

文章编号:1007-2780(2020)07-0749-13

液晶微透镜阵列研究进展

蔡文锋, 李怡霏, 蒋浩东, 罗 丹, 刘言军*

(南方科技大学 电子与电气工程系, 广东 深圳 518055)

摘要:液晶微透镜阵列作为基本的光学元件之一,具有焦距可调、结构紧凑、低功耗、稳定性好等优点,在微纳光学领域有广泛的应用。经过近 40 年的发展,液晶微透镜阵列的研究日趋成熟,不同结构形式和应用于不同场景的液晶微透镜阵列层出不穷。本文系统总结了液晶微透镜阵列的 3 种工作原理,并对近年来的研究进展分类进行描述,重点放在液晶微透镜的制作过程、结构特点和工作原理,具体介绍了基于光的折射和衍射原理的液晶微透镜阵列,涉及透镜结构、液晶取向技术以及透镜阵列的应用等方面。最后总结了液晶微透镜阵列存在的问题和发展趋势。

关键词:微纳光学;液晶器件;微透镜阵列;可调焦距

中图分类号:TH74 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/YJYXS20203507.0749

Research progress of liquid crystal microlens arrays

CAI Wen-feng, LI Yi-fei, JIANG Hao-dong, LUO Dan, LIU Yan-jun*

(Southern University of Science & Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Liquid crystal microlens arrays, as one of the basic optical elements, have the advantages of tunable focal length, compact structure, low power consumption and good stability. They have a wide range of applications in the field of micro-/nano-optics. After nearly 40-year development, the research on liquid crystal microlens arrays has become gradually matured. Liquid crystal microlens arrays with different structures and applications have emerged rapidly. Here, this review article briefly summarizes the three working principles of liquid crystal microlens arrays, and describes the recent research progress separately. The review focuses on the manufacturing process, structural characteristics and working principle of liquid crystal microlens. Particularly, liquid crystal microlens arrays based on refraction and diffraction principles are respectively discussed, involving microlens structures, liquid crystal alignment techniques, as well as their applications. Finally, the key issues and future development trends of liquid crystal microlens arrays are summarized.

Key words: micro-/nano-optics; liquid crystal device; microlens arrays; tunable focal length

收稿日期:2020-03-25;修订日期:2020-04-01.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61805113);广东省自然科学基金项目(No. 2017A030313034, 2018A030310224);深圳市科技计划项目(No. JCYJ20170817111349280, No. JCYJ20180305180635082, No. GJHZ20180928155207206)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61805113); Natural Science Foundation of Guangdong Province(No.2017A030313034, No.2018A030310224); Shenzhen Science and Technology Innovation Commission (No. JCYJ20170817111349280, No. JCYJ20180305180635082, No. GJHZ20180928155207206)

* 通信联系人, E-mail: yjliu@sustech.edu.cn

1 引言

微纳光学是光学领域的前沿学科方向,也是当前新型光电子产业的重要支撑点之一。而微透镜阵列作为基本的微纳光学器件之一,具有重要的应用价值。可调谐微透镜阵列实现了焦距可调,进一步扩大了微透镜阵列的应用范围。可调谐微透镜就结构而言可分为两类,一类是主体由各向同性的液体组成,将其封装在一层弹性的薄膜内,通过外部的各种形式的激励(声、热、电、机械等)来调节透镜的曲率,从而调节焦距^[1];另一类是主体由各向异性的液体(主要是液晶)组成,利用液晶的电光效应调节折射率梯度分布从而调节焦距^[2-6]。液晶微透镜相比于前者有很多独特的优势:首先,一般而言,液晶微透镜是平整的且厚度很薄,因此不受重力的影响。其次,利用液晶微透镜时,可以更加精确地调节梯度折射率分布,从而可以减少像差。另外它还有低功耗和良好的稳定性等优点。

尽管人们对液晶微透镜阵列(Liquid crystal microlens arrays, LCMLA)的研究已经接近 40 年,它仍然是一个研究热点,原因在于其十分广泛的应用。液晶微透镜可用于便携式设备(手机、相机等)的自动变焦系统、微型投影系统,同时,液晶微透镜利用电压控制来取代机械控制可更好地调整成像效果^[7]。在全息投影系统中,液晶微透镜可以用来矫正彩色图像的失配,这在全彩全息投影系统中是非常重要的^[8]。此外,液晶微透镜还可以用于 3D 显示^[9-17]和波前检测与校正^[18]。在太阳能系统中,液晶透镜可以用来追踪和聚焦太阳光以提高效率^[19]。液晶隐形眼镜可以调节屈光度,满足老花眼患者的需求^[20]。总之,液晶微透镜阵列在成像系统、光学连接、光通信、激光阵列、光信号处理、生物医学检测等方面具有广阔的应用前景^[6]。

