液晶与显示
Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays
ESCI
Scopus
CSCD
美国《化学文摘》
英国《科学文摘》
《中文核心期刊要目总览》

电控梯度折射率液晶透镜研究进展

苏树钊, 姜海明, 夏宏燕, 申方成, 谢康

引用本文:
苏树钊,姜海明,夏宏燕,申方成,谢康. 电控梯度折射率液晶透镜研究进展[J]. 液晶与显示, 2022, 37(3): 310-341.
SU Shu-zhao,JIANG Hai-ming,XIA Hong-yan,SHEN Fang-cheng,XIE Kang. Research progress of electronically controlled gradient refractive index liquid crystal lens[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(3): 310-341.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0278

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

方块电阻阶梯分布的模式控制液晶透镜的仿真

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

液晶与显示. 2020, 35(9): 908-913 https://doi.org/10.37188/YJYXS20203509.0908

采用液晶透镜校正电润湿液体透镜调焦系统的单色像差

Correcting the monochromatic aberration of the electrowetting liquid lens focusing system using liquid crystal lens

液晶与显示. 2021, 36(7): 954-963 https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0345

液晶微透镜阵列研究进展

Research progress of liquid crystal microlens arrays

液晶与显示. 2020, 35(7): 749-761 https://doi.org/10.37188/YJYXS20203507.0749

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

基于大Δ*n*液晶材料的短焦距透镜阵列

Short focal length lens array based on liquid crystal material with large Δ*n*

液晶与显示. 2021, 36(4): 509-515 https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0288

文章编号:1007-2780(2022)03-0310-32

电控梯度折射率液晶透镜研究进展

苏树钊,姜海明*,夏宏燕,申方成,谢 康
(广东工业大学 机电工程学院,广东 广州 510006)

摘要:梯度折射率液晶透镜是一种可通过调控电场来改变其空间有效折射率分布来实现变焦的光学透镜。由于它具有焦距自由可调、结构紧凑、稳定性良好等优点,在光学透镜领域受到了广泛的关注。本文介绍了电控梯度折射率液晶透镜的基本工作原理,描述了 4 种电极类型的梯度折射率液晶透镜:边缘电场驱动的液晶透镜、离散多电极型液晶透镜、高阻层电极型液晶透镜、完整电极或无电极层液晶透镜。通过评价具有代表性的例子全面地展示液晶透镜的发展现状,读者可简单、清晰,直观地了解和掌握电控折射率液晶透镜的发展历程与未来方向,为进一步研究电控梯度折射率液晶透镜提供清晰的基础认知与参考方向。

关 键 词:电场控制;液晶;光学透镜;梯度折射率
中图分类号:O753^{+}.2 **文献标识码**:A **doi**:10.37188/CJLCD.2021-0278

Research progress of electronically controlled gradient refractive index liquid crystal lens

SU Shu-zhao, JIANG Hai-ming*, XIA Hong-yan,
SHEN Fang-cheng, XIE Kang

(*School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou* 510006, *China*)

Abstract: Electronically controlled gradient refractive index liquid crystal lens (EC-GRIN-LCL) is an optical lens that can change the distribution of its spatial refractive index to zoom in out by controlling the electric field. Due to the properties of variable focal length, compact structure and excellent stability, it has been attracting intensive attention in the field of optical lenses. This review introduces the basic working principle of EC-GRIN-LCL and describes four types of liquid crystal lenses driving strategies: (1) by edge electric field, (2) by discrete multi-electrode, (3) by electrode with high resistance layer, and (4) by complete electrode layer or no electrode layer. By introducing, concluding and commenting on the representative instances of the four types of EC-GRIN-LCL, this review aims to provide the readers with a clear basic knowledge, a comprehensive development history and tendency, and a reference for further research of EC-GRIN-LCL.

收稿日期:2021-11-03;**修订日期**:2022-01-12.
基金项目:国家自然科学基金(No.11874126);广东省自然科学基金(No.400180001)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No.11874126);Natural Science Foundation of Guangdong Province (No.400180001)
* 通信联系人,E-mail:hmjiang@gdut.edu.cn

Key words: electric field control; liquid crystal; optical lens; gradient index

1 引　　言

自然界中大多数的视觉动物通过调节眼部的晶状体形状来观察远或近物体以完成躲避、捕捉等动作[1]，可见眼部的“变焦系统”之重要性。自 1839 年法国画家达盖尔发明了第一台可携式照相机以来[2]，物体即可通过图像的方式记录下来。现代照相机想要保证拍摄远近物体的清晰度，透镜组必须具有变焦功能[3-6]。传统的光学变焦系统常包括变倍组、补偿组和前后固定组：变倍组通过位移调节焦距；补偿组负责补偿变倍组移动引起的像平面位置位移；前后固定组分别置于物方与像方，将物或像成像到指定的平面上以满足实际的应用环境[7]。由于大多数传统的光学变焦系统结构复杂以及医用内窥镜、手持移动设备、无人机等领域[8-13]对光学变焦系统的重量、体积以及稳定性的要求与日俱增，液晶变焦透镜以结构紧凑、体积小、重量轻等特点受到广泛关注。液晶具有光电各向异性，外加电场引发液晶指向矢空间指向变化，进而引起对特定入射偏振的相移或相位延迟量的改变[14]。基于上述原理，液晶透镜可作为光学变焦透镜来调节焦距。

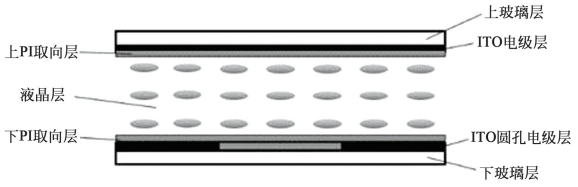
液晶变焦透镜相较其他新型变焦透镜[15-17]有一定的优势，如液体变焦透镜。液体变焦透镜依靠外部压力或温度改变液体表面的曲率实现变焦[18]，透镜材质与驱动方式容易受到重力、温度等因素影响。液晶作为透镜材质，不需改变其宏观形状或表面曲率，只需改变液晶分子的排列方式，因而重力对其几乎没影响。温度可改变液晶分子的通电响应时间和折射率[19-20]，这对液晶透镜的应用范围有所限制，对其温度补偿是一种有效的解决方法。

本文综述了 4 种电极布局的梯度折射率液晶透镜，它们分别由边缘电场、离散电极、高阻层电极、完整电极或无电极层驱动。阐述这 4 类液晶透镜的性能特征，通过一些典型的成果讨论所述技术方案的优缺点，据此分析梯度折射率液晶透镜在光学成像领域所面临的挑战与前景。

2 边缘电场驱动的液晶透镜

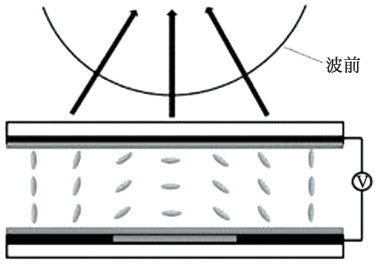
2.1 边缘电场液晶透镜的开端

1979 年，Sato 等人[21]制作了初期的电控液晶透镜，为以后液晶透镜的发展奠定了基础。1992 年，Nose 等人巧妙地利用圆孔电极在透镜空间内实现了梯度电场的分布，首次提出了电控梯度折射率液晶透镜的概念[22]。利用边缘电场驱动的液晶透镜主要由 4 部分组成[21]，如图 1(a)所示：(1)液晶透镜的上下玻璃衬底，为液晶透镜的载体；(2)上下玻璃衬底内侧有一层带氧化铟锡(Indium tin oxide, ITO)作为液晶透镜的驱动电极，它可以被刻蚀得到不同的图案；(3)ITO 表面覆盖着一层聚酰亚胺(Polyimide，PI)取向层以确定液晶分子的初始排列方向；(4)液晶层，液晶可分为正性液晶与负性液晶，正性液晶的平行介电常数大于垂直介电常数，当驱动电压大于阈值电压 U_{th} 且不断提高，液晶分子会逐渐平行于电场强度方向，阈值电压公式如式(1)[14]所示。



(a)结构示意图

(a) Schematic diagram of the structure



(b)工作原理示意图

(b) Schematic diagram of the working principle

图 1　边缘电场驱动的液晶透镜

Fig.1　Liquid crystal lens driven by edge electric field

$$U_{th}=\pi\sqrt{\frac{K_{11}+(K_{33}-2K_{22})/4}{\varepsilon_0\Delta\varepsilon}}\quad,\quad(1)$$

其中，K_{11}、K_{22}、K_{33} 分别为液晶分子在展曲、扭曲、弯曲状态下的弹性常数，ε_0 为真空中的介电常数，$\Delta\varepsilon$ 为液晶分子各向异性的相对介电常数。以正性液晶透镜为例，当液晶透镜处于非工作状态时，此时光线垂直于玻璃衬底入射在液晶层中感受到相同的有效折射率，出射光线不会发生折射；当液晶透镜处于工作状态时，如图 1(b)所示，液晶分子发生偏转，此时透镜中心到透镜边缘的有效折射率不再相同，光线发生折射。由图 2 的液晶材料折射率椭球可知，入射光的偏振方向与液晶分子的长轴成 90°夹角时，其感受到的折射率为 n_o，为寻常光折射率；入射光的偏振方向与液晶分子的长轴成 0°夹角时，其感受到的折射率为 n_e，为非寻常光折射率。其他情况时光感受到的有效折射率可由公式(2)[14]得到。

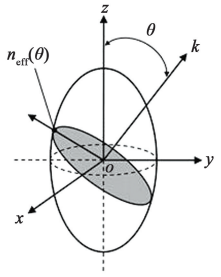


图 2 液晶材料折射率椭球

Fig.2 Refractive index ellipsoid of liquid crystal materials

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

给定入射平面波偏振方向与液晶起始取向方向平行，液晶透镜的有效折射率沿边缘到中心逐渐增大，入射光的相移量由透镜边缘到中心逐渐减少，形成图 1(b)所示的波前。光线的传播方向与波前面垂直，经液晶透镜后形成会聚光线，调节透镜中液晶分子的倾角可改变其焦距。相位延迟分布可由公式(3)[4]计算：

$$\Delta\varphi=\frac{2\pi d}{\lambda}[n_{eff}(\theta)-n_o] \quad , \quad (3)$$

焦距可由公式(4)[8]计算：

$$f=\frac{1}{\varphi}=\frac{r^2}{2d|n_c-n_b|} \quad , \quad (4)$$

其中，φ 为透镜的光焦度，r 为液晶透镜的孔半径，d 为液晶层的厚度，n_c 和 n_b 分别为透镜中央与边缘的有效折射率。设计的液晶透镜孔径为 250 μm，液晶层厚度为 50 μm，结构如图 1 所示。聚焦实验器件布置如图 3 所示，其中液晶透镜的摩擦取向方向平行于偏光片的透偏轴。以正性液晶作为透镜材料，驱动电压为 1 V_{rms} 时，其聚焦效果明显，焦距为 6 mm。偏光干涉实验布置如图 4 所示，液晶透镜前后两个偏振器的透偏轴方向正交，液晶透镜的取向方向与两个偏振器的透射轴方向成 45°夹角。偏光干涉实验使用的透镜的孔径为 450 μm，液晶层厚度为 50 μm。会聚偏振光干涉原理：一束单色自然光经起偏器后，形成单色偏振光，当单色偏振光入射处于工作状态的液晶透镜后，被分解为两束具有一定相位差并且相互正交的偏振光，然后经过检偏器，成为两束相干的偏振光，并在相遇区内产生干涉图形[7]。驱动电压分别为 0，1，2，25 V 时干涉条纹分布不均匀且对称性差，如图 5 所示。初期的梯度折射率液晶透镜[23-26]存在着高功耗与成像效果差等问题，需在以后的仿真测试与工艺制作中完善。作为梯度折射率液晶透镜的开端，它提供了全新的

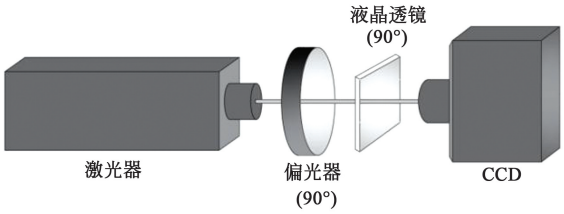


图 3 液晶透镜聚焦性能实验装置

Fig.3 Experiment setup for the focusing performance of liquid crystal lens

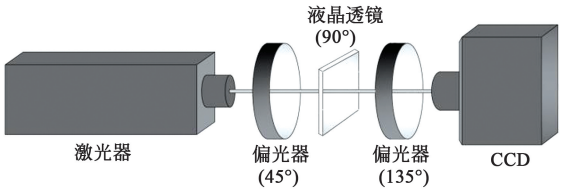


图 4 液晶透镜干涉表现实验装置

Fig.4 Experiment setup for the interference performance of liquid crystal lens

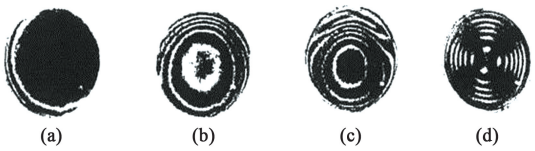


图 5 液晶透镜干涉条纹图样。(a)0 V；(b)1 V；(c)2 V；(d)25 V[22]。

Fig.5 Interference fringe pattern of liquid crystal lens. (a)0 V; (b)1 V; (c)2 V; (d)25 V[22].

液晶透镜工作原理。

2.2　双电场驱动液晶透镜

液晶层采用反向平行摩擦取向[27-28]，在工作状态时单圆孔电极型液晶透镜的圆孔电极边缘位置的液晶排列容易出现向错，如图 6 所示。向错是一种液晶分子排列缺陷，它降低了透镜空间内液晶指向矢分布的轴对称性，影响圆孔电极边缘处液晶分子倾角连续性。对于液晶透镜，向错会偏移成像位置和降低边缘画质。2004 年，为减缓液晶透镜的向错缺陷，Wang 等人提出了双电场液晶透镜[29]，结构如图 7 所示。

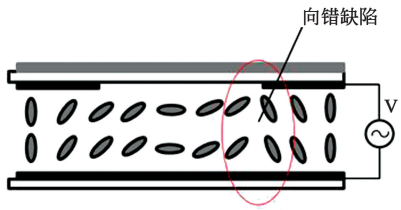


图 6　向错示意图

Fig.6　Schematic diagram of disclination

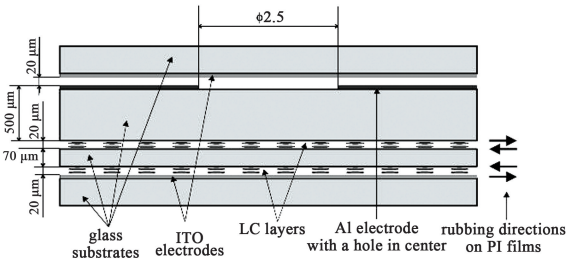


图 7　双电场驱动液晶透镜[29]

Fig.7　Liquid crystal lens driven by double electric fields[29]

双电场驱动液晶透镜增加了一层 ITO 电极，位置处于圆孔电极层的上方。上下 ITO 电极层形成基础电场，根据实际需求调节初始液晶排列以减缓圆孔电极边缘处的向错缺陷。圆孔电极层与下 ITO 层形成控制电场，实现对液晶透镜焦距的调节。实验中液晶透镜的孔径为 2.5 mm，液晶层厚度为 20 μm，基础电场的驱动电压保持在 150 V_{rms}，控制电场的驱动电压范围在 40～110 V_{rms}，焦距为 47.3 cm。

在其他条件不变时，液晶分子的响应时间 τ 随着液晶层的厚度增加而增加，如公式(5)[14]所示。

$$\tau=\frac{\gamma d^2/K\pi^2}{|(U/U_{th})^2-1|}\quad , \qquad (5)$$

其中，γ 为液晶材料的粘滞系数，K 为液晶材料的弹性常数，U 为施加的驱动电压，U_{th} 是由公式(1)计算得到的阈值电压。液晶层的厚度与透镜的光焦度关系由公式(4)得到。为保持透镜光焦度，该液晶透镜结构采用双液晶层，每层厚度为 20 μm，仿真得到液晶分子的聚焦响应时间小于 1 s，透镜恢复响应时间约为 150 ms。图 8 则说明了改进后的透镜在不同电压下有着连续且对称的相位延迟分布。

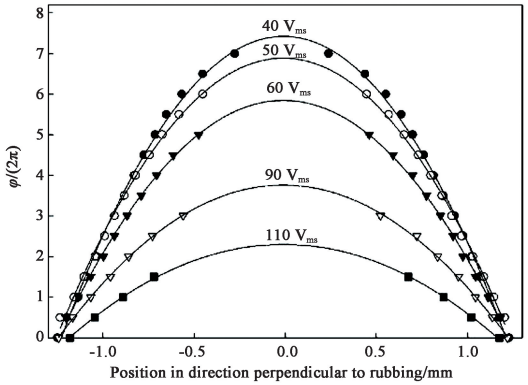


图 8　不同驱动电压下的相位延迟分布[29]

Fig.8　Distribution of phase delay at various voltages[29]

2.3　三电场驱动的液晶透镜

单个圆孔电极作为控制电极往往无法实现理想的相位延迟分布[30-32]。2011 年，Kawamura 等人在双电场驱动的液晶透镜的基础上添加了一层 ITO 电极[33]，结构如图 9 所示，第一个圆孔电极的孔径为 3.8 mm，第二个圆孔电极的孔径范围在 3.8～5.8 mm，液晶层共受 3 个电场的控制，电场的可调性更佳。从图 10 知调节 3 个电场的大小可实现不同的相位延迟分布，叠加电场可形成非球面的波前可有效降低像差。在第二个孔径为

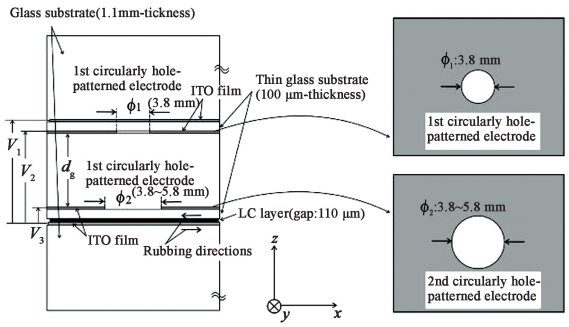


图 9　三电场驱动的液晶透镜[33]

