

方块电阻阶梯分布的模式控制液晶透镜的仿真

巩伟兴, 于涛, 王伟郅, 张嘉伦, 黄志宇

引用本文:

巩伟兴, 于涛, 王伟郅, 等. 方块电阻阶梯分布的模式控制液晶透镜的仿真[J]. 液晶与显示, 2020, 35(9): 908–913.

GONG Wei-xing, YU Tao, WANG Wei-zhi, et al. Simulation of modal control liquid crystal lens with step sheet resistance distribution[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(9): 908–913.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203509.0908>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

快速响应模式电极pi-cell液晶透镜的研究

Fast response modal electrode pi-cell liquid crystal lens

液晶与显示. 2019, 34(8): 739–747 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193408.0739>

异硫氰酸酯类化合物在混合液晶中的应用

Application of isothiocyanate compounds in liquid crystal mixtures

液晶与显示. 2015(2): 224–228 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153002.0224>

梯形凸起电极液晶变焦透镜

Tunable liquid crystal lens with raised trapezoidal electrodes

液晶与显示. 2018, 33(1): 30–37 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183301.0030>

基于液晶透镜的电控式光学影像缩放系统

Electrically tunable optical zoom system based on liquid crystal lenses

液晶与显示. 2015(3): 375–380 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153003.0375>

液晶偏振变焦透镜组合设计

Design of liquid crystal polarization zoom lens

液晶与显示. 2020, 35(7): 741–748 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203507.0741>

文章编号:1007-2780(2020)09-0908-06

方块电阻阶梯分布的模式控制液晶透镜的仿真

巩伟兴, 于涛*, 王伟郅, 张嘉伦, 黄志宇

(大连海事大学理学院, 辽宁大连 116026)

摘要:为了解决传统模式控制型液晶透镜折射率分布偏离理想抛物面的问题,提出了高阻层的方块电阻阶梯分布的模式控制液晶透镜的设计方案。采用模式控制型液晶透镜的电阻-电容等效电路模型,对该设计方案的液晶透镜折射率分布进行仿真研究。将方块电阻等距分为不同阶梯数量,计算了液晶透镜折射率分布与理想折射率分布的偏差,得到不同焦距情况下的最小分段数量。研究了方块电阻阶梯分布固定条件下,改变驱动电压和频率调节液晶透镜焦距时,液晶透镜折射率分布与理想分布的偏差,得到了液晶透镜焦距在 280 mm 至无穷远范围变化的方块电阻分布方式。

关键词:液晶透镜;调焦;分段方块电阻;仿真

中图分类号:O43;O753+.2 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/YJYXS20203509.0908

Simulation of modal control liquid crystal lens with step sheet resistance distribution

GONG Wei-xing, YU Tao*, WANG Wei-zhi, ZHANG Jia-lun, HUANG Zhi-yu

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

Abstract: In order to solve the problem that the refractive index distribution of the traditional modal-control liquid crystal lens deviates from the ideal parabola, a design scheme of a modal-control liquid crystal lens with a sheet resistance step distribution of a high-resistance layer is proposed. The resistance-capacitance equivalent circuit model of the modal-control liquid crystal lens is used to simulate the refractive index distribution of the liquid crystal lens of this design scheme. The sheet resistance is divided into equally different steps. The deviation between the refractive index distribution of the liquid crystal lens and the ideal refractive index distribution was calculated, and the minimum number of segments was obtained at different focal lengths. The deviation of the refractive index distribution of the liquid crystal lens from the ideal distribution when the driving voltage and frequency were used to adjust the focal length of the liquid crystal lens under a fixed condition of the sheet resistance step distribution was studied. The sheet resistance distribution of the liquid crystal lens with a focal length ranging from 280 mm to infinity was obtained.

Key words: liquid crystal lens; focusing; step sheet resistance; simulation

收稿日期:2020-01-19;修订日期:2020-03-18.