鉴于液晶微透镜阵列的重要性及其广泛应用,本文归纳总结了其近年来的重要发展,并针对目前的挑战展望未来的发展方向。

2 液晶微透镜阵列基本原理

液晶微透镜根据其工作原理大致可分为两大

类:一类基于光的折射原理;另一类基于光的衍射原理。后者最典型的例子是非涅尔透镜。更多的是基于光的折射原理设计的液晶微透镜。而这一类液晶微透镜又可分为两类:一类是通过电极产生不均匀的电场来调控液晶分子的偏转角,从而产生梯度折射率分布(Gradient refractive index, GRIN);一类是利用液晶分子的双折射性质和入射光的偏振方向来控制透镜的焦距,称为折射率匹配。下面将简单介绍这 3 种液晶微透镜的工作原理。

2.1 梯度折射率分布

向列相液晶(Nematic LCs)由于其棒状的分子结构而具有光学和介电各向异性。在液晶盒中,通过取向使得液晶分子会呈现大致平行的排列,液晶分子取向方向称为指向矢(Director)。偏振方向平行指向矢的入射偏振光会遵从非寻常折射率(n_e),而偏振方向垂直指向矢的偏振光会遵从寻常折射率(n_o)。如果入射光的偏振方向与指向矢之间的角度为 θ ,则此时入射光会遵从有效折射率(n_{eff}),表示为:

$$n_{\text{eff}} = \frac{n_e n_o}{\sqrt{(n_e \sin \theta)^2 + (n_o \cos \theta)^2}}, \quad (1)$$

如图 1 所示,当电极施加一定的电压后,会产生不均匀的电场。由于液晶的介电各向异性,液晶分子会沿着电场线的方向重新排列。理想情况下,在液晶透镜中央的液晶分子呈水平排列,而透镜边缘的液晶分子呈垂直排列,其他部分液晶分子的角度从水平平缓过渡到垂直,这样就能产生一个梯度折射率分布,进而产生聚光的效果。这个原理和常用的凸透镜是一样的。反之,则为凹透镜。理想透镜的梯度折射率分布是抛物线型的,

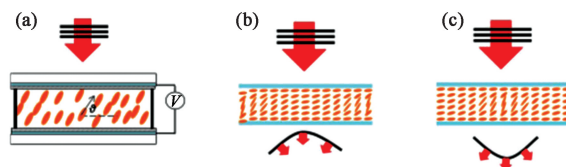


图 1 基于梯度折射率分布的液晶微透镜工作原理。(a) 液晶分子转动角度 θ , 入射光遵从有效折射率 n_{eff} ; (b) 液晶凸透镜; (c) 液晶凹透镜^[2]。

Fig.1 Operation principle of a GRIN-based nematic LC lens. (a) LC directors are reoriented by a θ angle and the incident light sees n_{eff} ; (b) positive LC lens; (c) Negative LC lens^[2].

因此许多科学家尝试用各种方法实现抛物线型的梯度折射率分布。

2.2 折射率匹配

利用折射率匹配原理的液晶微透镜阵列示意图如图2所示。微透镜由带有一定曲率的各向同性的聚合物层和液晶层组成。图2(a)在没有加电压的情况下,由于偏振光通过液晶层时折射率为 n_o ,近似于聚合物层的折射率,因此没有聚焦的特性。图2(b)在TN盒施加电压时,入射光的偏振方向发生转变,此时偏振光通过液晶层折射率为 n_e ,大于聚合物层的折射率,因此表现为凸透镜。利用折射率匹配原理制作的液晶微透镜阵列由于具有开关特性,可用于2D/3D视觉切换的应用中。

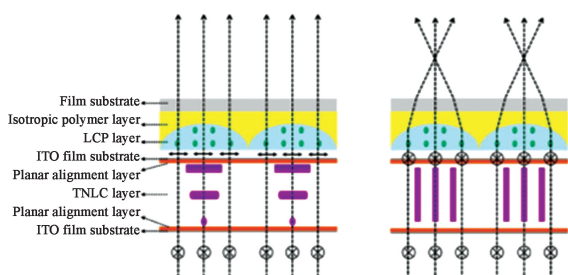


图2 基于折射率匹配的液晶微透镜工作原理^[12]