Fig.9　Liquid crystal lens driven by three electric fields[33]

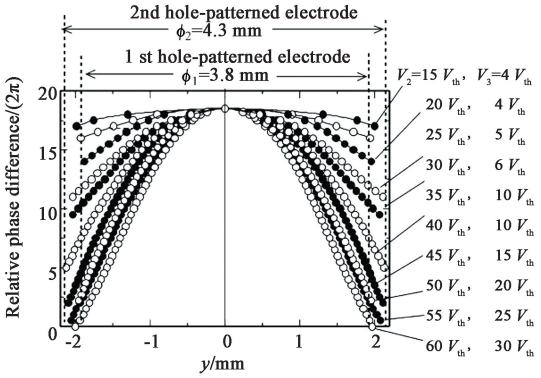


图 10 三电场形成的相位延迟分布[33]

Fig.10 Distribution of phase delay under three electric fields[33]

3.8 mm 时，实验测得透镜的最大光焦度可达 5.6 m^{-1}。

2.4 可调节正负液晶透镜

液晶透镜实现正负透镜切换的关键之处在于电极的布局，文献[34-35]等电极的布局较为复杂，工艺难度较大。2006 年，Wang 等人使用上述双电场驱动液晶透镜实现了正负焦距的快速调节[36]，如图 11 所示。透镜的孔径为 3 mm，液晶层的厚度为 75 μm。V_1 为圆孔控制电极与下 ITO 层的电势，V_2 为上下 ITO 层的电势。当 $V_1>V_2$ 时，透镜中心的有效折射率比边缘处的有效折射率大，液晶透镜为正透镜，同理可知 $V_1<V_2$ 时液晶透镜为负透镜。通过调节电压，液晶透镜的光焦度可从 −6.1 m^{-1} 到 4.6 m^{-1} 变化，结果如图 12 所示。

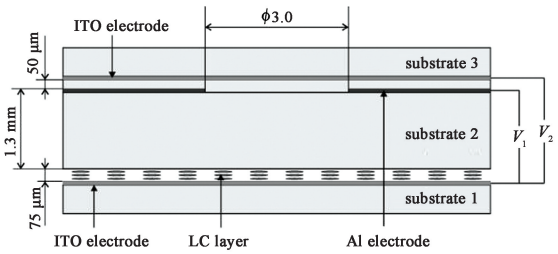


图 11 可调节正负焦距液晶透镜[36]

Fig.11 Liquid crystal lens with variable focal length from negative to positive values [36]

2.5 加入悬浮电极的液晶透镜

由前面几个例子可知，在保持光焦度的同时增大液晶透镜的孔径必须大幅提高驱动电压。液晶透镜的高介电层位于圆孔控制电极与液晶层之间，一般为玻璃材料，如图 13 所示，作用是调节边缘电场分布在整个孔径区域。高介电层增加了孔径中心附近的电场强度的垂直分量而减少了透镜中心与边缘的电势差，导致液晶透镜的光焦度的下降。另外，高介电层的加入会显著增加液晶透镜的工作电压。

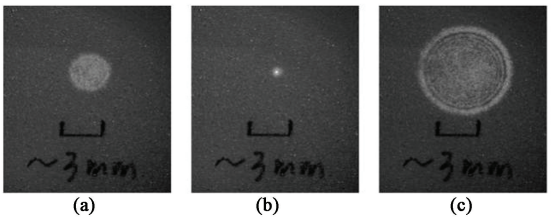
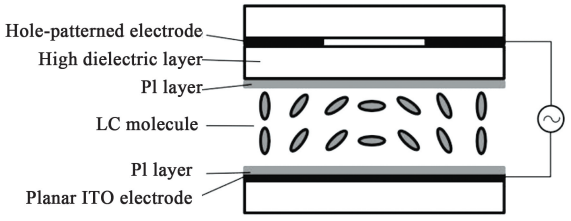


图 12 液晶透镜光聚焦测试。(a)$V_1=V_2$；(b)$V_1=35$ V_{rms}，$V_2=0$；(c)$V_1=0$，$V_2=60$ V_{rms}[36]。

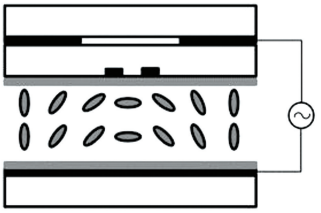
Fig.12 Light focusing test of liquid crystal lens. (a) $V_1=V_2$; (b)$V_1=35$ V_{rms}, $V_2=0$; (c)$V_1=0$, $V_2=60$ V_{rm}[36].

2016 年，Hsu 等人为解决加入高介电层后的缺陷，在高介电层与液晶层间的孔径区域内加入了悬浮圆环电极[37]，如图 13(b)所示。实验中液晶透镜的孔径大小为 6 mm，液晶层厚度为 125 μm，悬浮电极的外径与内径分别是 2 mm、1.95 mm。得到了在 40 V_{rms} 下焦距为 16.7 cm，响应时间为 18 s。分别使用了 4 组液晶透镜进行



(a)未加入悬浮电极的液晶透镜

(a) Liquid crystal lens without floating electrodes



(b)加入悬浮电极的液晶透镜

(b) Liquid crystal lens with floating electrodes

图 13 边缘电场驱动的液晶透镜

Fig.13 Liquid crystal lens driven by fringe electric field

比较，分别为“FREE LC lens(liquid crystal lens with floating ring-electrode-embedded)”：高介电层厚度为 0.55 mm 且加入悬浮圆环电极的液晶透镜、“REF LC lens(ring electrode-free liquid crystal lens)”：高介电厚度同为 0.55 mm 且未加入悬浮圆环电极的液晶透镜、“TDC LALC lens (liquid crystal lens with thick dielectric layer and large aperture)”：高介电层厚度为 1.25 mm 且未加入悬浮圆环电极的液晶透镜、“FREE LALC lens(liquid crystal lens with floating ring-electrode-embedded and large electrode)”：高介电层厚度为 0.55 mm 且加入悬浮圆环电极的液晶透镜。

从图 14 可以明显看出：施加的电压为 40 V 时，在相同高介电层厚度下加入悬浮圆环电极后其相位延迟分布更接近二次曲线，未加入悬浮圆环电极的液晶透镜的相位延迟分布则无法形成二次曲线分布。图 15 与图 16 说明加入了悬浮圆环电极的液晶透镜在实现高光焦度的同时降低了功耗。

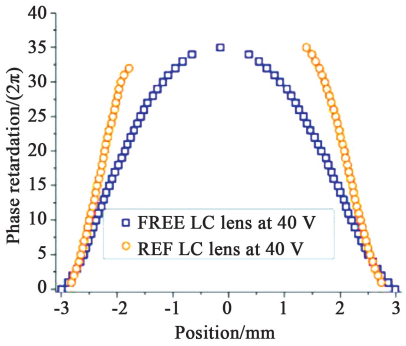


图 14　高介电层厚度为 0.55 mm 时有无悬浮电极的液晶透镜的相位延迟分布[37]

Fig.14　Distribution of phase retardation of FREE and REF LC lenses with a high dielectric layer thickness of 0.55 mm[37]

综上可知，悬浮电极有 3 个主要作用：(1)驱使边缘电场向透镜中心靠拢，防止边缘电场沿孔径方向外扩，最大化利用驱动电压以降低功耗。(2)悬浮电极的加入可以适当减少高介电层的厚度以降低功耗。(3)加入悬浮圆环电极后透镜中心的边缘电场强度的垂直分量减小，增大了透镜中心与边缘的折射率差从而提高了液晶透镜的光焦度。

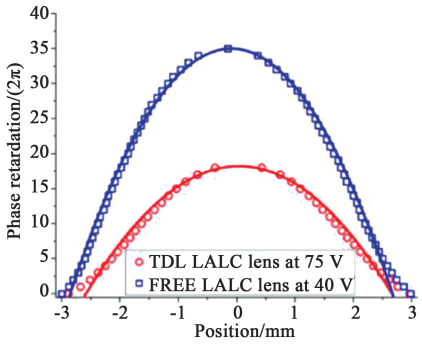


图 15　高介电层厚度为 0.55 mm 时有悬浮圆环电极的液晶透镜与高介电层厚度为 1.25 mm 时无悬浮圆环电极的液晶透镜的相位延迟分布[37]

Fig.15　Distribution of phase retardation of FREE LC lens with high dielectric layer thickness of 0.55 mm and TDL LC lens with high dielectric layer thickness of 1.25 mm[37]

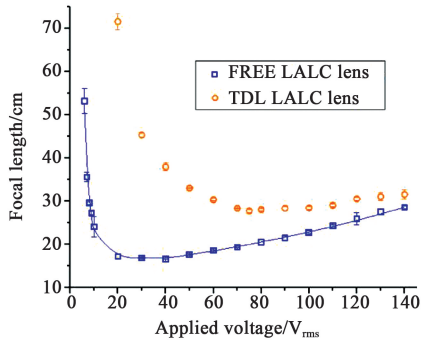


图 16　具有悬浮电极的液晶透镜与厚高介电层液晶透镜的焦距随驱动电压分布[37]

Fig.16　Focal length of FREE LALC lens and TDL LALC lens as a function of driving voltage[37]

2.6　添加固定焦距层的液晶透镜

除了通过完善驱动电极的形状与布局来提高液晶透镜的综合性能，还可通过添加固定分子排列的液晶层来实现。文献[38-40]通过添加固定焦距层得到了大光焦度的液晶透镜，以文献[40]为例阐述该方法。图 17 为液晶透镜的结构图。

液晶分子固定排列层的制作方法：在预设的电场下，使用 25 mW/cm^2 的紫外光照射以一定的比例调配液晶与链状聚合物，得到固定排列状态的液晶分子。液晶透镜的孔径为 1.68 mm，液晶层的厚度为 25 μm。此液晶透镜的焦距由两部分提供：一为液晶与链状聚合物组成的固定焦距层，

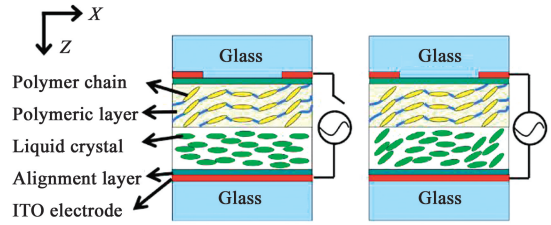


图 17 具有固定焦距层的液晶透镜结构[40]

Fig.17 Liquid crystal lens structure with fixed focal length layer[40]

焦距为 8.82 cm；二为电控焦距可变的液晶层。实验将液晶透镜与相机的镜头结合，观察组合镜头的成像表现：驱动电压分别为 15 V_{rms} 和 35 V_{rms} 时，观察物距分别为 200 cm 和 17 cm 的物体，成像如图 18 所示。

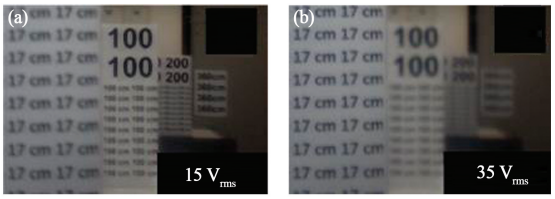


图 18 电压为 15 V_{rms}(a)和 35 V_{rms}(b)时组合镜头成像表现[40]

Fig.18 Imaging performance of combined lens when the voltage is 15 V_{rms}(a) and 35 V_{rms}(b)[40]

液晶透镜的加入可以辅助主镜头调焦，但从成像画面中可看出画面的透过率较低。可能原因有二：一是液晶层对光线的散射，二是混合层与液晶层之间的弱液晶取向导致的光线散射，优化混合层中的液晶浓度可以增强其对液晶层的对准能力以减少散射现象。

2.7 nano-PDLC 偏振无关透镜

在上述液晶透镜中，需要搭配偏光器来实现聚焦光束的目的，使用偏光器会降低液晶透镜的透射率。为了提高液晶透镜的透射率以投入更多领域应用，研究偏振无关的液晶透镜很有必要。在 2005 年，Ren 等人使用纳米级别的聚合物分散液晶(nano-polymer dispersed liquid crystal，nano-PDLC)成功制作出偏振无关的液晶透镜[41]。nano-PDLC 相比传统的 PDLC 具有以下优点：(1)nano-PDLC 的液滴小于可见光的波长，几乎可抑制入射光的散射；(2)液晶液滴方位角随机指向，但其倾角在电场中可随位置变化，这是 nano-PDLC 可实现对光的偏振无关化的关键。(3)液晶响应时间短。对比传统的 PDLC，nano-PDLC 也有其局限性：(1)由于液晶液滴为纳米级别，需要高电压驱动；(2)由于 nano-PDLC 中的液晶浓度低(一般低于 35%)与随机方位角的液滴分布，造成入射光的相移量较小，调焦能力弱。nano-PDLC 制作的液晶透镜可实现偏振无关的原理如下。

由于液晶液滴在电场下方位角随机分布且倾角随位置变化，任意的非偏振光可表示成一对正交线偏振光组合，则入射光与出射光可由公式(6)[1]表示：

$$E_{out}(r,t)=t_{lens}(r)\cdot E_{in}(r,t)=\sum_i [t_{lens}(r)]\cdot [U_i(r,t)\cdot (A_{x,i}(r,t)\cdot x+A_{y,i}(r,t)\cdot y)]\ , \tag{6}$$

其中，t 为时间，$t_{lens}(r)$为光学介质的相位传递函数，$A_{x,i}(r,t)\cdot x+A_{y,i}(r,t)\cdot y$ 表示两个任意的正交线偏振光的组合，$U_i(r,t)$表示在时间 t 的一个入射在光学介质正前方且坐标为(x,y)(其中，$r^2=x^2+y^2$)平面的复数场。

2013 年，Kun 等人利用边缘电场，使用 nano-PDLC 成功制作出偏振无关的液晶透镜[42]。样品调配完成后需在波长为 532 nm 和光强为 24 mW/cm^{2}的激光光束下 50 s，得到孔径为 6 mm，液晶层厚度为 30 μm 的液晶透镜。由于有聚合物的存在，基于 nano-PDLC 制作的液晶透镜的焦距计算如下[42]：

$$n_1=\frac{v_{LC}\left(\frac{2n_{od}(V=0)+n_{ed}(V=0)}{3}\right)+v_p n_p}{v_{LC}+v_p}, \tag{7}$$

其中，n_1 为透镜中央的有效折射率，v_{LC}和 v_p 分别为液晶与聚合物的体积分数，n_{ed}和 n_{od}分别为液晶液滴在电场中的非寻常光折射率和寻常光折射率，n_p 为聚合物的折射率。考虑到液晶液滴的光轴是随机分布的，n_{ed}和 n_{od}由以下公式计算：

$$n_{ed}(S_d)=\frac{n_o n_e}{\sqrt{n_e^2+\frac{1}{3}(n_o^2-n_e^2)(2S_d+1)}}\ , \tag{8}$$

$$n_{od}(S_d)\approx\frac{2}{\pi}n_o F\left[\frac{\pi}{2},m(S_d)\right], \tag{9}$$

其中，$F\left[\frac{\pi}{2},m\right]$为第一类完全椭圆积分。

$$m(S_d)=\frac{1}{n_e}\sqrt{\frac{2}{3}(n_e^2-n_o^2)(1-S_d)}\ , \tag{10}$$

$$S_d=1-(1-S_{do})\exp(-V/V_d)\ , \tag{11}$$

其中，S_d 为液滴参数，V_d 为样品有关的电压参数，$S_{do}=0.4$。

$$\bar{n}=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}n(\alpha,\beta)\mathrm{d}\alpha\ , \tag{12}$$

其中，$\bar{n}$ 为透镜任意位置的有效折射率，设定 n_2 为边缘有效折射率，β 为液晶指向矢长轴与电强度方向的夹角，α 为液晶指向矢的方位角。

$$n(\alpha,\beta)=\frac{n_{os}n_e\beta}{\sqrt{n_{os}^2\sin^2\alpha+n_e^2\beta^2\ \cos\alpha}}\ , \tag{13}$$

$$n_e(\beta)=\frac{n_{os}n_{es}}{\sqrt{n_{os}^2\sin^2\beta+n_{es}^2\cos^2\beta}}\ , \tag{14}$$

其中，$\cos^2(\beta)=\frac{1}{3}[2S_f+1]$，其中 S_f 为电场相关的样本顺序参数。

$$S_f=\frac{1}{4}+\frac{3(e^2+1)}{16e^2}+\frac{3(3e^2+1)(e^2-1)}{32e^2}\ln\left|\frac{(e+1)}{(e-1)}\right|, \tag{15}$$

其中，

$$e=\left(\frac{R_{eff}}{\zeta}\sqrt{\frac{3v_{LC}\varepsilon_p}{\varepsilon_{LC}+2\varepsilon_p-v_{LC}(\varepsilon_{LC}-\varepsilon_p)}\frac{\Delta\varepsilon}{K}}\right)E\ , \tag{16}$$

其中，ε_{LC} 和 ε_p 是液晶与聚合物的介电常数，R_{eff} 为液晶液滴的有效半径，ζ 为与液晶液滴椭圆度有关的参数。

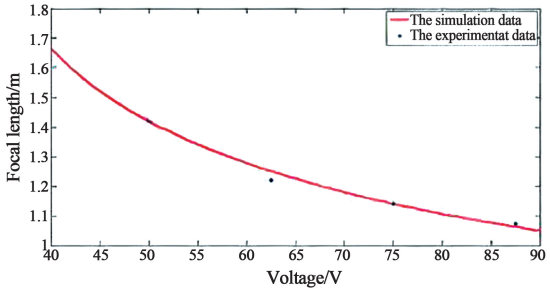
$$\varepsilon_{LC}=\varepsilon_\perp+\frac{1}{3}\Delta\varepsilon(1+2SS_dS_f)\ , \tag{17}$$

$$\begin{cases}n_{os}=\dfrac{v_{LC}n_{od}+v_pn_p}{v_{LC}+v_p}\\ n_{es}=\dfrac{v_{LC}n_{ed}+v_pn_p}{v_{LC}}\end{cases}, \tag{18}$$