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

Support 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@dmlu.edu.cn

1 引言

液晶透镜通过在液晶层中形成梯度分布的电场,使液晶指向矢呈现出梯度分布,液晶的折射率也呈现梯度变化而形成梯度折射率透镜。形成梯度电场的方法主要有模式控制^[1]、球形电极^[2]、同心多环电极^[3-5]和带孔的电极^[6]等。模式控制液晶透镜在低电阻的圆孔电极上制作透明的高电阻薄膜,通过高电阻薄膜与液晶电容间电容降压作用,形成连续变化的梯度电场,从而形成梯度折射率分布。具有制作工艺简单、驱动电压低,成像质量较高的优点,具有较大的应用价值。

根据梯度折射率透镜的理论,液晶透镜的折射率分布符合抛物面分布,液晶透镜的像差较小,成像质量较高。文献[7]研究了传统的模式控制液晶透镜的折射率分布,发现其折射率分布偏离理想的抛物面分布,会产生较大的像差。在该研究中采用在模式控制电极基础上加浮动电极的方法,降低了透镜中心波前的平坦度,从而使折射率分布更接近于抛物面分布。这种方法不能在整个圆孔范围精确调节。

模式控制液晶透镜的高电阻薄膜的方块电阻以一定的规律渐变,将能实现液晶透镜折射率分布逼近抛物面分布。方块电阻的渐变可以利用透明氧化物半导体薄膜的紫外光电导特性^[8]实现,通过控制照射在高阻薄膜上的紫外光的光强分布,得到期望的方块电阻分布。如果把控制照射在高电阻薄膜上的紫外光强的变化设计为阶梯变化方式,能够降低紫外光照系统的复杂程度和成本,进而降低液晶透镜的成本,将有利于液晶透镜的推广应用。

本文提出了方块电阻阶梯分布的模式控制液晶透镜的设计,模式控制电极的方块电阻分段阶梯变化,从而使液晶透镜的折射率分布逼近抛物面分布。应用液晶连续体理论与液晶透镜电阻-电容等效电路相结合,仿真研究了不同分段时液晶透镜折射率分布与抛物面分布的偏差。并研究了分段数量对折射率逼近偏差的影响规律,寻找满足折射率偏差的较少的分段,为制作低像差、低成本液晶透镜提供理论依据。

当前喷墨打印技术制备微电子器件已在制备

TFT 等领域取得成功,具有制造成本低、器件设计灵活和节约材料的优点。通过喷墨打印的方式,将不同电阻率的高电阻材料以同心圆环的方式打印在模式控制液晶透镜的电极圆孔内,能够实现方块电阻的阶梯分布,可以获得结构简单和像差较小的液晶透镜。但这种液晶透镜的高电阻膜的方块电阻在制备后将保持固定,液晶透镜的焦距要通过调节驱动电压和驱动频率实现。研究在这一条件下,液晶透镜折射率分布与理想分布的偏差随焦距的变化规律,进而得出最佳调焦范围,对喷墨打印技术制备模式控制液晶透镜具有重要意义。

2 液晶透镜仿真模型

模式控制液晶透镜的结构如图1所示,涂覆有氧化铟锡(ITO)膜的上下玻璃基板。上基板为圆孔电极,直径为2 mm,其上分别为透明高电阻层以及聚酰亚胺取向层。下基板是公共电极,其上方是聚酰亚胺取向层,两基板之间夹有液晶层,液晶分子平行取向。液晶层厚度为25 μm ,为避免在液晶层中出现向错缺陷,液晶分子的初始预倾角取为较高的 9° 。

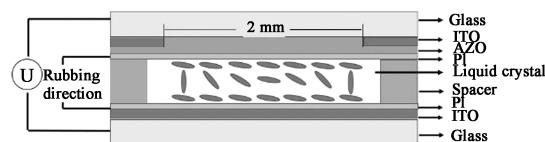


图1 液晶透镜结构

Fig.1 Liquid crystal lens structure

当液晶透镜施加电压时,高电阻层的电阻与液晶电容组成如图2的等效电路,外加驱动电压在液晶不同位置上的电场形成梯度分布,液晶分子的偏转角度随之梯度分布,液晶折射率形成梯度分布,形成梯度折射率透镜。在本文中,方块电阻阶梯分布可变的液晶透镜的仿真研究中,液晶透镜的驱动电压设定为10 V,驱动频率20 kHz;方块电阻阶梯分布固定的液晶透镜的仿真研究中,驱动电压幅值和频率随焦距变化。使用的液晶为E7液晶,参数^[9]如下: $\Delta\epsilon=14.07$, $\epsilon_{\perp}=5.21$, $K_{11}=11.1 \text{ pN}$, $K_{22}=5.9 \text{ pN}$, $K_{33}=17.1 \text{ pN}$, $n_o=1.741$, $\Delta n=0.22$ 。