Fig.2 Operation principle of a nematic LC lens based on the index match^[12]

2.3 基于衍射原理的液晶菲涅尔透镜

液晶菲涅尔透镜示意图如图3所示。菲涅尔透镜有两种类型:一种是具有浮雕圆环结构的折射型,另一种是具有奇偶半波带的菲涅尔波带片的衍射型。折射型菲涅尔透镜可以减小透镜的厚度,增大透镜的孔径,光学效率较高,但其需要复杂的取向技术。衍射型菲涅尔透镜包括振幅型和相位型。振幅型的半波带是透明和不透明相互交替,通常其光学效率较低。相位型的奇偶半波带之间的相位差为 π ,制造这种透镜的关键是精确地控制奇数环和偶数环的相位差,这可通过液晶多方向取向、同心圆环电极、或者表面结构来实现。同时,还可以将折射和衍射结合起来,制成折射-衍射型相位菲涅尔透镜(也称为闪耀-相位菲涅尔波带片),如此可以有效提高聚焦的光学效率^[3]。液晶分子按照菲涅尔透镜波带片的位置来取向,以此得到相邻波带片的相位差。

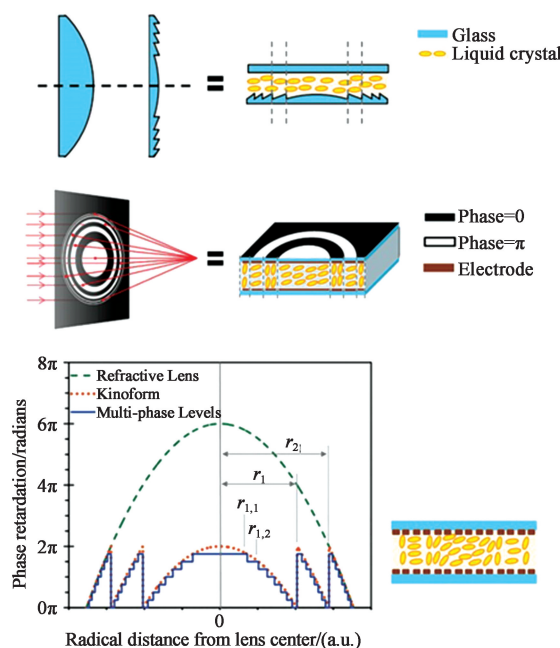


图3 液晶菲涅尔透镜工作原理^[3]

Fig.3 Operation principle of a Fresnel LC lens^[3]

3 液晶微透镜阵列研究进展

3.1 基于折射原理的液晶微透镜阵列

3.1.1 图案电极

(1)同心圆环电极

同心圆环电极液晶微透镜的每一个不同的圆环电极都可以施加不同大小的电压,因此可以产生不均匀的电场。在不均匀电场的驱动下,液晶分子发生不同角度的偏转而引起折射率的梯度变化,从而实现透镜的功能。通过控制圆环的半径、宽度和所加电压等参数,可以获得抛物线型的折射率梯度,从而实现较好的会聚效果。

Kao等人于2010年就提出了一种基于不同宽度的同心圆环电极的液晶微透镜^[21]。2014年,Li等人也提出了一种同心圆环电极液晶微透镜^[22]。该液晶微透镜的直径为 $d=2.4\text{ mm}$,调焦范围从 -2.5 D 到 $+2.5\text{ D}$ 。这种液晶微透镜采样率越大(电极数量越多),效果就越好。理想的正透镜的光程差可以表示为:

$$L_{\text{OPD}}(r) \approx -\frac{r^2}{2f}, \quad (2)$$

其中: r 是透镜的半径, f 是焦距。若用 f_s 表示采样数,则圆环电极的数量可以表示为

$$N = L_{\text{OPD}} \cdot f_s / \lambda, \quad (3)$$

假设焦距为 400 mm, 波长为 543.5 nm, 采样率 f_s 为 10, 可以算出每个圆环的外环半径为

$$r_n = \sqrt{\frac{2\lambda f_n}{f_s}}, n = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