其中，n_{os} 与 n_{es} 分别为 PDLC 层的寻常光折射率与非寻常光折射率。焦距计算与相位延迟如公式(19)所示。

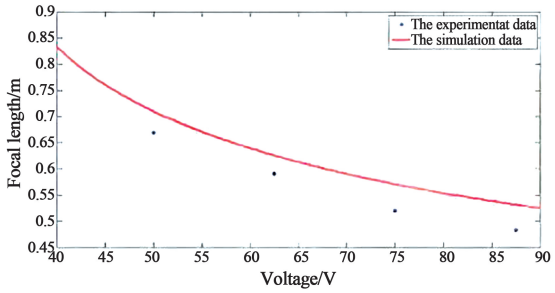
$$\begin{cases}f=\dfrac{r_0^2}{2d(n_1-n_2)}\\ \Delta\varphi=\dfrac{2\pi}{\lambda}d(\bar{n}-n_1)\end{cases}. \tag{19}$$

使用波长为 632.8 nm 的非偏振光进行单液晶透镜与双液晶透镜光聚焦实验，得到图 19。



(a)单液晶透镜

(a) Single liquid crystal lens



(b)双液晶透镜

(b) Double liquid crystal lens

图 19　Nano-PDLC 透镜的焦距随施加的电压分布[42]

Fig.19　Distribution of focal length of nano-PDLC lens as a function of the applied voltage[42]

由于 nano-PDLC 材料的低相位调制能力，透镜以较高的功耗获得较低的光焦度，测得单 nano-PDLC 透镜与双 nano-PDLC 透镜的最小焦距分别为 1 073 mm 与 484 mm，透镜响应时间低于 1 ms，所需驱动电压为 90 V_{rms}。nano-PDLC 透镜的偏振无关特性可减少透镜组件的重量与体积，但过高的功耗使其不适用于移动便携设备上，适用于辅助光学系统成像等对光焦度与功耗要求不高的场合。

2.8　双正交液晶层偏振无关透镜

2003 年，Ye 等人提出了一种双液晶层偏振无关透镜[43]。具有正交空间指向矢的两层液晶共享相同的圆孔电极产生的边缘电场。液晶透镜的结构如图 20 所示。利用两层具有正交空间指向矢的液晶层来达到透镜的偏振无关化，原理如下：

假设垂直液晶透镜入射的方向为 z 方向，入射光沿 z 轴前进，每个随机的偏振光可以表

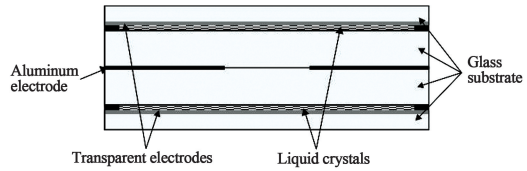


图 20 双液晶层偏振无关透镜[43]

Fig.20 Polarization-independent lens with dual liquid crystal layer[43]

示为[43]：

$$\boldsymbol{E}_i = A_x\boldsymbol{x} + A_y\boldsymbol{y} \quad , \tag{20}$$

$\boldsymbol{x}$ 和 $\boldsymbol{y}$ 分别为沿 x 轴和 y 轴的单位矢量，在没有施加电压时出射光可表示为：

$$\boldsymbol{E}_{\text{out}}(V=0) = \mathrm{e}^{\mathrm{j}\cdot 2k\cdot(n_\mathrm{e}+n_\mathrm{o})\cdot d}\cdot\boldsymbol{E}_\mathrm{i} \quad , \tag{21}$$

其中，$\boldsymbol{k}$ 为入射光的波矢。

相位延迟可表示为：

$$\boldsymbol{k}\times n(r)\times d = \boldsymbol{k}\times\left(n_\mathrm{c} - \frac{n_\mathrm{c}-n_\mathrm{b}}{r_0^{\,2}}\cdot r^2\right)\times d \, , \tag{22}$$

其中 r_0 为液晶透镜半径，n_c 为透镜中心的折射率，n_b 为透镜边缘的折射率。$r=\sqrt{x^2+y^2}$ 经双层正交液晶透镜的出射光可表示为：

$$\boldsymbol{E}_{\text{out}} = \mathrm{e}^{\mathrm{j}\cdot 2\times k\times d\times(n_\mathrm{o}+n_\mathrm{c})}\cdot\mathrm{e}^{+\mathrm{j}\cdot 2\times k\times d\times\frac{n_\mathrm{b}-n_\mathrm{c}}{r_{02}}\times r^2}\cdot\boldsymbol{E}_\mathrm{i} \, , \tag{23}$$

从以上公式可以看出，输出光与输入光的偏振态是相同的，故透镜偏振无关。

液晶材料型号为 E44，双液晶层的总厚度为 130 μm，孔径为 1.3 mm，圆孔电极与液晶层的距离为 7 mm。以波长为 633 nm 的 He-Ne 非偏振激光入射，图 21 显示了在两个正交摩擦取向方向上入射光经透镜后光焦度随施加的电压分布，曲线分布基本一致，可说明具有正交摩擦取向的液晶层的液晶透镜具有偏振无关特性。由公式(4)知，具有双液晶层的透镜光焦度比单液晶层的透镜光焦度提高约 50%，在一定程度提高液晶透镜的相位调制能力，具有更好的调焦能力，实验测得在 110 V_{rms} 下，双层液晶透镜的光焦度为 6.3 m^{-1}，单液晶层透镜的光焦度为 4.2 m^{-1}。液晶层厚度的增加会带来高功耗与透过率降低等问题。

2.9 聚合物稳定的蓝相液晶偏振无关透镜

2010 年，Lin 等人使用了基于聚合物稳定的蓝相液晶(Polymer Stability Blue Phase Liquid Crystal，PSBP-LC)制备出光学相位调制的无偏振器和快速响应微透镜阵列[44]。PSBP-LC 利用克尔效应用在液晶透镜领域：在不施加电场时，表现为各向同性，其折射率椭球为圆球状；当施加的电场超过阈值时，对于正性液晶，折射率椭球沿平行于电场的方向拉长，对于负性液晶，折射率椭球沿垂直于电场的方向拉长，此时表现为各向异性。当施加非均匀电场时，如图 22 所示，电压沿透镜中央到边缘逐渐增强，对应区域的蓝相液晶的折射率椭球也发生变化，形成梯度有效折射率分布，此时 PSPB-LC 长轴方向始终平行于电场方向，形成偏振无关特性。

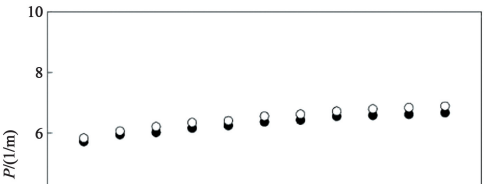


图 21 在 x 方向与 y 方向上液晶透镜的光焦度随电压分布[43]

Fig.21 Distribution of the optical focal length of the liquid crystal lens in the x-direction and y-direction as a function of voltage [43]

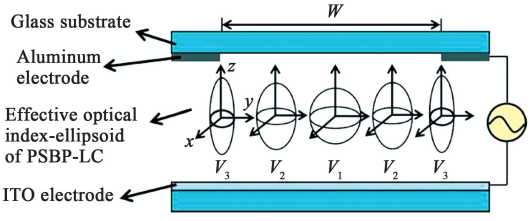


图 22 PSBP-LC 透镜工作原理示意图[44]

Fig.22 Schematic diagram of the working principle of PSBP-LC lens[44]

由于 PSBP-LC 形成梯度相位调制量的原理不是通过改变入射偏振光与液晶指向矢的夹角来达到有效折射率的改变，故在制备 PSBP-LC 透镜时无需添加取向层，简化了生产工艺且提高了透

镜的透射率。

利用 PSBP-LC 制备的透镜的相位延迟可由公式(24)表示：

$$\Delta\delta=\frac{2\pi d}{\lambda}\left|\frac{n_o-n_e}{3}\right|, \tag{24}$$

其中，n_o 与 n_e 分别为 PSBP-LC 的寻常光折射率与非寻常光折射率，λ 为入射光的波长，d 为液晶层的厚度。焦距可由公式(25)表示：

$$f=\frac{\pi w^2}{4\lambda|\Delta\delta|}, \tag{25}$$

其中，w 为圆孔电极的孔径。由相位延迟公式可知，PSBP-LC 透镜因克尔效应引起的可调相移较小，制备的液晶透镜液晶层厚度为 20 μm，孔径为 250 μm，通过聚焦测试得：在 100 V_{rms} 时其焦距为 131 mm，F 数为 524，相位调制深度小，调焦能力极弱。

使用 Mach-Zehnder 干涉仪测量其相位变化，633 nm 波长激光作为非偏振入射光，在激光前放置并旋转偏振器得到透镜不同偏振方向的线偏振光的(边缘与中央)相位延迟随电压的变化以及在非偏振光下透镜的透过率随电压的变化，结果如图 23 所示，可知不同方向的入射偏振光与非偏振光经 PSBP-LC 后其聚焦能力几乎一致，达到了偏振无关的目的。由于 PSBP-LC 的特性，透镜所需的功耗较大且聚焦能力极弱，此类透镜适用在非偏振光入射的光学系统辅助成像。

2.10　可分别调控偏振与相位的复合型液晶透镜

在液晶透镜发展的过程中，一直存在着相位调制深度低，调焦能力弱问题。虽然通过增加液晶层厚度可增加透镜调制相位深度，但会增加驱动透镜的功耗和聚焦的响应时间以及降低透镜的透射率。2013 年，Ren 等人使用液晶偏振片配合液晶透镜，获得可同时调控偏振与相位的复合型液晶透镜[45]。

调控偏振的部分使向列相液晶 P0616A，所获得的扭曲向列相液晶盒应满足半波条件，即

$$d\Delta n\gg\lambda/2, \tag{26}$$

其中，λ 为入射光的波长，Δn 为向列相液晶的各向异性折射率，d 为液晶层的厚度。扭曲向列相液晶盒可将偏振方向与液晶盒起始取向方向平行的入射光的偏振方向旋转 90°。液晶透镜部分：采用二丙烯酸酯液晶单体 RM257，利用边缘电场

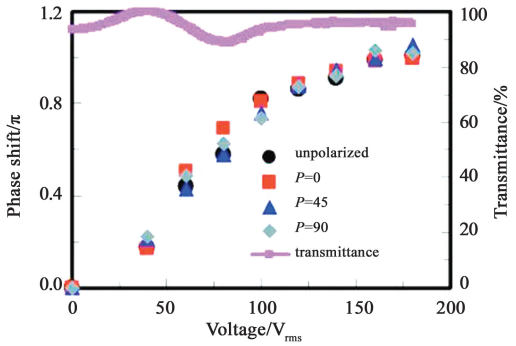


图 23　偏振光与非偏振光下 PSBP-LC 透镜的相移随不同电压的分布(点)。在非偏振光下 PSBP-LC 透镜的透过率随不同电压的分布(曲线)[44]。

Fig.23　Optical phase shift of PSBP-LC lens as a function of voltage under polarized and unpolarized light (point). The transmittance of PSBP-LC lens as a function of voltage under unpolarized light (line)[44].

原理重新定向液晶分子，形成梯度排列，随后使用紫外光照射得到固定的液晶分子排列，孔径为 0.12 mm，焦距为 0.65 mm。F 数为 5.4，调制能力良好。测试复合型液晶透镜的聚焦性能时，使用图 24 所示的光学元件布置。

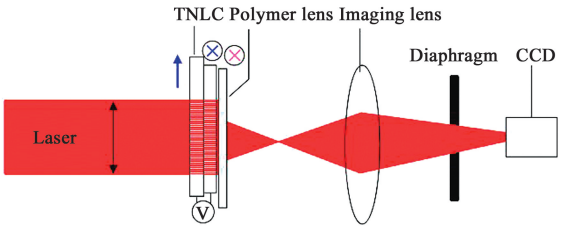


图 24　实验设置[45]

Fig.24　Experimental setup[45]

其中，入射光的偏振方向与液晶偏振器的前玻璃基板上的 PI 取向方向一致，与液晶透镜的 PI 摩擦方向垂直。驱动液晶可调偏振器的电压 10 V_{rms}，频率为 1 kHz。没电源驱动时，柱透镜矩阵形成许多条聚焦的光线，当施加电压于液晶可调偏振器时，聚焦效果消失，如图 25 所示，图中还显示了经柱状透镜的聚焦光强分布。

从图 25 可知，在未施加驱动电压时液晶透镜的聚焦光效果良好，但在施加驱动电压时液晶透镜的光透过率分布不均，可能原因在于液晶偏振器的制作工艺问题造成其光偏振调制不均。复合

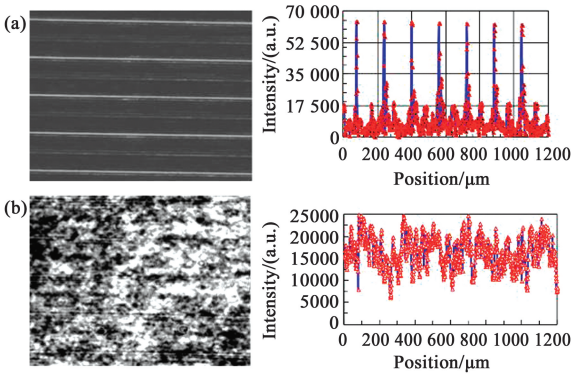


图 25 聚焦(a)与未聚焦(b)时的复合型液晶透镜的成像与光强分布[45]

Fig.25 Imaging and intensity profiles of the focusing state (a) and non-focusing state (b) of composite liquid crystal lens[45]

型液晶透镜的液晶偏振器相当于液晶透镜的聚焦开关,响应时间为 12 ms,复合型液晶透镜具有低驱动、良好的调焦能力、聚焦快速响应等特性,但其焦距不可调,只能实现开启聚焦与关闭聚焦,后期可以通过多个复合型液晶透镜组合来实现多焦距成像。这种特性的液晶透镜可应用在显示面板的 2D/3D 的切换。

2.11 可分别调控偏振与相位的复合型液晶透镜应用在 2D/3D 图像切换系统

以往应用在可切换 2D/3D 显示器的液晶透镜技术,液晶透镜的厚度达到聚焦要求时需要较高的功耗(一般高于 45 V_{rms}),不利于此技术大范围的应用。液晶层厚度低于 10 μm 可显著解决功耗与响应时间问题。2013 年,Mun 等人将偏振与相位调制复合型液晶透镜矩阵应用于显示面板 2D/3D 的切换[46]。

液晶偏振器采用 VA 模式,在无驱动电压下,液晶分子垂直于基板排列,液晶透镜部分不起作用,此时为 2D 模式;施加电压后,液晶分子的长轴与偏振片的角度呈 45°,可使入射光的偏振面旋转 90°,液晶透镜部分起聚焦作用,此时为 3D 模式。原理图如图 26 所示。

透镜电极的条纹间距为 500 μm,液晶层的厚度为 30 μm。液晶偏振器的液晶层厚度为 4.6 μm,只需施加 5 V 的电压,即可在 20 ms 完成 2D/3D 的切换。

2.12 可分别调控偏振与相位的复合型液晶透镜解决 2D/3D 图像切换系统的图像串扰

2014 年,Zhu 基于上述的复合型液晶透镜

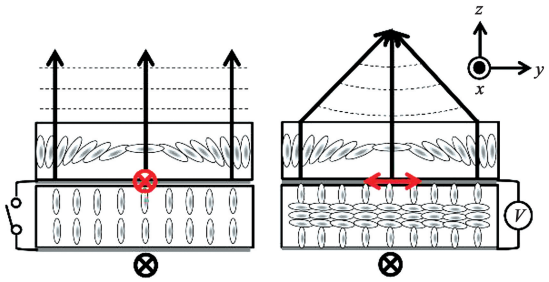


图 26 VA 模式的复合型液晶透镜工作原理[46]

Fig.26 Working principle of composite liquid crystal lens in VA mode[46]

2D/3D 切换系统,提出了双复合型液晶透镜用于减少在 3D 画面时的光串扰问题[47]。制备的液晶透镜液晶层厚度为 71 μm,液晶偏振器的厚度为 5 μm,实验测得驱动电压在 5 V 时透镜的响应时间为 3.7 ms。

图 27 显示了实验采用的显示面板与单层透镜阵列形成的 3D 显示在不同视角的图像光的位置分布,可见各个视角的最佳位置处都有其他视角图像的光串扰,推导出来的归一化分布的平均视图间的串扰为 34%。

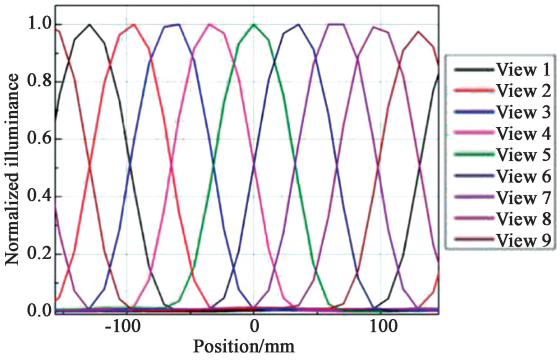


图 27 改进前的 2D/3D 图像切换系统不同视角的图像光强[47]

Fig.27 Distribution of image light intensity at different viewing angles of the unimproved 2D/3D image switching system[47]

图 28 显示了双复合型液晶透镜的 2D/3D 可切换系统,第一个透镜阵列(焦距为 1 mm)置于显示面板前方 3 mm 处,焦距为 4 mm 的第二个透镜阵列位于第一个透镜阵列的 5.5 mm 处。第一个透镜阵列充当收缩透镜以减少显示器的有效像素尺寸,第二个透镜阵列充当聚焦透镜实现 3D

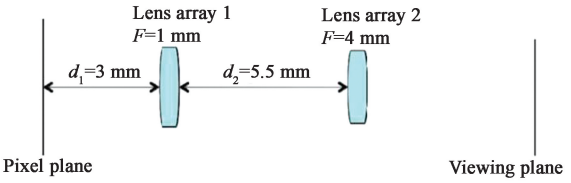


图 28　双复合型液晶透镜的 2D/3D 图像切换系统[47]

Fig.28　2D/3D image switching system with dual composite liquid crystal lenses[47]

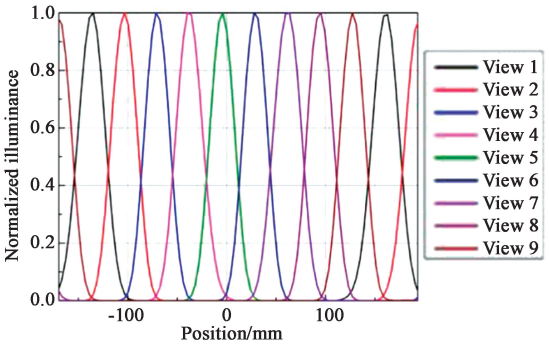


图 29　已改进的 2D/3D 切换系统不同视角的图像光强的位置分布[47]