结合液晶透镜电阻-电容等效模型和液晶连

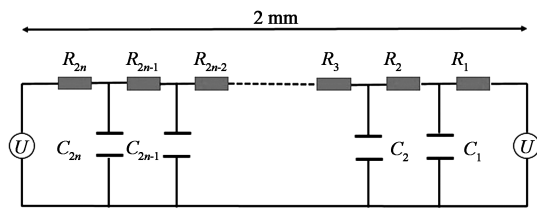


图 2 模式控制液晶透镜等效电路

Fig.2 Mode control liquid crystal lens equivalent circuit

续体理论计算电压分布,并用 MATLAB 编程进而得到折射率分布^[10],步骤如下:

(1)结合液晶材料参数计算不同电压下满足 Euler-Lagrange 方程的液晶指向矢排列、有效介电常数及非寻常光的光程。

(2)将半圆孔(1 mm)等距离分成 1 000 份,并将高阻材料的方块电阻等距离分成 N 个阶梯计算各个环的电阻,对应于 $R_1 \sim R_n$ 。

(3)当液晶透镜加电时,先将液晶的介电常数初始化为 $x(\epsilon_{\perp} < x < \epsilon_{\parallel})$ 。

(4)用平板电容公式计算出每个环状电极的电容,对应等效电路中的 $C_1 \sim C_n$ 。运用节点电压方法计算各个环上的电压值。

(5)根据式(1)中计算得出的有效介电常数与电压值的对应关系,用式(4)中得到的各个圆环电压值用插值的方法计算出该环处的液晶等效介电常数,带入式(4)中继续计算,迭代多次直到计算的电压值与前一次误差小于 0.1 mV 时,终止计算,得到各个环上的电压值,根据各个环上的电压值通过式(1)插值得出对应的光程分布。

通过光程分布由式(1)得到由圆孔中心到边缘的折射率分布:

$$n_{\text{eff}}(f) = \frac{L_{\text{op}}(r)}{d}, \quad (1)$$

其中 $L_{\text{op}}(r)$ 为圆孔内一点非寻常光的光程, d 为液晶层厚度, r 为距圆孔中心的距离。

3 优化液晶透镜折射率分布

3.1 方块电阻阶梯分布可变的液晶透镜的仿真

本文选取液晶透镜中心的等效折射率为预倾角 9° 时的等效折射率 1.734,液晶透镜焦距为理想抛物面的折射率分布方程为:

$$n(r) = 1.734 - \Delta n \times r^2, \quad (2)$$

其中 $n(r)$ 为折射率, r 为距圆孔中心的距离。 Δn 为圆孔边缘到中心折射率变化量。液晶透镜焦距计算公式为:

$$f = \frac{r^2}{2\Delta n d}, \quad (3)$$

其中: f 为焦距, r 为液晶透镜半径, Δn 为圆孔边缘到中心折射率变化量, d 为液晶层厚度。

仿真研究中,将圆孔的方块电阻分成 5, 6, 8, 9, 10, 20, 50, 100 个阶梯分别设定方块电阻初值,初值设定使得折射率分布接近理想抛物面分布,以各段方块电阻作为变量,构建折射率分布偏差平方和的函数,运用 MATLAB 中的 fminsearch 函数对构建的函数进行寻优,寻优过程中循环次数为 200 次时,得到其偏差平方和变化量小于 1×10^{-4} 。用该寻优结果得到的方块电阻分布计算液晶透镜的折射率分布,与理想折射率分布的进行对比,并计算最大折射率偏差。

根据工程光学理论,当波面最大光程差小于 $1/10\lambda$ 时可完善成像,选取波长为人眼最敏感波长 555 nm,得到本文中研究的液晶透镜对应的折射率最大偏差为 2×10^{-3} ,仿真研究中以此作为最大折射率偏差的标准。分别仿真计算了焦距为 400, 300, 200, 150, 100 mm 处的折射率误差与分段数量的变化规律如图 3(a)~(e)所示。由仿真结果可见,随着阶梯数量增加,折射率偏差将会降低,但当阶梯数量增加到某一数值后,折射率偏差的降低幅度将会减小,继续增加阶梯数量对折射率偏差的改善效果不明显。再结合上文给出的最大折射率偏差的标准,可以确定出不同焦距的最小阶梯数量,最小阶梯数量和相应的折射率偏差如表 1 所示。

