一。具有抛物线光程分布的理想液晶透镜光程在透镜中心和透镜边缘与液晶透镜仿真获得的光程数值相同,由公式(6)表示:

$$O(r) = O_{\text{center}} - \frac{r^2}{2f}, \quad (6)$$

式中 O_{center} 为液晶透镜中心处的光程, f 为液晶透镜焦距, r 为考察点到液晶透镜中心的距离。

由公式(7)计算液晶透镜的光程与理想抛物线分布光程之间的均方根误差RMSOPD。

$$\text{RMSOPD} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - O_{\text{ideal}i})^2}, \quad (7)$$

式中: O_i 为第 i 个采样点处液晶透镜仿真得到的光程, $O_{\text{ideal}i}$ 为第 i 个采样点处理想抛物线光程分布的光程, N 为沿 r 坐标的采样点数量。液晶透镜的焦距 f 由公式(8)计算。

$$f = \frac{R^2}{2 \cdot \Delta n \cdot h}, \quad (8)$$

式中: R 为液晶透镜半径, Δn 为液晶透镜中心与边缘折射率差, h 为液晶层厚度。

3 仿真研究

3.1 浮置电极电阻对液晶透镜波前误差的影响

仿真研究中将绝缘层厚度设定为 250 nm, 浮置电极方块阻值为变量, 从 $150 \Omega \cdot \square^{-1}$ 增加到

$300 \text{ M}\Omega \cdot \square^{-1}$, 研究浮置电极方块电阻对液晶透镜的波前均方根误差的影响规律。参考文献的研究结果, 液晶透镜的波前误差会随着透镜焦距的减小而增大, 仿真研究的液晶透镜的焦距取为较短的 250 mm。对每一个选取的浮置电极的方块电阻值, 都通过调整驱动电压与驱动信号频率, 使液晶透镜的 RMSOPD 达到极小值。如图 2(a) 所示, 当浮置电极阻值太小时, RMSOPD 值较大, 波前均方根误差大于 $\lambda/14$, 不满足 Marechal 判据^[18], 像差较大。当浮置电极方块电阻增大时, RMSOPD 先减小后增大。当浮置电极方块电阻值为 $40 \text{ M}\Omega \cdot \square^{-1}$ 时, RMSOPD 值取极小值 $0.0412 \mu\text{m}$, 且波前均方根误差小于 $\lambda/14$, 满足 Marechal 判据。研究表明, 高方块电阻浮置电极能起到在薄绝缘层条件下降低液晶透镜波前误差的作用, 并且当方块电阻变化时, 波前误差存在极小值。

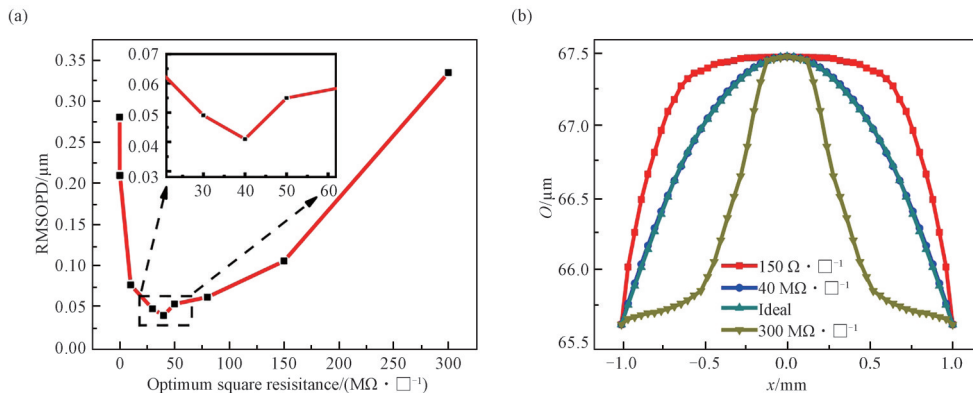


图2 (a) 浮置电极阻值变化的 RMSOPD; (b) 浮置电极不同阻值的光程分布曲线图。

Fig. 2 (a) RMSOPD for resistance change of floating electrode; (b) Optical path distribution curves of floating electrode with different resistance values.

由图 2(b) 中的浮置电极方块电阻分别为 $150 \Omega \cdot \square^{-1}$ 、 $40 \text{ M}\Omega \cdot \square^{-1}$ 和 $300 \text{ M}\Omega \cdot \square^{-1}$ 时的光程分布曲线可见, 当方块电阻为 $150 \Omega \cdot \square^{-1}$ 时, 浮置电极电阻较低, 浮置电极对 WCL 的分流作用较强, 液晶透镜中心相当大的区域液晶指向矢的倾角变化较小, 这一区域的光程变化也较小, 波前误差较大。当方块电阻为 $300 \text{ M}\Omega \cdot \square^{-1}$ 时, 浮置电极电阻较大, 浮置电极对 WCL 的分流作用较弱, 液晶透镜的光程分布接近于没有浮置电极时的模式控制型液晶透镜的结果。当方块电阻为 $40 \text{ M}\Omega \cdot \square^{-1}$ 时, 液晶透镜的光程分布与理想的抛物线形的光程分布几乎重合, 光程误差达到