Fig.29　Distribution of the image light intensity of different viewing angles of the improved 2D/3D image switching system[47]

效果。采用双层液晶透镜后相邻视图的漏光显著减少，视图间几乎无串扰，在最佳位置的图像质量大大提高。不足之处在于各个视图的最佳显示自由度减少，如图 29 所示。上述列举的利用边缘电场原理驱动的液晶透镜的参数对比如表 1 所示。

表 1　利用边缘电场原理驱动的液晶透镜的参数总结

Tab.1　Parameter summary of liquid crystal lens driven by edge electric field

驱动电极类型	特点	孔径/mm	液晶层厚度/μm	最大光焦度/m^{-1}	驱动电压/V_{rms}	聚焦(恢复)/ms	年份
边缘电场原理	首个使用边缘电场原理的液晶透镜[22]	0.25	50	167	1	无	1992
	双电场驱动[29]	2.5	20	2.3	$V_1=150$，$V_2=40$-110	＜1 000(150)	2004
	三电场驱动[33]	3.8(3.8～5.8)		5.6	$V_1=30$，$V_2=60$，$V_3=0$	无	2011
	可调节正负焦距[36]	3	75	－6.1	35～60	无	2006
	加入悬浮电极[37]	6	125	6	40	18000	2016
	添加固定焦距层[40]	1.68	25	5.8	35	350(740)	2011
	nano-PDLC 偏振无关透镜[41]	6	30	2.1	90	＜1	2013
	双正交液晶层偏振无关[43]	1.3	130	6.3	110	无	2003
	PSBP-LC 偏振无关[44]	0.25	20	7.6	100	2.3	2010
	偏振与相位分别可调[45]	0.12	50	1 538	10	12	2013
	复合型液晶透镜应用在 2D/3D 图像切换系统[46]	0.5	30	222	5	20	2013
	复合型液晶透镜解决 2D/3D 图像切换系统串扰[47]	无	71	268	5	3.7(13)	2014

3 离散电极型液晶透镜

目前对于边缘电场驱动的液晶透镜，只能通过改变结构或使用叠加电场来整体调节其电场。为了达到更精准的电场控制以达到预期的电场分布，离散电极布局被应用在液晶透镜中。

3.1 纵向电极引出线设计应用在离散电极型液晶透镜

2010 年，Kao 等人使用离散电极应用在液晶透镜中[48]，结构如图 30 所示。离散电极的位置根据公式(27)[48]布局，光焦度与相位延迟计算可参考公式(3)和(4)。

$$R=\sqrt{2d_{\mathrm{LC}}f\left[n_{\mathrm{LC,max}}-n_{\mathrm{LC}}(R)\right]}\quad,(27)$$

其中，d_{LC}为液晶层的厚度，$n_{\mathrm{LC,max}}$为透镜空间内最大折射率，位于透镜中心，f 为预设的透镜焦距。

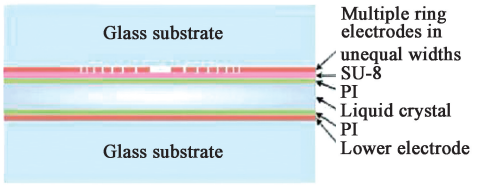


图 30 离散电极型液晶透镜结构[48]

Fig.30 Structure of liquid crystal lens driven by discrete electrode[48]

为了缓解电极间隙带来的电场不连贯问题，在离散电极层与上 PI 层间添加了一层材料为 SU-8 的薄介电层。离散圆环电极应用在液晶透镜的难点在于处理电极引出线。若圆环电极在同一平面，电极的引出线必然穿过其他圆环电极，如图 31(a)所示，电极引出线区域会引起电场的变化进而影响成像。为了解决这一问题，作者提出了一种新的多层结构制造工艺，如图 31(b)、(c)所示。透镜的奇数和偶数圆环电极位于不同的层中，并在这些电极下埋设总线，奇偶圆环引出线纵向连接总线避免穿过其他圆环电极，消除成像孔径中产生的电场畸变。

3.2 离散电极的引出线简化

数量越多的离散电极能带来更连续的电场分布，同时会增大制作工艺难度，文献[49-51]也有相关问题的描述。2013 年，Li 等人利用电阻串联相邻的离散圆环电极来减少电极引出线以降低工艺难度[52]，结构如图 32(a)、(b)所示。根据实际需要设置了 32 个圆环电极，每 4 个相邻的圆环电极使用一定阻值的电阻连接，此时只需驱动第 1，5，9，13，17，21，25，29 个圆环电极。相邻圆环电极间由电阻连接，设计不同的阻值可得圆环电极间不同的电压梯度变化。

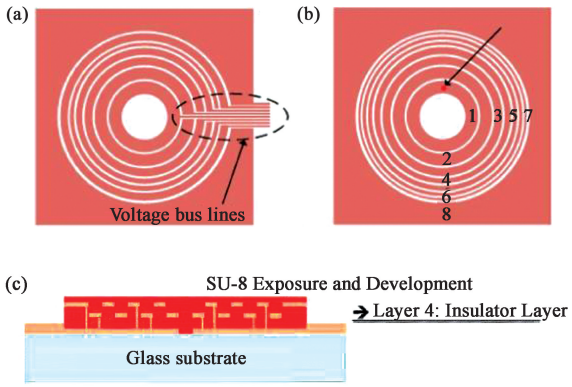


图 31 电极引出线布局[48]。(a)奇偶圆环电极同层；(b)奇偶圆环电极分层；(c)奇偶圆环电极分层布局的剖视图。

Fig.31 Design of electrode outlet-line[48]. (a) Odd and even circular electrodes in the same layer; (b) Odd and even circular electrodes notin the same layer; (c) Cross-sectional view of odd and even circular electrode layer.

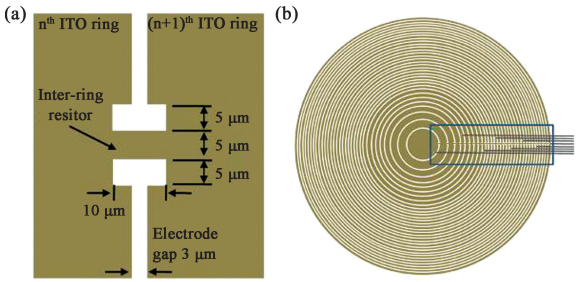


图 32 改进的圆环电极布局[52]。(a)圆环电极间以电阻块连接；(b)圆环电极引出线布局。

Fig.32 Design of improved electrode outlet-line[52]. (a) Connection between circular electrodes with resistance blocks; (b) Design of electrode outlet-line.

实验使用的离散电极的最大外孔径为 2.4 mm，液晶层厚度为 10 μm，驱动电压为 1～5 V。

实验得到了焦距为 400 mm 时液晶透镜与固体透镜光程差分布，如图 33 和图 34 所示。得益于多电极对电场的精准控制，制作的液晶透镜的光程差分布接近理想光程差分布。良好的成像质量与较低的功耗使其更适用在移动设备上。

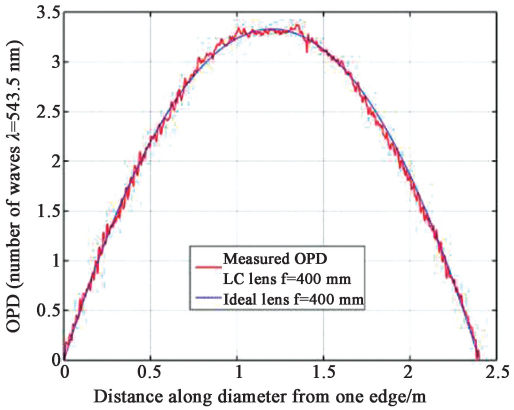


图 33　焦距为 400 mm 液晶透镜与理想透镜的光程差分布[48]

Fig.33　Distribution of optical path difference between a liquid crystal lens and an ideal lens at focal length of 400 mm[48]

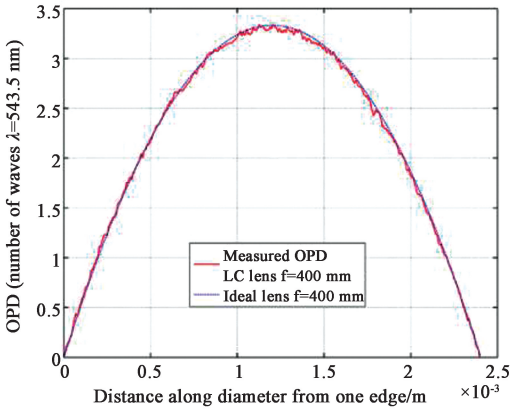


图 34　焦距为 400 mm 时传统固体透镜与理想透镜的光程差分布[48]

Fig.34　Distribution of optical path difference between a conventional solid lens and an ideal lens at focal length of 400 mm[48]

3.3　利用离散电极布局设计菲涅尔液晶透镜

在传统光学透镜领域，相同孔径和厚度下菲涅尔透镜相比常规的球透镜具有更大的光焦度，许多研究者将目光投向了菲涅尔液晶透镜[53-56]。2005 年，Li 等人率先参照菲涅尔透镜的成像原理，利用离散电极驱动液晶层来形成类菲涅尔相位延迟分布[57]。利用菲涅尔衍射公式可以得到离散圆环电极的位置分布，化简后如公式(28)[57]所示。

$$r_m=\sqrt{2m\lambda f},m=1,2,\cdots,M \quad , \quad (28)$$

其中，r_m 为从孔径中心到边缘的第 m 个圆环电极的外径，λ 为入射光的波长，f 为预设的焦距值。相位级别数为各级相位延迟的阶梯数，它可衡量各级相位延迟的连贯程度，与菲涅尔液晶透镜的衍射效率呈正相关。文中设计的阶梯式相位分布如图 35 所示。

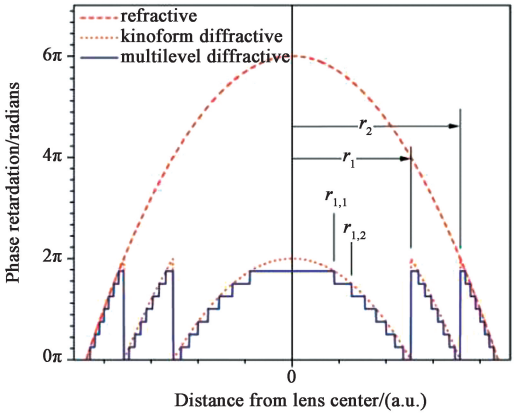


图 35　菲涅尔液晶透镜相位延迟分布[57]

Fig.35　Distribution of phase delay of Fresnel liquid crystal lens[57]

采用相位级别数为 8，电极引线可分为 8 组母引线，组内的子引线分别负责等阶梯的子相位延迟。制作的菲涅尔液晶透镜的孔径为 10 mm，液晶层厚度为 5 μm，驱动电压范围在 0～5 V_{rms}，最小焦距为 1 000 mm，变焦响应时间小于 1 s，波前差的均方根为 0.039λ，透镜的衍射效率保持在 85%以上。对于光学透镜来说，驱动电极是离散分布的，单位面积的电极数目越多，其衍射效率越高，波前差的均方根越小，单位面积光线泄露越小，成像清晰度越高。波前差均方根小于 0.07λ 时即可保持良好的成像清晰度。菲涅尔液晶透镜能以较小的液晶厚度实现大光焦度，同时它还拥有低响应时间与高透过率使其适用于更多的光学领域。

3.4　奇偶圆环电极分层布局应用在菲涅尔液晶透镜

为了确保电隔离，同一平面排布的圆环电极必须留有一定的间隙，这也导致了电极间隙处的

相位延迟分布不连续从而降低了菲涅尔液晶透镜的衍射效率。2006 年，Li 等人继续在原有基础上[57]改进菲涅尔液晶透镜[58]。他们把奇数和偶数的圆环电极分为两层，避免了相邻圆环电极间的间隙，实现了透镜的高衍射效率。奇偶圆环电极的错开分布还可大幅提高制作工艺的容错率，使大孔径液晶透镜更易制作。设计的菲涅尔液晶透镜如图 36 所示。

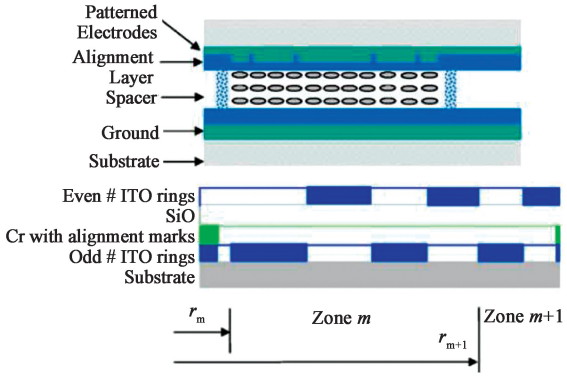


图 36 奇偶电极分层的菲涅尔液晶透镜[58]

Fig.36 Fresnel liquid crystal lens with odd and even electrode layering[58]

设计的液晶透镜驱动电压范围在 0～2 V，最小焦距为 500 mm，液晶响应时间约为 180 ms。由于采用了 15 mm 的孔径和相位级别数为 4 的电极结构，衍射效率相较之前[57]下降为 75%，波前差均方根增大至 0.088 9λ，高于光学透镜对于波前差均方根的最低要求。在非工作状态与工作状态时透镜单独成像质量如图 37 所示，可见其成像清晰度一般，有一定的画面模糊。

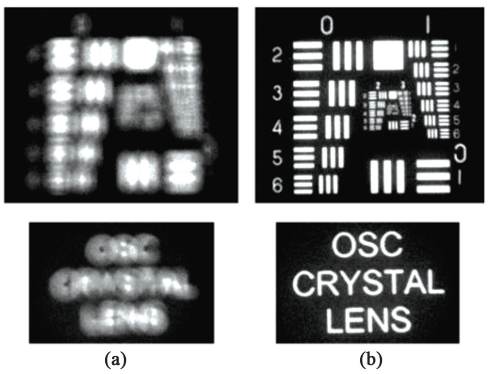


图 37 非工作状态(a)与工作状态(b)时菲涅尔液晶透镜的成像表现[58]

Fig.37 Imaging performance of Fresnel liquid crystal lens in non-working (a) and working (b) states[58]

3.5 纵向电极引出线布局应用在菲涅尔液晶透镜

2007 年，Li 继续改进菲涅尔液晶透镜，在奇偶圆环电极层下增加母线层，奇偶圆环电极纵向穿过绝缘层与母线相连[59]，工艺过程如图 38 所示。当需要增加相位级数时，只需改变圆环电极的数目和母线层的连接布局即可，透镜的大体结构保持不变。由于电极引出线没有穿过其他圆环电极，在成像质量不受影响下液晶透镜可以容纳更多的圆环电极。

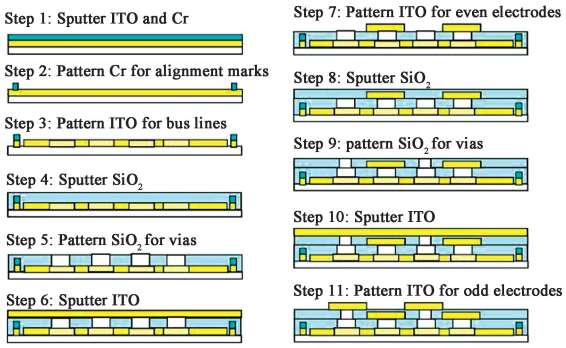


图 38 菲涅尔液晶透镜的纵向电极引出线设计[59]

Fig.38 Design of longitudinal electrode outlet-line of Fresnel liquid crystal lens[59]

设计的菲涅尔液晶透镜孔径为 15 mm，液晶层厚度为 5 μm，相位级别数为 8，每个电极的驱动电压范围为 0～2 V_{rms} 时焦距为 1 000 mm，中心衍射效率高达 92%，透镜响应时间为 150 ms，波前差均方根为 0.068 8λ，低于光学透镜的波前差均方根的最低要求。物距为 1 000 mm 时，非工作状态与工作状态的透镜成像如图 39 所示。归功于较高的相位级数与纵向电极引出线布局，图像的成像质量良好，由此可知增加相位级别数，即增加单位面积内的电极数目，可以提高透镜的成像清晰度。

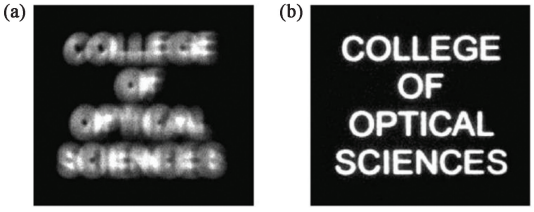


图 39 非工作状态(a)与工作状态(b)的菲涅尔液晶透镜成像表现[59]

Fig.39 Imaging performance of Fresnel liquid crystal lens in non-working (a) and working (b) states[59]

菲涅尔液晶透镜有着大孔径、响应时间快速、低功耗与成像质量良好等优点，但在高光焦度时成像质量下降，它更加适合应用在对光焦度要求不高、对功耗与体积要求较高的场合，例如视力调节、无人机变焦镜等。上述列举的离散电极型液晶透镜的参数对比如表 2 所示。

表 2 离散电极型液晶透镜的参数总结

Tab.2　Parameter summary of liquid crystal lens driven by discrete multi-electrode

驱动电极类型	特点	孔径/mm	液晶层厚度/μm	最大光焦度/m^{-1}	驱动电压/V_{rms}	聚焦(恢复)/ms	年份
离散电极型	纵向电极引出线设计[48]	4	50	5.5	20～70	无	2010
	串联相邻的离散电极降低制作难度[52]	2.4	10	2.5	0～5	无	2013
	离散电极应用在菲涅尔液晶透镜[57]	10	5	1	0～5	＜1	2005
	奇偶圆环电极分层应用在菲涅尔液晶透镜[58]	15	5	2	0～2	180	2006
	纵向电极引出线应用在菲涅尔液晶透镜[59]	15	5	1	0～2	150	2007

4　高阻层电极型液晶透镜

4.1　高阻层电极型液晶透镜的开端

高阻层型液晶透镜的出现可以解决透镜内电场分布不连续问题而保持大孔径与低功耗等优点。1998 年，Naumov 等人通过磁控溅射工艺在边缘电场驱动的液晶透镜的圆孔电极表层覆上一层材料为氧化钛薄膜的高电阻层，提出了高阻层型电极液晶透镜[53]，结构如图 40 所示，等效电路如图 41 所示。其中焦距与相位延迟分布公式可参考公式(3)和(4)。