表 1 不同焦距的最少阶梯数量

Tab.1 Minimum number of segments with different focal lengths

焦距/mm	最小阶梯数量	折射率最大偏差
400	10	1.17×10^{-4}
300	10	4.52×10^{-4}
200	10	1.02×10^{-3}
150	50	6.40×10^{-4}
100	100	5.42×10^{-4}

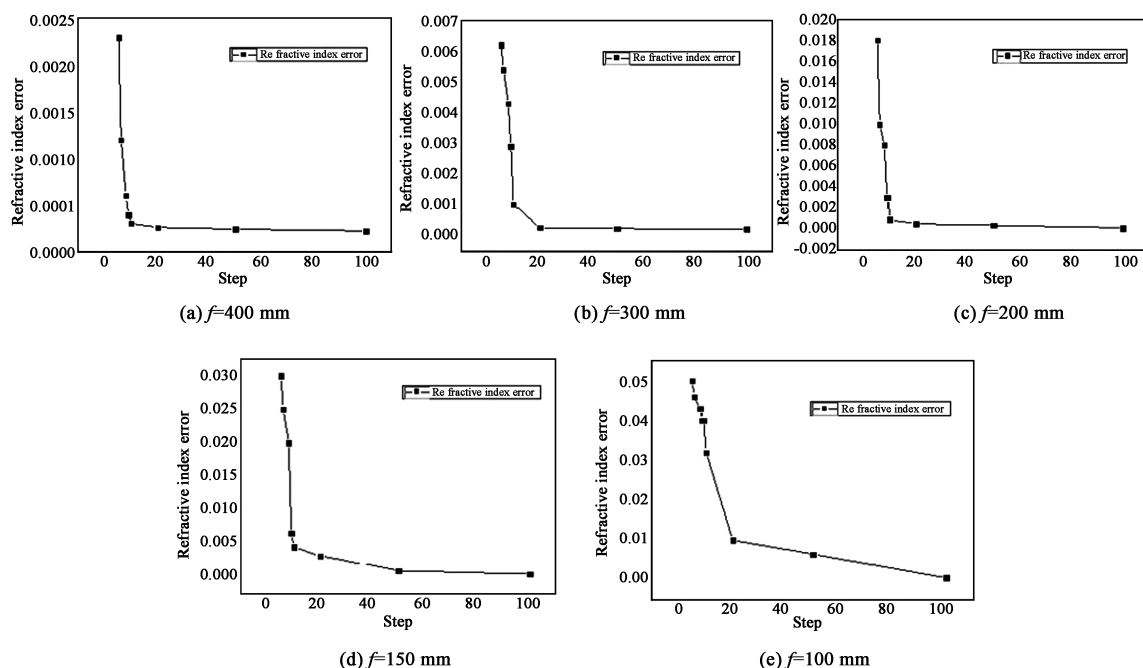


图3 不同焦距液晶透镜折射率偏差与阶梯数量的变化规律

Fig.3 Variation of refractive index deviation and number of steps of liquid crystal lenses with different focal lengths