由于光程差由中心到边缘逐渐增大, 电极的宽度也由中心到边缘逐渐减小。为了减少电极间隙带来的像差, 电极间隙应尽量的小。

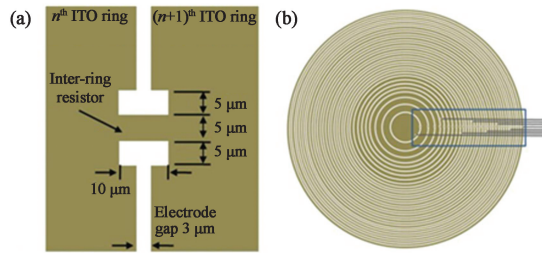


图 4 (a) 环内电阻的设计; (b) 圆环电极的设计, 可以看到电阻总线的排布^[22]。

Fig. 4 (a) Inter-ring resistor design; (b) Lens design diagram showing relative locations of resistors and bus lines^[22]。

为了减少电极的驱动网络的复杂性, 可以使用一个电阻网络, 如图 4 所示。相邻两个电极之间由一个方形的电阻连接起来, 这个电阻起到分压的作用, 因此寻址电极的导线数量可以大幅减少, 从而降低了驱动网络的复杂性。在此示例中, 只需要 8 条导线来进行驱动。具体每个电极的电压可以通过模拟计算出来。

图 5 给出了透镜的具体结构。制作过程如下: 首先用光刻在 ITO 导电玻璃上 (厚度 0.4 mm, 100 W/m^2) 制作出图案电极形成驱动网络。接着, 沉积 SiO_2 层。每个寻址电极上都有一根穿过 SiO_2 层的直径为 $10 \mu\text{m}$ 的导线。最后, 8 根被引出的导线可以外接到电压驱动器上。

同时, 作者为了解决电极之间地间隙带来的像差, 提出了一种改进的微透镜^[23]。在原来微透镜的基础上, 增加了一层圆环电极 (称为浮动电极)。该透镜的结构如图 6 所示。浮动电极被放置在每个间隙区域上, 该区域与该间隙两侧的相邻的寻址电极对的一小部分重叠。浮动电极上的电势通过电介质耦合和电容分压成为底层两个电极上电势的中间值。这样的设计不仅可以减小电极间隙带来的影响, 还可以增加电极的分辨率, 提高了透镜的性能。通过数值计算, 这种透镜的斯

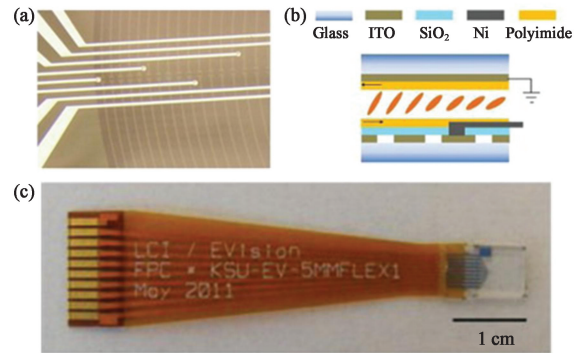


图 5 (a) 图案基底的微观俯视图。亮线为宽度约 $10 \mu\text{m}$ 的镍母线, 通过圆孔 (亮点) 与环形电极连接。环间电阻也显示出来; (b) 液晶透镜结构的侧视图; (c) 实际设备^[22]。

Fig. 5 (a) Microscopic top view of the patterned substrate with reflected light. The bright lines are the Nickel bus lines with a width of about $10 \mu\text{m}$, and they are connected with ring electrodes through round vias (bright dots). The inter-ring resistors are shown as well; (b) Side-view diagram of patterned substrates and cell construction; (c) Experimental LC lens device^[22]。

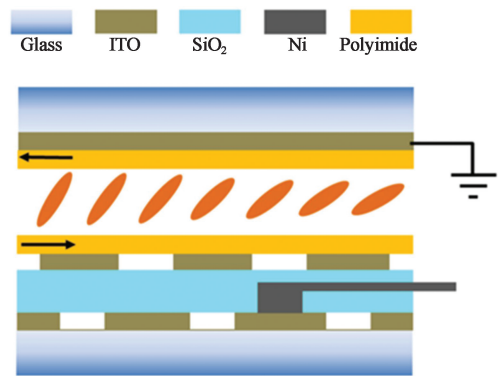


图 6 带浮动电极的液晶微透镜结构侧视图^[23]