电阻控制电极 R 和夹在控制电极和接地电极之间的液晶层形成的电容器的电抗阻抗组成分布式分压器，它允许透镜内电场连续分布。相比离散电极型液晶透镜，它不需要刻蚀复杂的电极图案以及布置相应的引线。等效电路的电路原理如下：控制电压在孔径方向的分布受液晶层的电参数控制，即液晶在等效电路中的单位面积电导 g 与电容 c。液晶的介电常数 $\varepsilon=\varepsilon'+i\varepsilon''$，定义垂直于玻璃基板的方向为 z 方向，液晶层的厚度为 d。透镜孔径内的电压分布可由公式(29)～(32)[61]表示：

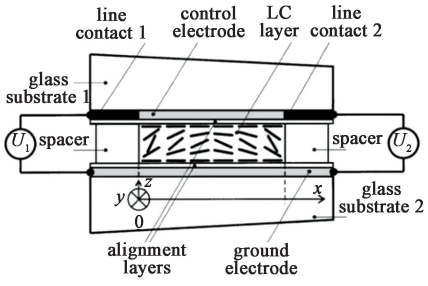


图 40　高阻层电极型液晶透镜[60]

Fig.40　Liquid crystal lenses driven by the electrode with high-resistance layer[60]

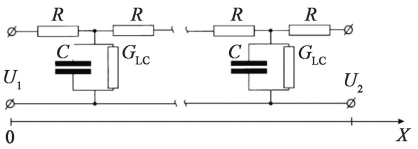


图 41　高阻层电极型液晶透镜的等效电路[60]

Fig.41　Equivalent circuit of liquid crystal lenses driven by the electrode with high-resistance layer[60]

$$\nabla_s^2 U=\rho_s c\frac{\partial U}{\partial t}+\rho_s g U \quad , \tag{29}$$

$$g=\frac{\omega}{4\pi}\left(\frac{I''}{I'^2+I''^2}\right),\ c=\frac{1}{4\pi}\left(\frac{I''}{I'^2+I''^2}\right) \quad , \tag{30}$$

其中：

$$I'=\int_{-d/2}^{d/2}\frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2+\varepsilon''^2}\mathrm{d}z,\ I''=\int_{-d/2}^{d/2}\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2+\varepsilon''^2}\mathrm{d}z\quad,\tag{31}$$

$$\begin{cases}\varepsilon'=\varepsilon'_{\perp}\cos^2\theta+\varepsilon'_{/\!/}\sin^2\theta\\ \varepsilon''=\varepsilon''_{\perp}\cos^2\theta+\varepsilon''_{/\!/}\sin^2\theta\end{cases},\tag{32}$$

其中，ω 为施加电压的角频率，θ 为电场下液晶分子与基板的夹角。根据以上公式可知，除了调控施加的电压来改变液晶分子的倾角，还可通过调控施加的电压频率来该调控液晶在等效电路中的电导实现改变透镜的电压，最后形成预期的液晶指向矢分布，实现调节焦距的目的。焦距与相位延迟分布的计算公式与利用边缘电场原理制备的液晶透镜的一致。1999 年，Naumov 等人制作了第一个高阻层电极型液晶透镜[61]，其孔径为 5 mm，液晶层厚度为 25 μm，驱动电压为 0～10 V_{rms}，频率在 17 kHz 以下。作者在实验中使用焦距为 1 000 mm 的相机镜头与高阻层电极型液晶透镜进行光聚焦比较，如图 42 所示。

由于仿真方法与制作工艺的不完善，对比常规的固体透镜其光聚焦质量较差，但作为首个高阻层电极型液晶透镜其成像质量可以在随后的研究中逐步加强与完善。

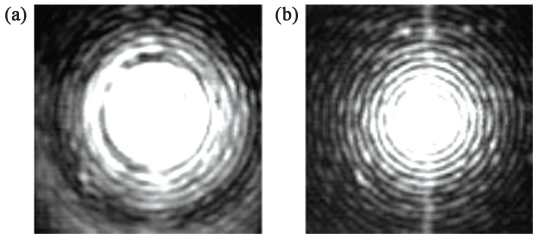


图 42 透镜成像表现。(a)高阻层电极型液晶透镜；(b)相机镜头[61]。

Fig.42 Image performance of liquid crystal lens driven by electrode with high resistance layer (a) and camera lens(b)[61]

4.2 方阻可调配的高阻层

根据等效电路可知，改变高阻层的阻值可调节透镜内的电场分布。2010 年，Fraval 等人使用不同比例的 PEDOT(EDOT(3，4-乙烯二氧噻吩单体)的聚合物)与 PSS(聚苯乙烯磺酸盐)的调配液，混合 PVA(聚乙烯醇)制作出方阻在 100 kΩ/□～100MΩ/□的高阻层，方阻为 PEDOT-PSS 浓度的函数[62]。PVA 用作粘合剂，同时可降低高阻层的电导率。在 400～1 700 nm 的光谱范围内，高阻层的光损耗小于 5%。实验中液晶透镜的孔径为 2 mm，液晶层厚度为 18 μm，施加的驱动电压为 10 V，得到了焦距随施加的电压频率变化曲线，如图 43 所示。

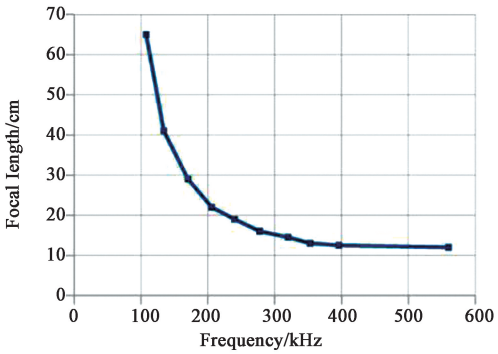


图 43 驱动电压为 10 V_{rms} 时焦距随电压频率分布[62]

Fig.43 Distribution of focal length as a function of voltage frequency at a drive voltage of 10 V_{rms}[62]

透镜在每个焦距下都需要相应的驱动电压(幅值与频率)，图 44 显示了不同焦距下的电压幅值与频率的组合。变焦时只需调节一个回路的电压幅值与频率，比离散电极型液晶透镜的调焦难度低。得益于 PEDOT-PSS 材料制作的高阻层与准确的电压调控，透镜的焦距从 450 mm 到 120 mm 变化时其波前差的均方根为 0.1λ 到 0.25λ。

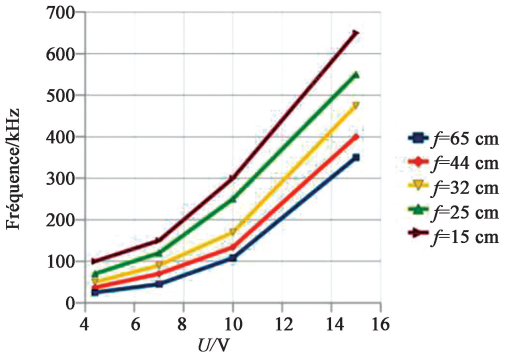


图 44 多个焦距下透镜上的电压幅值与电压频率关系[62]

Fig.44 Several focal lengths as a function of voltage and frequency[62]

4.3 悬浮电极应用在高阻层电极型液晶透镜

2016 年，Galstian 等人在高阻层电极型液晶

透镜基础上加入了悬浮电极，降低了驱动电压和提高了透镜的聚焦能力[63]，结构如图 45 所示。改进后的液晶透镜的等效电路图如图 46 所示。

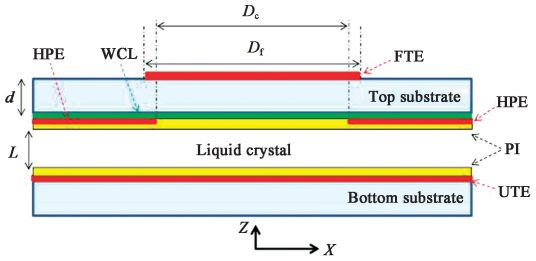


图 45　加入悬浮电极的高阻层电极型液晶透镜[63]

Fig.45　Liquid crystal lens driven by electrode with high-resistance layer and floating electrode[63]

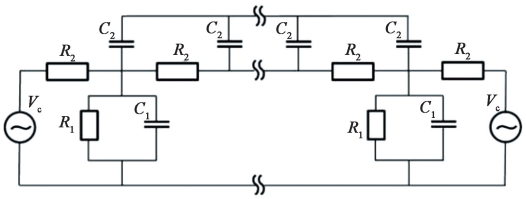


图 46　加入悬浮电极的高阻层电极型液晶透镜等效电路[63]

Fig. 46　Equivalent circuit of liquid crystal lens driven by electrode with high-resistance layer and floating electrode[63]

实验中液晶透镜的孔径为 2 mm，液晶层厚度为 50 μm。在液晶透镜的上玻璃基板外侧的孔径区域添加悬浮电极来控制 RC 电路的局部谐振值电容。虽然这些变化相当微妙，但对液晶透镜的成像影响很大。设悬浮电极与圆孔电极的距离为 d，通过仿真对比有无悬浮电极且不同 d 值的高阻层电极型液晶透镜的相位延迟分布，如图 47 所示。加入悬浮电极且 $d=100$ μm 的高阻层电极型液晶透镜的相位延迟分布最接近抛物线分布，成像质量更佳。

通过仿真得到光焦度为 10 D 时电压幅值（对应最佳的频率）与球差均方根关系，如图 48 所示。（“Reference”、“Floating”分别表示未加入与已加入悬浮电极的高阻层电极型液晶透镜）说明在相同的焦距下，后者比前者拥有更低的功耗但球差的均方根更小。有了低功耗与优秀的成像质量作为基础，将其放置在移动设备的镜头前，也可获得优秀的应用效果。

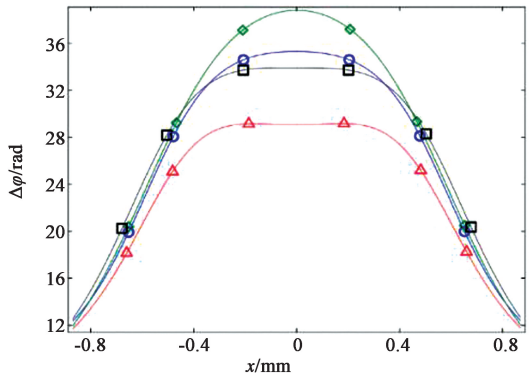


图 47　相位延迟分布：$d=100$ μm（菱形）；$d=500$ μm（圆形）；$d=5$ μm（三角形）；无悬浮电极（正方形）[63]。

Fig.47　Distribution of phase delay: $d=100$ μm (diamond); $d=500$ μm (circle); $d=5$ μm (triangle); no floating electrode (square)[63].

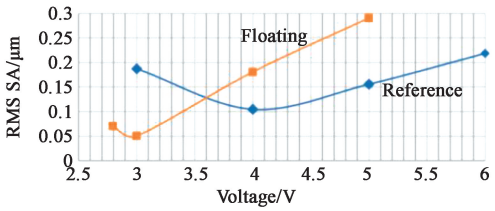


图 48　电压幅值与球差均方根关系（“Floating”：加入悬浮电极；“Reference”：未加入悬浮电极）[63]。

Fig.48　Root mean square of the spherical aberration as a function of voltage amplitude ("Floating": floating electrode; "Reference": no floating electrode)[63].

4.4　利用高阻层阻值调节透镜内电场

前面提到的几种高阻层电极型液晶透镜只可整体调节透镜的折射率分布，无法调节局部区域的折射率。为了精准控制透镜内折射率分布，在 2020 年，巩伟兴等人提出了高阻层电极阶梯阻值分布来精准调节电场[64]。高阻层阻值的设计过程：(1)将高阻层电极划分为离散电阻，并设定初始的高阻层阻值分布；(2)构建折射率分布偏差平方和函数，设定预期的偏差值；(3)经迭代得到预期的偏差值，记录高阻层阻值分布。作者设定液晶透镜的折射率最大偏差为 2×10^{-3}，随后仿真计算了焦距为 400，300，200，150，100 mm 时的折射率误差与高阻层阻值阶梯数的关系，得到了如表 3 的结果。

表 3 最小高阻层阻值阶梯数与折射率最大偏差[64]

Tab.3 Minimum resistance step number of high-resistance layer and the maximum deviation of index of refraction [64]

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}

结果表明随着所设计透镜的最小焦距的减少，高阻层的阻值阶梯数上升，制作难度也会相应上升。为了兼顾透镜的制作工艺难度与成像质量，采用最小焦距为 300 mm 且高阻层电极阻值梯度数为 10 的设计为佳。作者给出了高阻层电极型液晶透镜的精准调控折射率方案，为其高质量成像提供可能，拓展了高阻层电极型液晶透镜的应用范围。

4.5 温度对高阻层电极型液晶透镜的成像影响

液晶的光电特性受温度影响，考虑温度对液晶透镜的成像影响可扩大其应用范围。2020 年，Prusakova 等人使用两种型号的液晶制作高阻层电极型液晶透镜测试温度对其成像影响[65]。第一种为常规的向列相液晶，型号：5CB；第二种为低温型的向列相液晶，型号：M5，适合在低温下操作，有着更小的 Δn。第一个实验测定温度对液晶分子介电常数的影响，进而得到温度与透镜的成像的关系。制作的第一个高阻层电极型液晶透镜的有效孔径为 2.65 mm，液晶层厚度为(50±5) mm，施加在液晶材料为 5CB、M5 液晶透镜的电压分别为 6 V_{rms} 和 7 V_{rms}，电压频率均为 1，10，100 kHz。首先使用 LCR 仪表(一种测量电阻与电容的仪器)测定温度在 −20，0，20，30 ℃下的液晶层的等效电容，利用公式(29)～(32)[65]得到 ε' 和 ε'' 并根据数据仿真得到对应温度下驱动电压频率与液晶透镜光焦度、球差均方根的关系，如图 49 所示。说明了对于 5CB 与 M5 液晶材料，随着环境温度的提高，高阻层电极型液晶透镜的光焦度与球差均方根对电压频率的敏感度越大。为了平衡电压频率对透镜光焦度的可调性与透镜因调节电压频率造成的球差过大问题，高阻层电极型液晶透镜的最佳工作温度一般在 −10～30 ℃范围内。

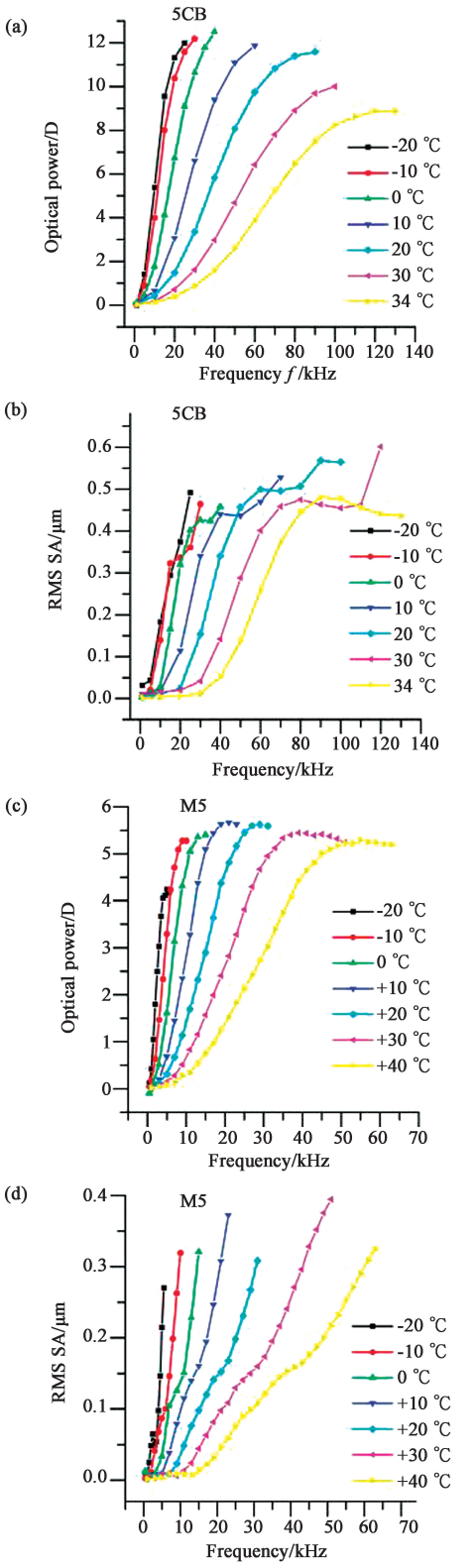


图 49 不同温度下驱动电压频率与液晶透镜光焦度(a，c)、球差的均方根(b，d)的关系[65]。

Fig.49 Several temperature as a function of optical power (a，c)and frequency (b，d) [65].