极小值。

3.2 SiO_2 绝缘层厚度对浮置电极最佳电阻的影响

选取液晶透镜的焦距为 250 mm, 取不同的 SiO_2 绝缘层薄膜厚度, 从 50 nm 增加到 5 000 nm, 仿真研究不同绝缘层厚度液晶透镜达到最小波前均方根误差时的浮置电极方块电阻值。仿真研究的结果显示, 当绝缘膜厚度增加时, 最佳浮置电极方块电阻将会减小, 如图 3 所示。根据 R - C 电路原理, 当 SiO_2 绝缘层薄膜厚度较薄时, 浮置电极与 WCL 之间电容较大, 浮置电极方块电阻较大时会减小电容的分流效果, 有利于电压

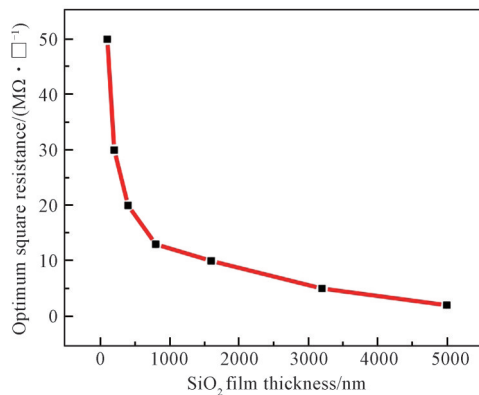


图3 浮置电极最佳方块电阻随薄膜介质层厚度变化曲线图

Fig.3 The best square resistance of floating electrode changing with film thickness of dielectric layer graph

平滑分布;当SiO₂绝缘层薄膜厚度较厚时,浮置电极与WCL之间电容较小,浮置电极电阻较小才能获得适当的电容分流效果。Galstian等人设计的透镜结构悬浮电极与WCL间隔玻璃厚度为100 μm,而悬浮电极材料为ITO,方块电阻为

150 Ω·□⁻¹[13],这一结果也验证了本文仿真结果的正确。考虑到较厚的绝缘层薄膜会产生较大的应力效应,影响薄膜的质量,较薄的薄膜会导致电击穿强度下降,并且更容易出现“针孔”。参考通常TFT栅极绝缘层的厚度取值,绝缘层厚度取250 nm左右较为合适。

3.3 浮置电极液晶透镜光学性能分析

根据上述的研究结果,确定了液晶透镜浮置电极方块电阻为40 MΩ·□⁻¹和SiO₂绝缘层薄膜厚度250 nm,仿真研究了液晶透镜调焦特性的波前误差。当驱动电压有效值为1.8 V,在3~8.5 kHz间连续改变驱动信号频率,焦距随频率变化曲线如图4(a)所示,随着驱动频率的增大,液晶透镜的焦距随之减少,可以实现焦距从250 mm到无穷远的连续平滑调节。如图4(b)所示,浮置电极液晶透镜不同焦距下的RMSOPD曲线图,随着透镜的焦距不断增加,透镜的RMSOPD从0.041 2 μm不断降低,都满足Marechal判据,具有良好的成像效果。

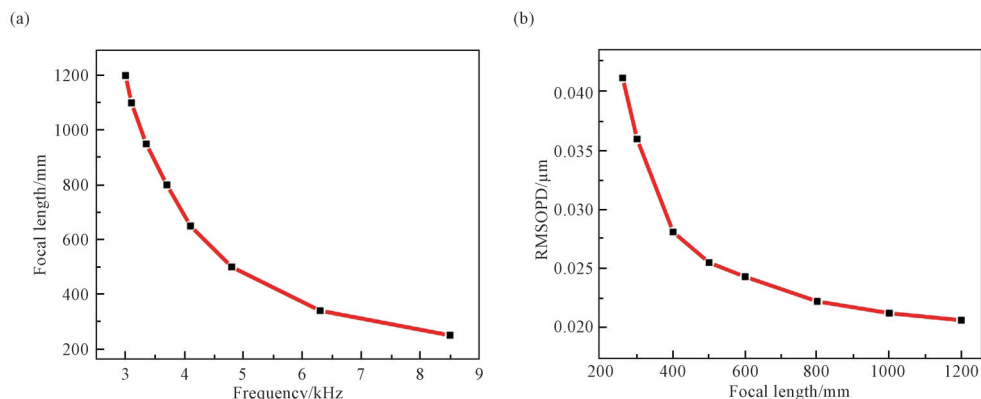


图4 (a)浮置电极液晶透镜焦距随频率变化曲线图;(b)浮置电极液晶透镜不同焦距下的RMSOPD。

Fig.4 (a) Focal length of floating electrode liquid crystal lens varies with frequency;(b) RMSOPD of floating electrode liquid crystal lens at different focal lengths.