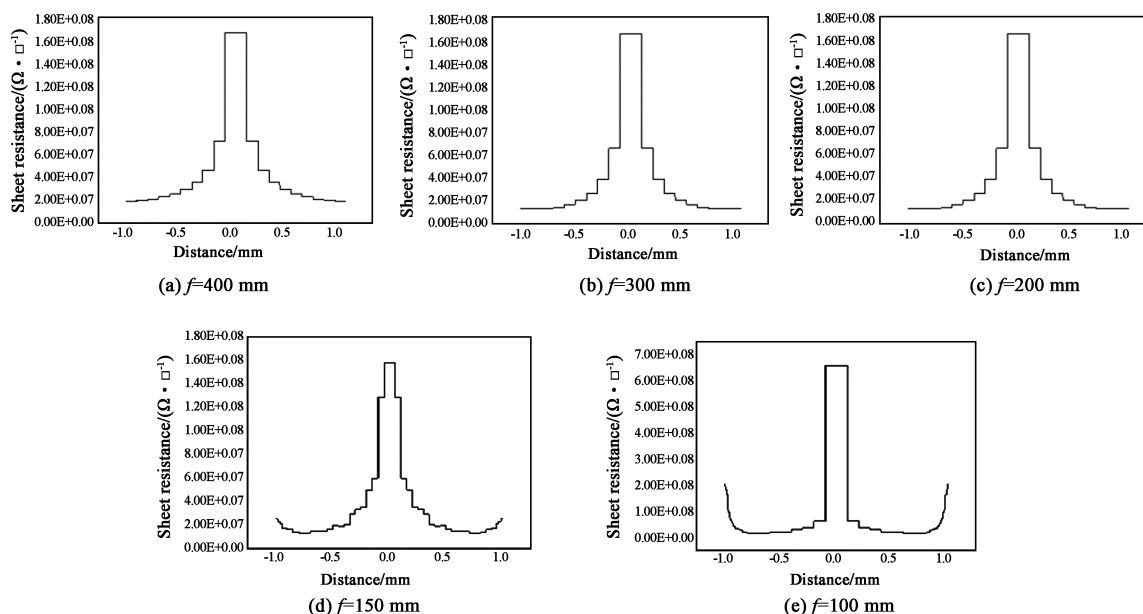


图4 不同焦距最少阶梯数量时的方块电阻分布

Fig.4 Sheet resistance distribution with minimum number of steps at different focal lengths

对应的方块电阻分布如图4(a)~(e)所示。由图4可以看出不同焦距情况下方块电阻分布差异较大,长焦距时,方块电阻从圆孔中心向外单调减小,短焦距时,变化规律转变为先降低然后小幅增大,方块电阻的调节方式随着焦距的变化而

变化。

3.2 方块电阻阶梯分布不变的液晶透镜的仿真

以前文仿真计算获得的对应不同焦距的最少阶梯数量的方块电阻分布为固定的方块电阻阶梯分布方式(图4(a)~(e)),改变液晶透镜的驱动

电压幅值和频率的方法调节液晶透镜的焦距,升高电压幅度和频率减小焦距,降低电压和频率增大焦距。分别仿真研究了不同方块电阻分布情况下焦距与折射率偏差的规律,仿真结果如图 5,满足最大折射率偏差的焦距调节范围如表 2 所示。从仿真结果可见随着最短焦距减小,调焦范围逐渐减小,当最短焦距小于 200 mm 时,液晶透镜的

调焦范围比较狭窄,在实际应用中会受到较大的限制。由表 2 可知,在图 4(b)方块电阻分布的情况下液晶透镜焦距能够在 280 mm 到无穷远范围变化,相应的折射率最大偏差小于 2×10^{-3} ,焦距调节范围较大,折射率分布误差较小。在用喷墨打印技术制备模式控制液晶透镜时应优先选用这一方块电阻分布。