第二个实验为测定玻璃冷缩热涨导致的液晶层厚度变化对液晶透镜成像的影响。温度变化时液晶透镜的玻璃基板会发生如图 50 的形变。实验使用的液晶型号为 5CB，透镜有效孔径为 1.36 mm，液晶层厚度为 60 μm，驱动电压为 6 V_{rms}。经仿真和实验得到了在 20 ℃和－20 ℃下光焦度与球差均方根的关系，如图 51 所示，说明了温度对透镜变焦时的成像质量的影响不大。另外，实验还得到不同光焦度下温度与驱动电压频率关系，如图 52 所示，结果说明了在不同温度的环境下，高阻层电极型液晶透镜想要维持一定的光焦度，需要通过调节施加的电压频率来补偿温度的变化，这对扩展液晶透镜的工作温度范围有关键的作用。

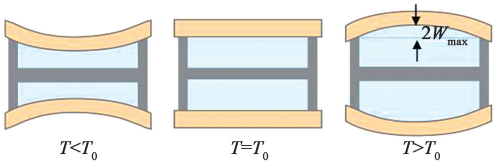


图 50　温度变化时液晶透镜的玻璃基板发生的形变[65]

Fig.50　Deformation of the glass substrate of the liquid crystal lens when the temperature changes[65]

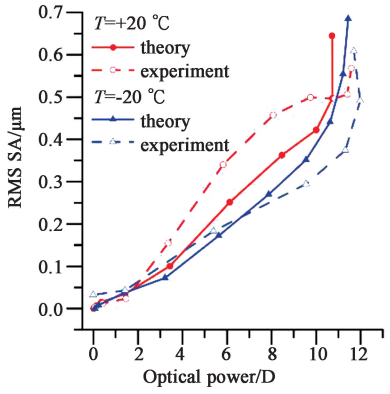


图 51　温度在 20 ℃和－20 ℃时透镜光焦度与球差的均方根关系[65]

Fig.51　Root mean square of spherical aberration as a function of optical power at 20 ℃ and －20 ℃[65]

据两个实验可知，温度可影响液晶分子的相对介电常数与玻璃基板的形状从而干扰液晶透镜的成像。实验得到了温度与液晶透镜成像的关系，据此可以开发出可温度补偿的液晶透镜，为液晶透镜的多领域应用与发展提供支持。

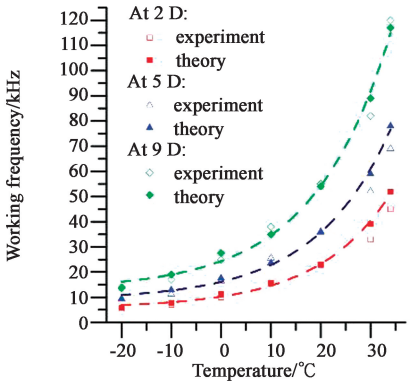


图 52　光焦度为 2 D、5 D、9 D 时温度与工作电压频率关系[65]。

Fig.52　Working frequency as a function of temperature when optical power = 2 D, 3 D, 4 D[65].

4.6　多层液晶堆叠的偏振无关透镜

由于液晶的光学各向异性，液晶透镜对偏振器有依赖性，偏振器限制了透镜的光学效率，使透镜的光学效率低于 50%，为了提高光学效率，开发出无偏振器的液晶透镜很有必要。另一方面，液晶透镜孔径受限，透镜的光焦度与孔径的平方成反比，菲涅尔液晶透镜可以解决孔径限制问题，但如上述，液晶菲涅尔类透镜不适用于要求较高的光学成像系统。2015 年，Chen 等人利用多层结构实现了高阻层型液晶透镜的偏振无关[66]，原理与 2.8 节相同，该液晶透镜通过增加液晶层的厚度在保持光焦度的同时增大液晶透镜的孔径。

ITO 玻璃作为液晶透镜的衬底，带高阻层（高阻层由 PEDOT-PSS 和 PVA（聚乙烯）混合而成，方阻为 10 MΩ/□）的圆孔电极（孔径为 10 mm）与顶部 ITO 玻璃相隔于聚合物的绝缘层（NOA-81），四层液晶层（$\Delta n = 0.417\ 2$）被 3 种聚合物作为隔膜分层。P-LCP 利用两块内侧正交摩擦的 PI 取向剂且在 UV 光的照射下施加 200 V_{rms}，频率为 1 kHz 的电压固化形成特定的液晶分子排列，厚度为 30 μm，仅作液晶分子取向之用，不会干扰入射光。在 P-LCP 聚合物的两个表面有可提供液晶分子相同的取向能力，T-LCP 的两个表面有可提供液晶分子正交的取向的能力。P-LCP 与 T-LCP 对光各向同性。这样，第一层和第四层液晶分子长轴方向与 PI 摩

擦方向相同，与第二层与第三层的液晶分子的长轴方向相反。多层结构的液晶透镜如图 53 所示。

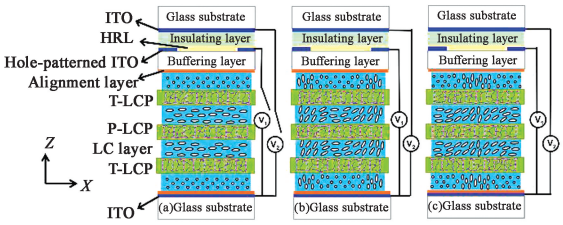


图 53 多层液晶堆叠的偏振无关透镜[66]

Fig.53 Polarization-independent liquid crystal lens with multiple liquid crystal layers[66]

正交取向的液晶层实现偏振无关化原理已在 2.8 节给出。实验分别得到 x 轴、y 轴方向线偏振光、非偏振光经液晶透镜后光焦度随电压的变化，如图 54 所示，各入射光经透镜后的光焦度基本一致，可以说明液晶透镜偏振无关，各入射光经透镜的光焦度可从 1.65 D 调节到 2.31 D，光焦度的可调节范围为 3.93 D。

实验中得到聚焦光的光强分布出现分布不均现象，原因可能为液晶层、聚合物层、高阻层的制作工艺造成层的不均匀，引起相位延迟的波动，这

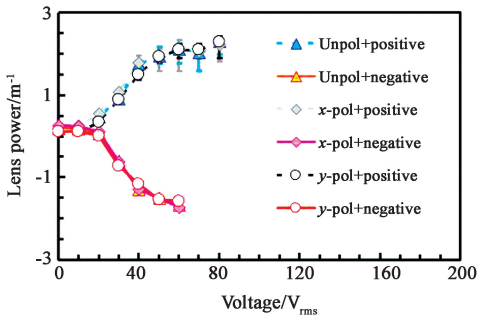


图 54 在偏振光与非偏振光下液晶透镜光焦度随电压分布[66]

Fig.54 Optical power of liquid crystal lens as a function of voltage under polarized and unpolarized light[66]

也反映出该结构的液晶透镜的制作工艺难度较大。总的来说，通过增加液晶层数，可以在不降低透镜调焦能力的情况下，扩大液晶透镜的孔径尺寸。这种液晶透镜的偏振相关性可能会引起不完善制造的图像性能，这可以通过调整施加的电压来改善相位分布。在未来的应用中，提高取向层的锚定强度或降低液晶层的厚度可以改善散射引起的劣化。上述列举的高阻层电极型液晶透镜的参数对比如表 4 所示。

表 4 高阻层电极型液晶透镜的参数总结

Tab.4 Parameter summary of liquid crystal lens driven by electrode with high resistance layer

驱动电极类型	特点	孔径/mm	液晶层厚度/μm	最大光焦度/m^{-1}	驱动电压/V_{rms}	聚焦(恢复)/ms	年份
高阻层电极型	首个高阻层电极型液晶透镜[61]	5	25	1	0～10	无	1999
	方阻可调的高阻层[62]	2	18	8.3	10	无	2010
	悬浮电极应用在高阻层电极型液晶透镜[63]	2	50	10	3	无	2016
	温度对高阻层电极型液晶透镜的成像影响[65]	1.36	60	随温度变化	6	无	2020
	多层液晶堆叠实现透镜偏振无关[66]	10	200	2.31	80	无	2015

5 完整电极层或无电极层液晶透镜

5.1 非均匀 nano-PDLC 偏振无关透镜

2002 年，Ren 等人制备了具有梯度折射率的非均匀纳米级聚合物分散液晶透镜，实现了对入射光的偏振无关[67]。利用 nano-PDLC 制作的液晶透镜实现偏振无关的原理在本文 2.7 节提到。

对于 nano-PDLC，紫外光可使聚合物与液晶

分子分离，光强度越大液晶分子与聚合物的分离度越高，形成的液晶液滴越小。利用图 55 所示的连续可变的透射光遮罩，整个样品的光强几乎呈线性变化。经处理后形成的液晶分子液滴的临界电压可由公式(33)计算：

$$V_d = C/\sqrt{D} \quad , \tag{33}$$

其中，C 为一个常数，与液晶材料有关，D 为衡量液晶分子液滴的尺寸参数。由公式可知较大的液滴具有较低的临界电压，同理，较小的液滴具有较高的临界电压，因此引起的空间折射率变化具有抛物线分布，驱动方法为使用上下整层电极生成均匀电场，只需上下整层电极即可驱动，电极设计简单。

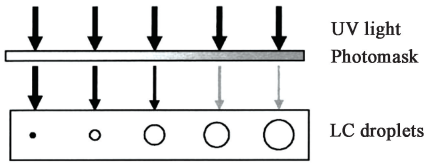


图 55　利用连续可变的光强形成大小连续可变的液晶液滴[67]

Fig.55　Produces continuous and varying liquid crystal droplets using light of continuous and varying intensity[67]

使用 UV 固化单体 NOA-81 和液晶材料 E7 以 70%∶30%(质量分数)混合。将混合物注入内表面有 ITO 的玻璃中，液晶层的厚度为 11.2 μm。紫外光的光强为 350 mW/cm^2，固化温度为 50 ℃，固化时间为 300 s。制作的液晶层液滴大小和浓度都表现出梯度分布，具有较大液滴的区域也具有较高的液晶浓度，在驱动电压关闭时，制作成的样本也具有梯度相位延迟。由于液滴尺寸小，所需的驱动电压大于 100 V_{rms}，11.2 μm 的液晶层厚度的相位延迟较小，为了增加相位延迟，可考虑更高的双折射 LC 混合物和更厚的液晶层，但会带来驱动电压的提升。

5.2　几何相位液晶透镜

光波中的相移通常是通过称为动态相位效应的光程差(OPD)产生的。然而，其他光波参数的变化也会引起相应的相移，称为几何相位效应。液晶偏振透镜(liquid crystal polarization lenses，LCPC)是一种理论衍射效率可达 100%的新型光学元件。前面介绍的液晶透镜是利用光程差进行波前调制，与之不同，液晶偏振透镜是利用几何相位差进行波前调制的。液晶偏振透镜中液晶(各向异性轴)具有特定空间排列，光线通过时偏振态发生改变并附加几何相位差，利用该几何相位差可以实现光束发散或汇聚。这个附加的相位仅与偏振态在各向异性空间演变的几何路径有关，称为几何相位[68]。液晶偏振透镜就是利用几何相位实现波前的调控，因此也被称为几何相位透镜。

可使用正交圆偏振技术制作液晶偏振透镜：利用两束具有正交圆偏振态的平面波和球面波进行干涉，干涉场即为线偏振态在干涉平面内沿径向周期旋转的结构化光场。这种独特的空间排列可以诱导光取向材料发生特定的交联反应，实现对光场结构的记录，并可诱导液晶分子沿光场结构周期方向取向。当入射光通过这些液晶分子时，便会产生特定的几何相位差[69]。我们可以将液晶偏振透镜当作快轴方向轴对称分布且沿径向连续变化的波片。此时可以利用琼斯公式来推导入射光经液晶偏振透镜后的偏振以及相位变化。

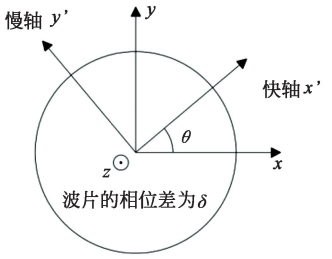


图 56　液晶偏振透镜琼斯矩阵的推导[69]

Fig.56　Derivation of the Jones matrix of LCPL[69]

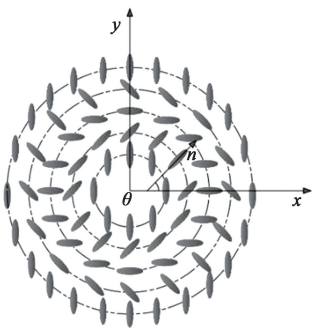


图 57　液晶偏振透镜液晶取向示意图[69]

Fig.57　Schematic diagram of liquid crystal orientation of LCPL[69]

对于正性液晶，其长轴方向即为波片的快轴方向，液晶等效波片的参考坐标系如图 56 所示。现设入射光的方向为 z 轴方向，液晶分子长轴与 x

轴的夹角 $\theta(\rho)=a\rho^2(\rho=\sqrt{x^2+y^2})$，则液晶偏振透镜在 xy 平面上的液晶分子排列如图 57 所示。

假设 $\boldsymbol{G}$ 为液晶偏振透镜的琼斯矩阵，推导如下[69]：

$$\boldsymbol{G}=\cos\frac{\delta}{2}\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix}+\mathrm{i}\sin\frac{\delta}{2}\begin{bmatrix}\cos2\theta&\sin2\theta\\\sin2\theta&-\cos2\theta\end{bmatrix},\tag{34}$$

将 $\cos2\theta=\frac{1}{2}(\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\theta}+\mathrm{e}^{-\mathrm{i}2\theta})$ 和 $\sin2\theta=\frac{1}{2i}(\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\theta}-\mathrm{e}^{-\mathrm{i}2\theta})$ 代入式(34)，得到：

$$\boldsymbol{G}=\cos\frac{\delta}{2}\boldsymbol{H}+\mathrm{i}\sin\frac{\delta}{2}(\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\theta}\boldsymbol{M}+\mathrm{e}^{-\mathrm{i}2\theta}N)\ ,\tag{35}$$

其中，$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{M}=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}1&-\mathrm{i}\\-\mathrm{i}&-1\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{N}=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}1&-\mathrm{i}\\-\mathrm{i}&-1\end{bmatrix}$。假设右旋圆偏振光 $|\boldsymbol{R}\rangle=\begin{bmatrix}1\\-\mathrm{i}\end{bmatrix}$，左旋圆偏振光 $|\boldsymbol{L}\rangle=\begin{bmatrix}1\\\mathrm{i}\end{bmatrix}$，此时可总结出 $\boldsymbol{H}$、$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{N}$ 分别对 $|\boldsymbol{R}\rangle$ 和 $|\boldsymbol{L}\rangle$ 的作用有：

$$\begin{cases}\boldsymbol{H}|\boldsymbol{R}\rangle=|\boldsymbol{R}\rangle\\\boldsymbol{H}|\boldsymbol{L}\rangle=|\boldsymbol{L}\rangle\end{cases},\begin{cases}\boldsymbol{M}|\boldsymbol{R}\rangle=0\\\boldsymbol{M}|\boldsymbol{L}\rangle=|\boldsymbol{R}\rangle\end{cases},\begin{cases}\boldsymbol{N}|\boldsymbol{R}\rangle=|\boldsymbol{L}\rangle\\\boldsymbol{N}|\boldsymbol{L}\rangle=0\end{cases},$$

由于一束完全偏振光可以分解为 $|\boldsymbol{R}\rangle$ 和 $|\boldsymbol{L}\rangle$ 的叠加，对于入射光 $\boldsymbol{E}_\mathrm{i}$ 和出射光 $\boldsymbol{E}_\mathrm{o}$，有：

$$\boldsymbol{E}_\mathrm{o}=\boldsymbol{G}\,\boldsymbol{E}_\mathrm{i}=\cos\frac{\delta}{2}\boldsymbol{E}_\mathrm{i}+\mathrm{i}\sin\frac{\delta}{2}(\langle\boldsymbol{E}_\mathrm{i}|\boldsymbol{L}\rangle\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\theta}|\boldsymbol{R}\rangle+\langle\boldsymbol{E}_\mathrm{i}|\boldsymbol{R}\rangle\mathrm{e}^{-\mathrm{i}2\theta}|\boldsymbol{L}\rangle),\tag{36}$$

$\langle\boldsymbol{E}_\mathrm{i}|\boldsymbol{R}\rangle$ 和 $\langle\boldsymbol{E}_\mathrm{i}|\boldsymbol{L}\rangle$ 分别为入射光右旋圆偏振光和左旋圆偏振光的分量。由上式可知，波片可使入射光的圆偏振旋转方向反转，并为入射的右旋和左旋圆偏振光附加相位因子 $\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\theta}$ 和 $\mathrm{e}^{-\mathrm{i}2\theta}$。对于常规的固体波片，$\theta$ 为常数，但对于液晶偏振透镜，θ 与位置 ρ 有关：

$$\theta(\rho)=\frac{\pi\rho^2}{2\lambda f}\ ,\tag{37}$$

此时，附加相位 $\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\theta}$ 的入射光相当于被焦距为 $-f$ 的光学透镜调制，附加相位 $\mathrm{e}^{-\mathrm{i}2\theta}$ 的入射光相当于被焦距为 f 的光学透镜调制。最后，入射的偏振光经过液晶偏振透镜会被分为 3 束：0 级透射光、+1 级汇聚光和−1 级发散光，3 束光的衍射效率分别为：

$$\begin{cases}\eta_0=\cos^2\dfrac{\delta}{2}\\\eta_{\pm1}=\dfrac{(1\mp S'_3)}{2}\sin^2\dfrac{\delta}{2}\end{cases},\tag{38}$$

其中 $\delta=\frac{2\pi\Delta nd}{\lambda}$，$\Delta n$ 为液晶材料的双折射率，d 为液晶层的厚度，S_3' 为归一化的斯托克斯参数，$S'_3=0$ 表示线偏振光，$S'_3=1$ 表示右旋圆偏振光，$S'_3=-1$ 表示左旋圆偏振光。在实际使用中，要满足 $\eta_0=0$，那么液晶层的相位延迟量应满足以下公式：

$$\frac{\pi\Delta nd}{\lambda}=m\pi+\frac{\pi}{2}(m=0,1,2\cdots\cdots)\ ,\tag{39}$$

此时 $\sum\eta_{n+1}=1$，由此可知当入射光为右旋或左旋圆偏振光时，理论上其在+1 级或−1 级的衍射效率可到 100%。

2015 年，Tabiryan 等人通过液晶偏振透镜的组合完成了激光束的准直与光学系统焦距的改变[70]。使用 PAAD 系列的光取向材料层通过旋涂在玻璃基板上创建液晶取向层。PAAD 系列的光取向材料的最佳吸收光的波长为 424 nm，使用 424 nm 的 He-Cd 激光器完成优化于 633 nm 波长的光控曝光工艺。在完成了曝光工艺的 PAAD 层上旋涂一层液晶单体溶液 RLCS-7，使用 365 nm 的波长和 90 mW/cm² 的非偏振紫外光进行光聚合，形成排列固定的液晶分子层。最后制作得到了一个直径为 7 mm，焦距为 460 mm 的用于偏光干涉实验，得到了如图 58 所示的相对相位延迟分布图，与理想的相对相位延迟分布几乎一致。

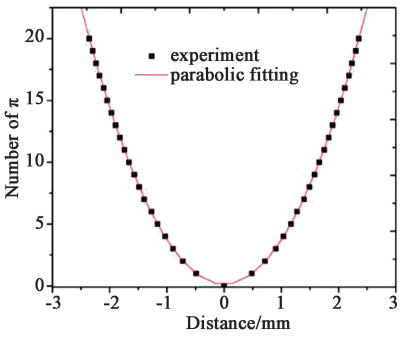


图 58 液晶偏振透镜的相位延迟分布[70]

Fig.58 Distribution of phase delay of LCPL[70]

实验中的透镜成像测试光学器件布置如图 59 所示，其中 He-Ne 激光器的波长为 632.8 nm。

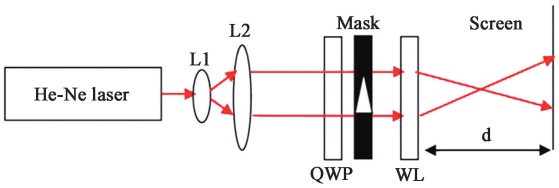


图 59　液晶偏振透镜成像测试系统[70]

Fig.59　Test system of imaging performance of LCPL[70]

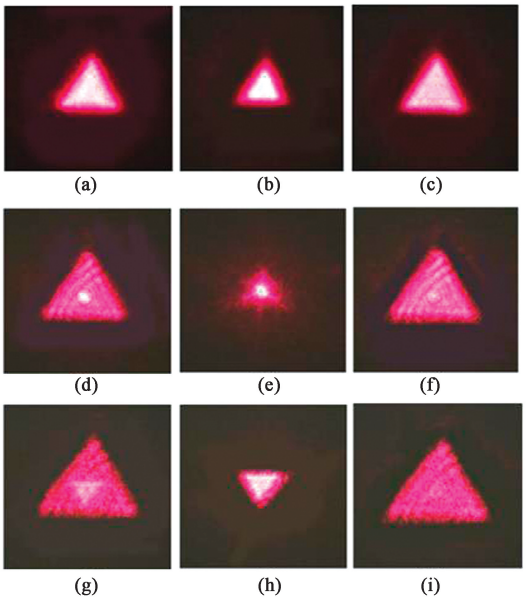


图 60　液晶偏振透镜成像表现。(a)～(c)无液晶偏振透镜；(d)～(f)成像面位于焦平面；(g)～(i)成像面位于离焦平面；(a)，(d)，(g)线偏振光；(b)，(e)，(h)右旋圆偏振光；(c)，(f)，(i)左旋圆偏振光[70]。

Fig.60　Imaging performance of the LCPL. (a)～(c) No LCPL; (d)～(f) Imaging plane is located in the focal plane; (g)～(i) Imaging plane is located in the out-of-focus plane; (a), (d), (g) Linearly polarized light; (b), (e), (h) Right-handed circularly polarized light; (c), (f), (i) Left-handed circularly polarized light[70].