4 结 论

本文设计了一种新型的高电阻浮置电极液晶透镜,得到了具有较宽调焦范围和较低波前误差的新型液晶透镜。该透镜结构采用高电阻的

浮置电极和薄膜介质层设计,避免了采用较薄基板的限制。研究表明,能够实现焦距变化范围从250 mm到无穷远,最大波前均方根误差小于 $\lambda/14$,透镜的光程分布与理想的抛物线分布误差较小,具有较好的成像效果。

参 考 文 献:

- [1] SATO S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1979, 18

- (9): 1679-1684.
- [2] CHEN J, BOS P J, VITHANA H, *et al.* An electro-optically controlled liquid crystal diffraction grating [J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(18): 2588-2590.
- [3] HU L F, XUAN L, LIU Y J, *et al.* Phase-only liquid-crystal spatial light modulator for wave-front correction with high precision [J]. *Optics Express*, 2004, 12(26): 6403-6409.
- [4] 邹呈, 高延子, 于美娜, 等. 液晶/高分子复合材料及其在反式电控调光膜中的应用研究进展[J]. *应用化学*, 2021, 38(10): 1213-1225.
- ZOU C, GAO Y Z, YU M N, *et al.* Recent advances in liquid crystal/polymer composites and their applications in reverse-mode electrically switchable light-transmittance controllable films [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1213-1225. (in Chinese)
- [5] 王丹, 彭海炎, 周兴平, 等. 全息高分子/液晶复合材料的研究进展[J]. *应用化学*, 2021, 38(10): 1268-1298.
- WANG D, PENG H Y, ZHOU X P, *et al.* Research progress of holographic polymer/liquid crystal composites [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1268-1298. (in Chinese)
- [6] JAMALI A, BRYANT D, ZHANG Y L, *et al.* Design of a large aperture tunable refractive Fresnel liquid crystal lens [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(7): B10-B19.
- [7] NOSE T, SATO S. A liquid crystal microlens obtained with a non-uniform electric field [J]. *Liquid Crystals*, 1989, 5(5): 1425-1433.
- [8] WANG Z, XU M, LV G Q, *et al.* Single frontal projection autostereoscopic three-dimensional display using a liquid crystal lens array [J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 1621-1630.
- [9] XIN Z W, WEI D, XIE X W, *et al.* Dual-polarized light-field imaging micro-system via a liquid-crystal microlens array for direct three-dimensional observation [J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4035-4049.
- [10] NAUMOV A F, LOKTEV M Y, GURALNIK I R, *et al.* Liquid-crystal adaptive lenses with modal control [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(13): 992-994.
- [11] YE M, WANG B, SATO S. Liquid-crystal lens with a focal length that is variable in a wide range [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(35): 6407-6412.
- [12] GALSTIAN T, ASATRYAN K, PRESNIAKOV V, *et al.* High optical quality electrically variable liquid crystal lens using an additional floating electrode [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(14): 3265-3268.
- [13] GALSTIAN T, SOVA O, ASATRYAN K, *et al.* Optical camera with liquid crystal autofocus lens [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 29945-29964.
- [14] HSU C J, AGRAHARI K, SELVARAJ P, *et al.* Modification of liquid crystal lens performance by embedded floating ring electrode [J]. *Optics Materials Express*, 2019, 9(8): 3226-3237.
- [15] SOVA O, GALSTIAN T. Liquid crystal lens with optimized wavefront across the entire clear aperture [J]. *Optics Communications*, 2019, 433: 290-296.
- [16] 王伟邳, 于涛, 巩伟兴, 等. 溶胶-凝胶法制备的用于模式控制型液晶透镜的 AZO 高电阻薄膜[J]. *液晶与显示*, 2020, 35(10): 1006-1011.
- WANG W Z, YU T, GONG W X, *et al.* Properties of AZO film prepared by sol-gel in liquid crystal lens with modal control [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(10): 1006-1011. (in Chinese)
- [17] 王谦, 何赛灵. 液晶指向矢分布的模拟和比较研究[J]. *物理学报*, 2001, 50(5): 926-932.
- WANG Q, HE S L. Simulation and comparison study of liquid crystal director distributions [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50(5): 926-932. (in Chinese)
- [18] 迟泽英, 陈文建. 应用光学与光学设计基础[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.
- CHI Z Y, CHEN W J. *Applied Optics and Elements of Optical Design* [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008. (in Chinese)

作者简介:



黄志宇(1996—),男,河南安阳人,硕士研究生,2019年于大连东软信息学院获得学士学位,主要从事光学与显示技术的研究。E-mail: xhuangzhiyu@163.com



于涛(1971—),男,黑龙江七台河人,博士,教授,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学与显示技术的研究。E-mail: yutao@dlmu.edu.cn