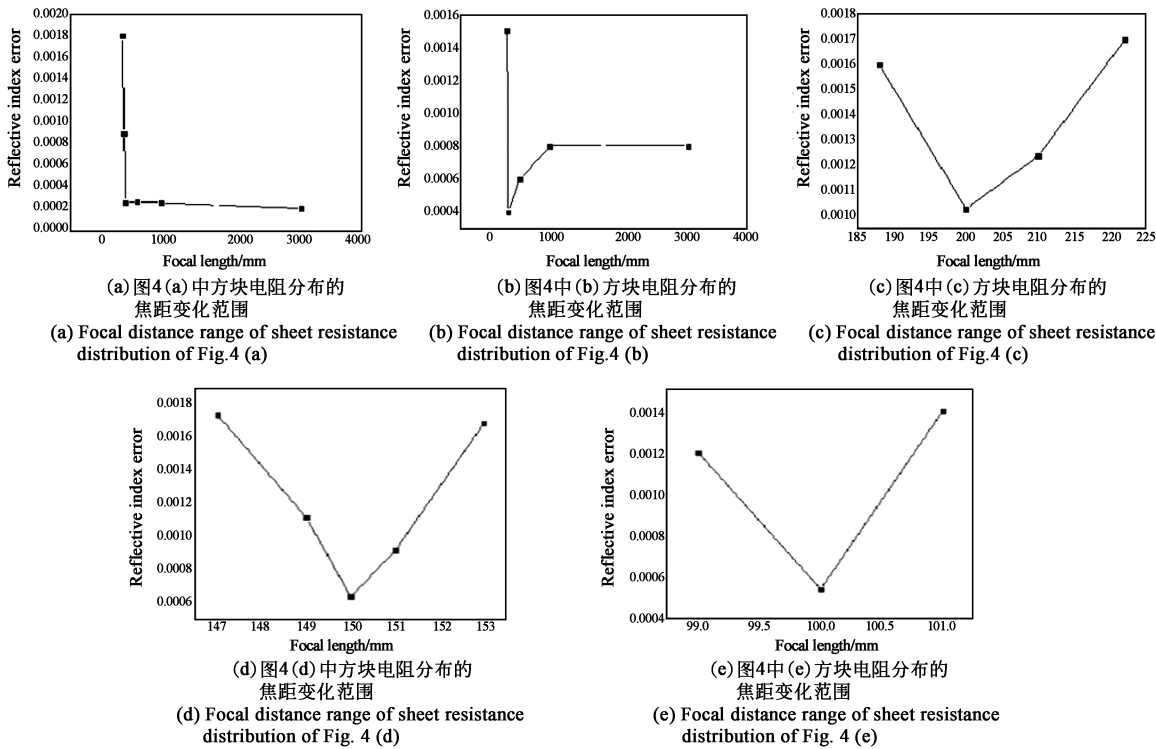


图 5 焦距与折射率偏差规律

Fig.5 Law of focal distance and refractive index deviation

表 2 焦距变化范围

Tab.2 Focal length change range

焦距/mm	焦距变化范围/mm
400	356~无穷远
300	280~无穷远
200	188~222
150	147~153
100	99~101

4 结 论

本文仿真研究了高电阻薄膜的方块电阻阶梯

分布的模式控制液晶透镜的折射率偏差与阶梯数量的变化规律。结果显示,焦距越短满足相同折射率偏差的阶梯数量越大。不同焦距都有一个最小阶梯数量,阶梯数量大于该数值时,折射率偏差变化缓慢,应用中对不同焦距采用这一最小的阶梯数量的方块电阻可简化控制系统的复杂性。在方块电阻阶梯分布保持固定条件下,满足折射率偏差标准的最短焦距较大时,最短焦距到无穷远能满足折射率偏差标准;最短焦距较小时,将会导致长焦距时的折射率偏差增大。采用焦距 300 mm 处的 10 个阶梯的方块电阻分布,能够实现液晶透镜焦距变化范围为 280 mm 至无穷远。研究结果可为喷墨打印技术制备模式控制液晶透镜提供借鉴。

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] WANG B, YE M, HONMA M, *et al.* Liquid crystal lens with spherical electrode [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41(11A): L1232.
- [3] LI L W, BRYANT D, VAN HEUGTEN T, *et al.* Physical limitations and fundamental factors affecting performance of liquid crystal tunable lenses with concentric electrode rings [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(9): 1978-1986.
- [4] LI L W, BRYANT D, BOS P J. Liquid crystal lens with concentric electrodes and inter-electrode resistors [J]. *Liquid Crystals Reviews*, 2014, 2(2): 130-154.
- [5] LI L W, BRYANT D, VAN HEUGTEN T, *et al.* Near-diffraction-limited tunable liquid crystal lens with simplified design [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(3): 035007.
- [6] 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.
- [7] SOVA O, GALSTIAN T. Liquid crystal lens with optimized wavefront across the entire clear aperture [J]. *Optics Communications*, 2019, 433: 290-296.
- [8] 李青,严静,胡凯,等.基于紫外光扫描光电导材料形成透镜像素的液晶透镜阵列:中国,201310113813.7[P].2014-05-14.
LI Q, YAN J, HU K, *et al.* Liquid crystal lens array based on ultraviolet lighting scanning photoconduction materials to form lens pixels: China, 201310113813.7 [P]. 2014-05-14. (in Chinese)
- [9] HSU C J, CHAO P C P, KAO Y Y. A thin multi-ring negative liquid crystal lens enabled by high- κ dielectric material [J]. *Microsystem Technologies*, 2011, 17(5/7): 923-929.
- [10] 肖奇,于涛,章波,等.快速响应模式电极 pi-cell 液晶透镜的研究[J].液晶与显示,2019,34(8):739-747.
XIAO Q, YU T, ZHANG B, *et al.* Fast response modal electrode pi-cell liquid crystal lens [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(8): 739-747. (in Chinese)

作者简介:



巩伟兴(1992—),男,黑龙江绥化人,硕士,2020年于大连海事大学获得硕士学位,主要从事光学与显示技术的研究。E-mail:936346555@qq.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.