成像测试结果如图 60 所示。

图 60(a)～(c)是无液晶偏振透镜下的成像图，(d)～(f)为在焦平面下的成像图，(g)～(i)为离焦时的成像图。(a)，(d)，(g)为线偏振光，(b)，(e)，(h)为右旋圆偏振光，(c)，(f)，(i)为左旋圆偏振光。由于线偏振光可分解为一对正交的圆偏振光，(d)，(g)出现液晶偏振透镜为正焦距与负焦距时的成像图。(b)与(e)说明液晶偏振透镜对右旋圆偏振入射光有汇聚作用，(c)与(f)说明液晶偏振透镜对左旋圆偏振入射光有发散作用。整体上，液晶偏振透镜成像质量良好。

根据液晶偏振透镜的原理，不同波长的入射光经液晶偏振透镜后有不同的衍射效率。分别入射波长为 632.8 nm 与 420 nm 的激光，成像图如图 61 所示。

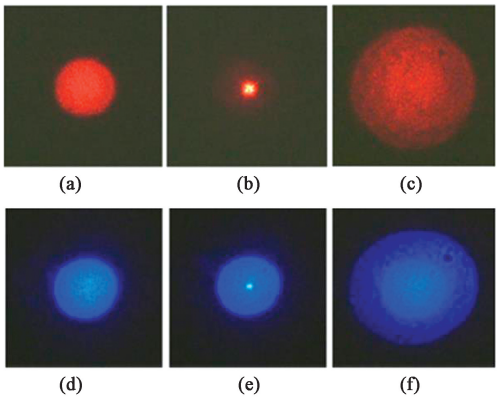


图 61　液晶偏振透镜成像表现。(a)，(d)无液晶偏振透镜；(b)，(e)右旋圆偏振光；(c)，(f)左旋圆偏振光[70]。

Fig.61　Imaging performance of LCPL. (a), (d) No LCPL; (b), (e) Right-handed circularly polarized light; (c), (f) Left-handed circularly polarized light[70].

由图可知液晶偏振透镜对于蓝光有比较严重的光泄露，由此可知液晶偏振透镜对于设计波长外的光线的衍射效率较低，意味着液晶偏振透镜成像色差较大。

5.3　消色差几何相位液晶透镜

2016 年，Tabiryan 提出了适用在 450～700 nm 和 650～1 000 nm 波段的宽工作波长液晶偏振透镜，衍射效率高达 90%，对比度高达 500∶1[71]。

衍射效率满足 $\eta>\eta_{\min}$ 的波长范围 $\Delta\lambda$ 可表示为

$$\Delta\lambda\approx\lambda_0(1-\eta_{\min})/2 \quad , \tag{40}$$

其中，λ_0 为满足半波条件的波长。$\Delta\lambda$ 为工作波长宽带，满足工作波长带宽即可满足最低的衍射效率。如果光轴方向沿轴向(即沿垂直于液晶偏振透镜平面)具有适当的空间依赖性，则有可能实现比上述方程更宽的工作波长实现更高的衍射效率涂层。Pancharatnam[72]引入了在光

轴之间以特定角度堆叠多个离散波片的想法，其中光轴方向沿轴向连续变化，以拓宽入射光的波长带宽。

适用波长在 450～700 nm，以 633 nm 为中心波长设计的消色差液晶偏振透镜的液晶层由两种相反手性的液晶聚合物组成，形成轴向的光轴方向双扭曲结构：第一聚合物层由溶液 RLCS-7/RH-VIS 以 1 100 r/min 的速度旋涂，然后第二层由溶液 RLCS-7/LH-VIS 以相同速度旋涂。适用波长在 650～1 000 nm 以上的近红外波段的消色差液晶偏振透镜使用 4 层液晶聚合物制作：第一层和第二层由溶液 RLCS-7/RH-NIR 以 1 200 r/min 的速度旋涂；第三层和第四层由溶液 RLCS-7/LH-NIR 以相同的转速旋涂。

分别对于普通的未消色差（优化波长为 633 nm）液晶偏振透镜与适用波长在 450～700 nm 的消色差液晶偏振透镜，实验使用 USB-4000 型光谱仪测量了波长为 475～700 nm 入射光的零级衍射（未衍射）的透射率，结果如图 62 所示，可知消色差液晶偏振透镜在 450～700 nm 波段中零级衍射几乎为零，而未消色差液晶偏振透镜只在特定的优化波长下实现零级衍射的低透射率，在其他波段有着较高的零级衍射透过率。

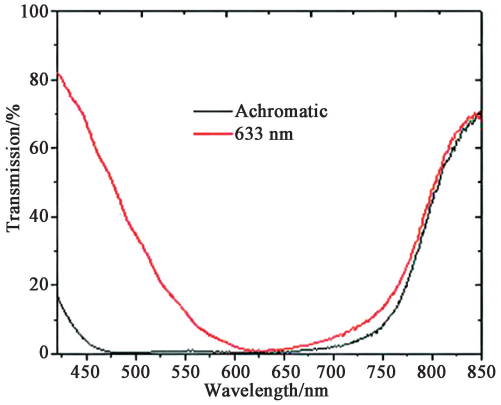


图 62 入射光波长为 450～700 nm 的零级衍射透射率分布。“633 nm”：优化波长为 633 nm 的未消色差液晶偏振透镜；“Achromatic”：适用在 450～700 nm 的消色差液晶偏振透镜[71]。

Fig.62 Transmittance of zero-order diffraction as a function of the incident light-wavelength of 450～700 nm. “633 nm”: chromatic LCPL with optimized wavelength of 633 nm; “Achromatic”: achromatic LCPL for 450～700 nm[47].

实验分别使用 633，514，488，457 nm 和普通准直白光源以左旋圆偏振光或右旋偏振光照射未经消色差与消色差的液晶偏振透镜，结果如图 63 所示：从图 63(b，c)列可知，在各波长入射的激光中，未消色差（针对波长 633 nm 优化）的液晶偏振透镜在聚焦光线中出现原始入射光束直径大小的泄露光（零级衍射光），而对于消色差液晶偏振透镜，不同波长的入射激光成像良好，没有出现肉眼可见的光泄露现象，说明透对可见光的衍射效率较高，在透镜实物成像时色差较小。在成像测试中其焦距为－316 mm 或 316 mm。

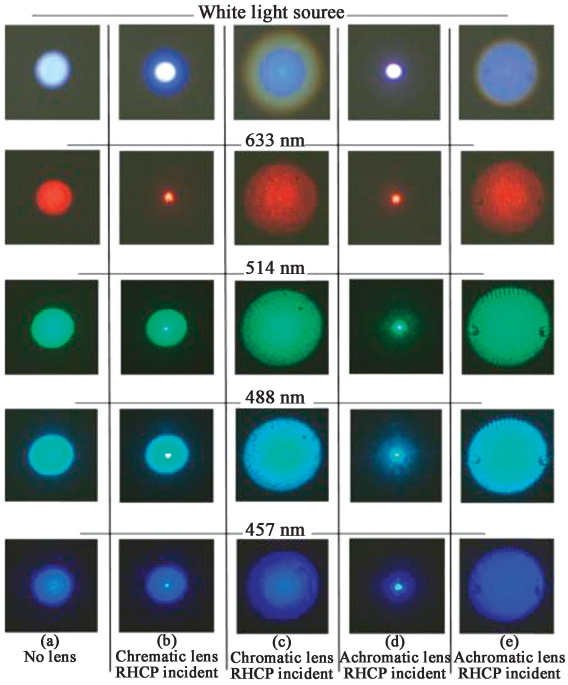


图 63 液晶偏振透镜成像表现：第 1～5 行：白光源，633，514，488，457 nm；(a)无液晶偏振透镜；(b，c)未消色差液晶偏振透镜；(d，e)消色差液晶偏振透镜[71]。

Fig.63 Imaging performance of LCPL: rows 1～5: white light, 633, 514, 488, 457 nm; (a) No LCPL; (b,c) Chromatic LCPL; (d,e) Achromatic LCPL[71].

为了定量描述消色差液晶偏振透镜的适用波段，使用波长为 457，488，514，633 nm 的入射光经不同角度的 1/4 波片入射到消色差液晶偏振透镜，记录透射光功率，得到图 64 结果。由图可知，在 1/4 波片快轴与入射光偏振方向成－45°夹角（右旋圆偏振光）与 45°夹角（左旋圆偏振光）时，透射光功率最高和最低，其中除了 633 nm 波长

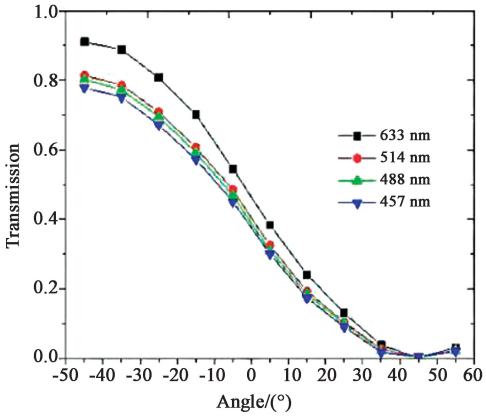


图 64　不同波长的光的透射率随 1/4 波片角度的分布[71]

Fig. 64　Transmittance of light at different wavelengths as a function of the angle of quarter wave plate[71]

的入射光，其余波长的入射光都有不同程度的光泄露。

对于近红外光消色差液晶偏振透镜分别测定了其刚制备完成时和制备完成 26 个月后，在 650～1 000 nm 波长的入射光的零级衍射透过率，结果如图 65，表明制造后立即测量的该透镜的零级泄漏在至少 650～1 000 nm 的波长范围内低于 2%。然而，在制造后的 26 个月后，这种泄漏增加了几个百分点。LCP 材料的光学特性随时间的这种变化可能是由于不完全聚合所致。

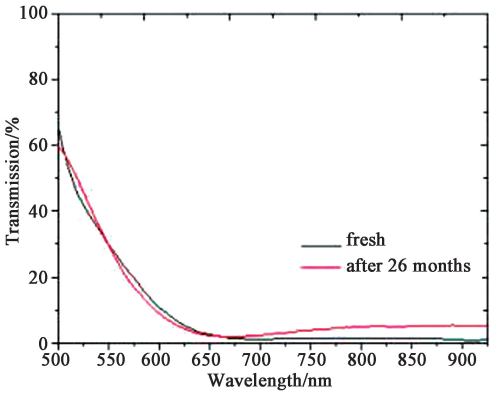


图 65　刚制备完成和制备完成后 26 个月的消色差液晶偏振透镜在波长为 650～1 000 nm 的入射光下的透过率分布[71]

Fig. 65　Transmittance of the achromatic LCPL in fresh and 26 months after preparation as a function of light with wavelength of 650～1 000 nm[71]

5.4　液晶偏振变焦透镜的组合设计

2020 年，魏如东等人使用主动式液晶偏振透镜组合获得多焦距的清晰成像[69]。主动式液晶偏振透镜的制备与上述[70-71]的被动式液晶偏振透镜的制备方式稍有不同，在已进行光取向的聚合物层上覆盖着 ITO 层，制成空液晶盒后利用毛细作用将液晶灌入盒中，经封盒工序后制备完成。

液晶偏振透镜成像测试系统布置如图 66 所示，经分辨率板与液晶波片的入射光被液晶偏振 L1、液晶偏振透镜 L2 和透镜 L0 后，入射至成像透镜 L3 后在 CCD 成像。液晶波片的作用为改变光线的偏振态，制备得到的两个液晶偏振透镜的焦距分别为 143 mm 和 196 mm，有效孔径为 18 mm，F 数分别为 7.94 和 11，透镜 L0 与液晶偏振透镜 L1 的距离 d_{01} 为 9.5 mm，两液晶偏振透镜间的距离 d_{12}。

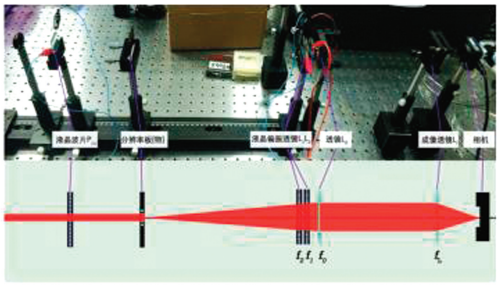


图 66　测试液晶偏振透镜成像表现的实验光路[69]

Fig. 66　Optical path for testing the imaging performance of LCPL[69]

通过驱动电压控制液晶波片与两个液晶偏振透镜，其中液晶偏振透镜的驱动电压为 5.3 V，透镜组合成像系统得到 7 个不同的系统焦距，分别将分辨率板置于液晶偏振透镜 L1 前 48.3，59.4，64.8，83.8，108.5，145.3，237.5 mm 处，透镜组合成像图如图 67 所示，在不同焦距处，基本保证了成像的清晰度，但各焦距处成像亮度不一致，制作工艺需要进一步提高。

尽管液晶偏振透镜有着自身独特的优势，比如高衍射效率、可消色差、成像质量良好等优点，但同时也存在着不少的缺点，比如焦距不可调、由于工作原理引起相位调制能力难以提高等问题。上述列举的完整电极或无极型液晶透镜的参数对比如表 5 所示。

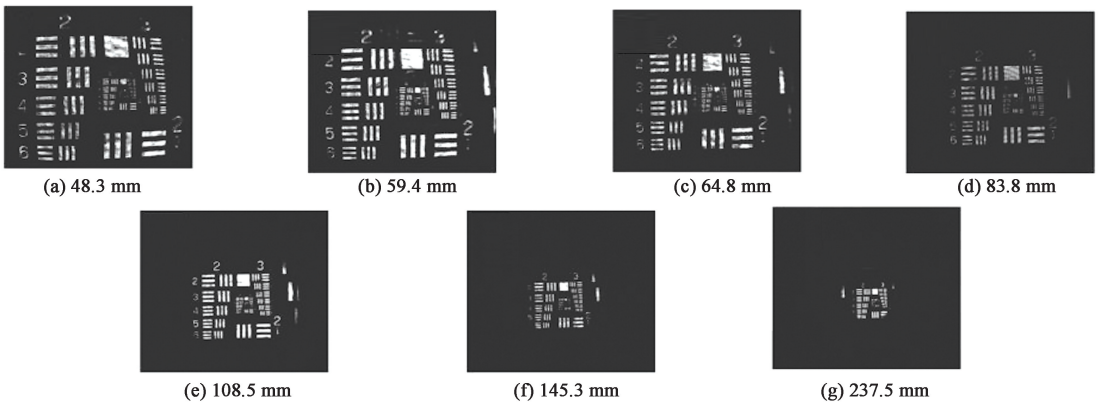


图 67 不同焦距时液晶偏振透镜的成像表现[69]

Fig.67 Imaging performance of LCPC at different focal lengths[69]

表 5 完整电极或无电极型液晶透镜的参数总结

Tab.5 Parameter summary of liquid crystal lens driven by complete electrode layer or no electrode layer

驱动电极类型	特点	孔径/mm	液晶层厚度/μm	最大光焦度/m^{-1}	驱动电压/V_{rms}	聚焦(恢复)/ms	年份
完整电极层或无电极层	非均匀 nano-PDLC 实现偏振无关透镜[67]	0.6	11.2	无	100	无	2002
	液晶偏振透镜组合成像[69]	18	5	6.9/5.1	5.3	无	2020
	几何相位液晶透镜[70]	4	无	5.3	无	无	2015
	消色差几何相位液晶透镜[71]	25	无	3.2	无	无	2016

6 总结与展望

自 1979 年液晶透镜被发明以来,其结构与材料不断更新与迭代,其性能也随着应用需求不断提高。梯度折射率液晶透镜的设计难点首先在于电极的形状与布局,它影响着形成的梯度电场的质量,其次为相位调制深度低,调焦能力弱问题,最后为偏振相关性强,其影响入射光的透射率以及限制了液晶透镜的应用。本文总结了 4 种电极分布的液晶透镜。

第一种利用边缘电场原理实现连续梯度电场,从使用单层圆孔电极到双层、三层圆孔电极,最后加入悬浮电极来进一步提高液晶透镜的有效折射率可调性。利用边缘电场驱动的液晶透镜制作简便,驱动简单。对于液晶透镜偏振相关性强的问题,也可使用 nano-PDLC、正交取向液晶层、聚合物稳定的蓝相液晶等多种方法实现偏振无关,提高了入射光的透射率,成像亮度大幅提高,同时减少了液晶透镜的重量与体积,扩展了应用范围,但透镜的孔径大小受限,一般小于 1 mm。对于透镜聚焦能力弱的问题,首先可以通过增加液晶层的厚度来提高其相位调制深度,但也会引起液晶响应时间较长与高驱动电压等问题。其次也可引入具有高双折射率的液晶分子作为液晶透镜的材料以提高液晶透镜的调焦能力[73-75]。另外,随着复合型液晶透镜的出现,偏振与相位可调型液晶透镜可通过对入射光偏振方向的改变可实现低电压驱动(一般小于 10 V_{rms})、快速响应时间(一般为 10 ms)以及大孔径,并保持着较好的相位调制能力,缺点在于焦距不可调,只能实现开启与关闭聚焦两种状态,可通过透镜组合来实现多焦段成像。

第二种为离散多电极型液晶透镜,它的研究重点在于优化电极间隙和电极引出线的布局以提高电场的连贯性。离散的多电极布局支持高达

15 mm 的透镜孔径，单个电极的驱动电压一般为 0～5 V_{rms}，多电极布局可更精准地调控透镜的波前面形状降低像差。随着离散电极数量的增多只能接近连续电场，不连续的电场使成像存在噪声，画面清晰度下降，实际应用中应按照要求平衡制作工艺难度与成像质量。

第三种为高阻层电极型液晶透镜，它的研究点在于调节透镜的结构以寻找理想的折射率分布。其驱动电压一般在 10 V_{rms} 以下，简单的驱动方式和低功耗使它拥有更广阔的应用范围。它利用电压的幅值与频率来驱动液晶透镜形成连续的电场分布，在成像方面比前两种液晶透镜有优势，但想要精确控制透镜局部电场的设计与工艺难度比较大。

第四种为完整电极层或无电极层液晶透镜，主要为几何相位透镜，也称为液晶偏振透镜。它有着大孔径、低电压驱动、快速响应时间、高衍射效率等优点，另外，还可使用轴向的光轴方向双扭曲结构实现消色差。缺点一为其焦距不可调，无法适用更多的应用领域，也可以通过组合透镜的形式来实现多焦段成像；二为相位调制深度低，调焦能力弱等问题。

梯度折射率液晶透镜作为一种新型的光学可变焦透镜，相比传统的固体光学透镜具有体积与重量小等优点，更适合应用在精密医疗、超便携影像记录仪等设备上[76]。我们都知道单个球面透镜在成像时是一定存在球差的，实际应用中需要搭配两个或两个以上球面透镜按照特定的放置才能将球差消除。近年来利用非对称复杂光学研究出来的自由曲面光学透镜可以根据实际应用在单独成像时消除像差[77]。这种光学透镜的设计与加工工艺往往非常困难，只应用在高端的成像设备上。由于梯度折射率液晶透镜折射率分布可控，它可以根据实际成像要求来调节透镜折射率的分布，可单独降低像差。另一方面，梯度折射率液晶透镜也存在需要克服的缺点。第一，制作高成像质量的液晶透镜时需要面对光刻电极图案精度、盒厚的均一性、液晶洁净度、摩擦取向精度等工艺流程，工艺制作误差会增大透镜成像的像差，导致成像质量下降。第二，液晶透镜的组件一般包括 ITO 玻璃层、PI 层、液晶层、电极层，各层的透过率与反射率都不一致，入射光经过液晶透镜的各层结构后会发生光强损失和漫反射，液晶透镜需要克服其结构组件所带来的透过率的下降与反射率的上升问题。第三，液晶透镜的偏振相关性强，导致在结构元件中需加入偏振片，这降低了成像亮度，增加了液晶透镜的体积与重量，不利用液晶透镜的实际应用。虽然在发展过程中逐渐研究出偏振无关的液晶透镜，但其偏振无关化程度还未达到可以商用的水平。第四，液晶透镜的相位调制深度低，调焦能力普遍较弱，限制了液晶透镜的应用范围，虽增加液晶层与使用复合型液晶透镜可提高其调焦能力，但也带来了高功耗与焦距不可调等问题。本文总结所列举的液晶透镜的孔径、液晶层厚度、光焦度、驱动电压大小、聚焦响应时间等参数，让读者简单、清晰，直观地了解和掌握电控折射率液晶透镜的发展历程与未来发展方向，读者更直观更简洁得到结论。

综合上述的梯度折射率液晶透镜的发展趋势，可以预见精确的电场控制、透光率更高的结构组件与具有高双折射率的液晶材料、偏振无关化是今后液晶透镜的核心发展方向。液晶透镜会朝着高成像质量、高透过率、强调焦能力、低变焦响应时间、低功耗的目标发展以得到更广阔的应用市场。

参　考　文　献：

[1] LIN Y H, WANG Y J, RESHETNYAK V. Liquid crystal lenses with tunable focal length [J]. *Liquid Crystals Reviews*, 2017, 5(2): 111-143.

[2] 内奥米·罗森布拉姆.世界摄像史[M].田彩霞，吴晓凌，译.北京：中国摄影出版社，2012.
ROSENBLUM N.*A World History of Photography* [M]. TIAN C X, WU X L, trans. Beijing: China Photographic Publishing House, 2012. (in Chinese)

[3] IVANOV A V. Automatic computation of displacements of zoom lens movable components [C]//*Proceedings of SPIE* 3780, *Optical Design and Analysis Software*. Denver: SPIE, 1999: 191-198.

[4] ZHANG D Y, JUSTIS N, LO Y H. Fluidic adaptive zoom lens with high zoom ratio and widely tunable field of view [J]. *Optics Communications*, 2005, 249(1/3): 175-182.

[5] LENK L, MITSCHUNAS B, SINZINGER S. Zoom systems with tuneable lenses and linear lens movements [J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2019, 15(1): 9.

[6] NEIL I A. Review of recent zoom lens developments for 35 mm cinematography at panavision [J]. *Optical Review*, 2001, 8(4): 214-217.

[7] 李林.应用光学[M].4 版.北京:北京理工大学出版社,2010.
LI L. *Applied Optics* [M]. 4th ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010. (in Chinese)

[8] LIN C H, CHEN C H, CHIANG R H, *et al*. Dual-frequency liquid-crystal lenses based on a surface-relief dielectric structure on an electrode [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(24): 1875-1877.

[9] 陈明璿,陈柏儒,林怡欣.基于液晶透镜的电控式光学影像缩放系统[J].液晶与显示,2015,30(3):375-380.
CHEN M S, CHEN P J, LIN Y S. Electrically tunable optical zoom system based on liquid crystal lenses [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(3): 375-380. (in Chinese)

[10] STATHAM M M, WILLGING J P. Automated high-level disinfection of nonchanneled flexible endoscopes: duty cycles and endoscope repair [J]. *The Laryngoscope*, 2010, 120(10): 1946-1949.

[11] KAWAMATA T, KAMIKAWA S, ISEKI H, *et al*. Flexible endoscope-assisted endonasal transsphenoidal surgery for pituitary tumors [J]. *Minim Invasive Neurosurg*, 2002, 45(4): 208-210.

[12] JIN Y H, KO K W, LEE W H. An indoor location-based positioning system using stereo vision with the drone camera [J]. *Mobile Information Systems*, 2018, 2018: 5160543.

[13] MENG L, HIRAYAMA T, OYANAGI S. Underwater-drone with panoramic camera for automatic fish recognition based on deep learning [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 17880-17886.

[14] 孙士祥,王永,陈羽.液晶显示技术[M].北京:化学工业出版社,2013.
SUN S X, WANG Y, CHEN Y. *LCD Technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013. (in Chinese)

[15] ZHAO C H, SHI Y P, LI W J, *et al*. Research on one manual zoom liquid lens [C]//*Proceedings of SPIE 8002, MIPPR 2011: Multispectral Image Acquisition, Processing, and Analysis*. Guilin: SPIE, 2011: 800205.

[16] CHENG Y, CAO J, TANG X, *et al*. Optical zoom imaging systems using adaptive liquid lenses [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2021, 16(4): 041002.

[17] ZHANG W, LI D, GUO X. Optical design and optimization of a micro zoom system with liquid lenses [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2013, 17(5): 447-453.

[18] WANG D, XU J B, YUAN R Y, *et al*. High stability liquid lens with optical path modulation function [J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27104-27117.

[19] KNITTEL J, RICHTER H, HAIN M, *et al*. A temperature controlled liquid crystal lens for spherical aberration compensation [J]. *Microsystem Technologies*, 2007, 13(2): 161-164.

[20] OZBEK H, USTUNEL S, KUTLU E, *et al*. A simple method to determine high-accuracy refractive indices of liquid crystals and the temperature behavior of the related optical parameters via high-resolution birefringence data [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2014, 199: 275-286.

[21] SATO S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1979, 18(9): 1679-1684.

[22] NOSE T, MASUDA S, SATO S. Optical properties of a hybrid-aligned liquid crystal microlens [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1991, 199(1): 27-35.

[23] WANG B, YE M, YAMAGUCHI M, *et al*. Thin liquid crystal lens with low driving voltages [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, 48(9R): 098004.

[24] WANG B, YE M, HONMA M, *et al*. Liquid crystal lens with spherical electrode [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41(11A): L1232.

[25] HWANG Y S, YOON T H, KIM J C. Design and fabrication of variable focusing lens array using liquid crystal for integral photography [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, 42(10R): 6434-6438.

[26] NEVSKAYA G E, TOMILIN M G. Adaptive lenses based on liquid crystals [J]. *Journal of Optical Technology*, 2008, 75(9): 563-573.

[27] JAMALI A, BRYANT D, BHOWMICK A K, *et al*. Large area liquid crystal lenses for correction of presbyopia

[J]. *Optics Express*, 2020, 28(23): 33982-33993.

[28] GLEESON H F, KAUR S. Liquid crystal contact lenses with graphene electrodes and switchable focus [J]. *MRS Advances*, 2016, 1(52): 3509-3515.

[29] WANG B, YE M, SATO S. Liquid crystal lens with stacked structure of liquid-crystal layers [J]. *Optics Communications*, 2005, 250(4/6): 266-273.

[30] YE M, YOKOYAMA Y, SATO S. Liquid crystal anamorphic lens [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(1R): 235-236.

[31] YE M, WANG B, UCHIDA M, *et al*. Low-voltage-driving liquid crystal lens [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(10R): 100204.

[32] TAKAHASHI T, WANG B, YE M, *et al*. Aberration measurements of a liquid crystal lens prepared using a glass lens and liquid crystal layers [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(5R): 3013-3015.

[33] KAWAMURA M, ITO Y. Liquid crystal lens with double circularly hole-patterned electrodes [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2011, 542(1): 176/[698]-181/[703].

[34] WANG B, YE M, SATO S. Liquid crystal negative lens [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(7R): 4979-4983.

[35] CHAO P C P, KAO Y Y, HSU C J. A new negative liquid crystal lens with multiple ring electrodes in unequal widths [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(1): 250-266.

[36] WANG B, YE M, SATO S. Liquid crystal lens with focal length variable from negative to positive values [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(1): 79-81.

[37] HSU C J, JHANG J J, HUANG C Y. Large aperture liquid crystal lens with an imbedded floating ring electrode [J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16722-16731.

[38] REN H W, FAN Y H, WU S T. Liquid-crystal microlens arrays using patterned polymer networks [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(14): 1608-1610.

[39] PRESNYAKOV V V, GALSTIAN T V. Electrically tunable polymer stabilized liquid-crystal lens [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(10): 103101.

[40] LIN H C, LIN Y H. An electrically tunable focusing liquid crystal lens with a built-in planar polymeric lens [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(8): 083503.

[41] REN H W, LIN Y H, FAN Y H, *et al*. Polarization-independent phase modulation using a polymer-dispersed liquid crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(14): 141110.

[42] GUI K, ZHENG J H, WANG K N, *et al*. Electrically controlled fast response cascading tunable polymer dispersed liquid crystal focusing lenses [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2013, 55(12): 2830-2835.

[43] YE M, SATO S. Liquid crystal lens with insulator layers for focusing light waves of arbitrary polarizations [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, 42(10R): 6439-6440.

[44] LIN Y H, CHEN H S, LIN H C, *et al*. Polarizer-free and fast response microlens arrays using polymer-stabilized blue phase liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(11): 113505.

[45] REN H W, XU S, LIU Y F, *et al*. Switchable focus using a polymeric lenticular microlens array and a polarization rotator [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 7916-7925.

[46] MUN B J, BAEK J H, LEE J H, *et al*. Low cell gap polymeric liquid crystal lens for 2-D/3-D switchable autostereoscopic display [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, 60(10): 3430-3434.

[47] ZHU R D, XU S, HONG Q, *et al*. A polymer lens embedded 2D/3D switchable display with dramatically reduced crosstalk [J]. *SID Symposium: Digest of Technology Papers*, 2014, 45(1): 1363-1366.

[48] KAO Y Y, CHAO P C P, HSUEH C W. A new low-voltage-driven GRIN liquid crystal lens with multiple ring electrodes in unequal widths [J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 18506-18518.

[49] LEE C T, LI Y, LIN H Y, *et al*. Design of polarization-insensitive multi-electrode GRIN lens with a blue-phase liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17402-17407.

[50] JEONG I H, YU J H, LIM Y J, *et al*. Improving profile of multi-electrode Fresnel-type liquid crystal lens utilizing local control of pretilt angle [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 53(6): 068003.

[51] CHU F, DOU H, TIAN L L, *et al*. A polarization-independent blue phase liquid crystal lens array with multi-electrode [J]. *SID Symposium: Digest of Technology Papers*, 2018, 49(1): 1725-1727.

[52] 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.

[53] LEE C R, LO K C, MO T S. Electrically switchable Fresnel lens based on a liquid crystal film with a polymer relief pattern [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(7R): 4144-4147.

[54] HUNG W C, CHEN Y J, LIN C H, *et al*. Sensitive voltage-dependent diffraction of a liquid crystal Fresnel lens [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(11): 2094-2098.

[55] WEI X P, ZHENG J H, WANG Y N, *et al*. Multi-imaging characteristics of electrically controlled on-axis holographic polymer-dispersed liquid-crystal Fresnel lens [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(3): 037110.

[56] LOU Y M, LIU Q K, WANG H, *et al*. Rapid fabrication of an electrically switchable liquid crystal Fresnel zone lens [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(26): 4995-5000.

[57] LI G Q, MATHINE D L, VALLEY P, *et al*. Switchable electro-optic diffractive lens with high efficiency for ophthalmic applications [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(16): 6100-6104.

[58] LI G Q, VALLEY P, GIRIDHAR M S, *et al*. Large-aperture switchable thin diffractive lens with interleaved electrode patterns [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(14): 141120.

[59] LI G Q, VALLEY P, ÄYRÄS P, *et al*. High-efficiency switchable flat diffractive ophthalmic lens with three-layer electrode pattern and two-layer via structures [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(11): 111105.

[60] 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.

[61] VDOVIN G V, GURALNIK I R, KOTOVA S P, *et al*. Liquid-crystal lenses with a controlled focal length. II. Numerical optimisation and experiments [J]. *Quantum Electronics*, 1999, 29(3): 261-264.

[62] FRAVAL N, DE BOUGRENET DE LA TOCNAYE J L. Low aberrations symmetrical adaptive modal liquid crystal lens with short focal lengths [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(15): 2778-2783.

[63] 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.

[64] 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 W X, YU T, WANG W Z, *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. (in Chinese)

[65] PUSENKOVA A, GALSTIAN T. Electrically tunable liquid crystal lens in extreme temperature conditions [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2020, 703(1): 39-51.

[66] CHEN H S, WANG Y J, CHANG C M, *et al*. A polarizer-free liquid crystal lens exploiting an embedded-multilayered structure [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(8): 899-902.

[67] REN H W, WU S T. Inhomogeneous nanoscale polymer-dispersed liquid crystals with gradient refractive index [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(19): 3537-3539.

[68] HONMA M, NOSE T. Liquid-crystal Fresnel zone plate fabricated by microrubbing [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, , 2005, 44(1R): 287-290.

[69] 魏如东,穆全全,王启东,等.液晶偏振变焦透镜组合设计[J].液晶与显示,2020,35(7):741-748.
WEI R D, MU Q Q, WANG Q D, *et al*. Design of liquid crystal polarization zoom lens [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 741-748. (in Chinese)

[70] TABIRYAN N V, SERAK S V, ROBERTS D E, *et al*. Thin waveplate lenses of switchable focal length-new generation in optics [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25783-25794.

[71] TABIRYAN N V, SERAK S V, NERSISYAN S R, *et al*. Broadband waveplate lenses [J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7091-7102.

[72] PANCHARATNAM S. Achromatic combinations of birefringent plates. Part I. An achromatic circular polarizer [J]. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section A*, 1955, 41(4): 130-136.

[73] BAILEY J, MORGAN P B, GLEESON H F, *et al*. Switchable liquid crystal contact lenses for the correction of presbyopia [J]. *Crystals*, 2018, 8(1): 29.

[74] ZHAO Y Z, LI K X, DING S Y, *et al*. Advanced electro-optic properties of nematic liquid crystal doped with high birefringence liquid crystal molecules [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2017, 658(1): 120-125.

[75] WU S T, HSU C S, SHYU K F. High birefringence and wide nematic range bis-tolane liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(3): 344-346.

[76] LIN C F, FANG Y B, SU W C. Design of LED free-form lens for sensor systems [J]. *Sensors and Materials*, 2020, 32(6): 2177-2185.

[77] LIN Y H, CHEN H S, CHEN M S, *et al*. Liquid crystals for ophthalmic lenses and biosensing applications [J]. *SID Symposium: Digest of Technology Papers*, 2014, 45(1): 563-566.

作者简介：



苏树钊(1996—)，男，广东江门人，硕士研究生，2019 年于五邑大学获得学士学位，主要从事液晶透镜成像优化方面的研究。E-mail：1241541822@qq.com



姜海明(1976—)，男，辽宁阜新人，博士，教授，2011 年于电子科技大学获得博士学位，主要从事光电子器件、光纤技术和测控技术等方面的研究。E-mail：hmjiang@gdut.edu.cn