Fig. 6 Side view diagram of the patterned substrate and cell construction^[23]

特雷尔 (Strehl) 比 (液晶透镜和理想透镜在焦平面上的强度峰值比) 为 98.64%, 与此对比的是之前设计的透镜 Strehl 比仅为 89%。

另外, Beeckman 等人在此基础上提出了一种只需要一次光刻的圆环电极液晶微透镜^[24], 从而大幅降低了制造的难度。透镜的结构如图 7 所示, 在圆环电极上方增加一层高介电常数的介电层, 可以极大地平滑边缘场。这层介电层相当于

没有电流流通的低电导层,不会带来能量损耗。并且,电极之间的间距可以增大,因此在相同电极数的情况下,可以增大透镜的孔径。

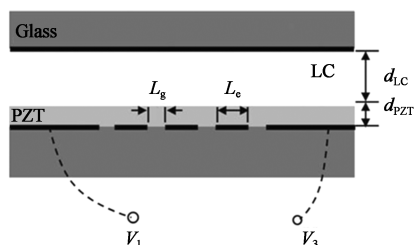


图7 只需一次光刻的液晶微透镜结构侧视图^[24]

Fig.7 Side view diagram of different types of multi-electrode cell construction with floating electrodes and high permittivity layer^[24]

(2)螺旋电极

通过设计不同形状、不同疏密程度的螺旋电极也可以产生不均匀的电场,从而得到理想的折射率梯度变化,实现焦距可调的液晶微透镜。Han等人对螺旋电极做了一系列研究^[25-26],讨论了螺旋电极产生的电磁场,如图8所示。线圈密度在一个方向上较高,在相反的方向上较稀疏,形成平面非均匀螺旋电极。当通上正弦交流电时,电极会产生非对称空间磁场分布,由交变磁场产生的感应电场也偏离了水平方向,从而导致一个垂直向下的电场分量。这个垂直向下的电场分量可以使液晶分子在垂直方向上偏转一定的角度。另外,通过进一步的仿真可以看出,在线圈密度越高的地方,电场的偏转角度越大。通过调整电流大小、螺旋电极的形状或疏密程度,便可使液晶分子产生不同程度的偏转,形成有效的梯度折射率分布。

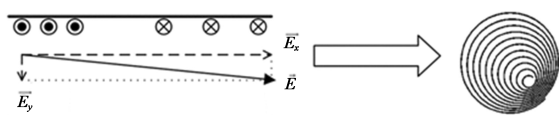


图8 由平面非均匀螺旋电极产生的空间电场分布^[26]

Fig.8 Distribution of the electric field induced by planar non-uniform coil electrode^[26]

Chen等人设计了一种基于不均匀螺旋电极的液晶微透镜阵列^[27]。如图9所示,电极形状可以是圆形和椭圆形螺旋。整个液晶微透镜阵列包含了 2×2 个螺旋电极。螺旋电极的中心电极有

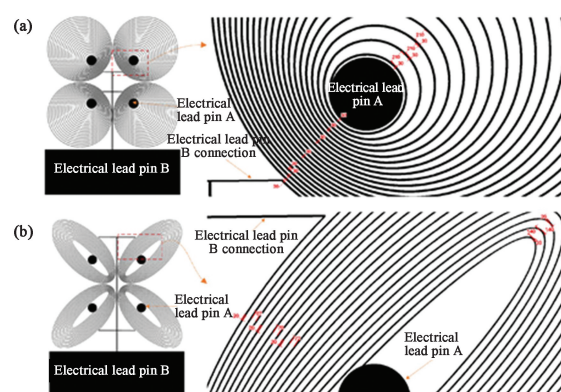


图9 两种图案电极的设计。(a)圆形螺旋图案电极和局部放大图中的具体参数;(b)椭圆形螺旋图案电极和局部放大图中的具体参数^[27]。

Fig.9 Two designs of electrode patterns of the LC device. (a) Circular micro-coil electrode pattern and structural parameters in a partially enlarged figure; (b) Elliptical micro-coil electrode pattern and structural parameters in a partially enlarged figure^[27].

一直径为1 mm的引脚A;电极引脚B通过总线连接着4个螺旋电极,在圆形电极和椭圆电极中总线的宽度分别为 $30 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$ 。为了描述电极线宽和间距,引入了间距线宽比 K (相邻电极之间的距离和电极线宽的比值)。一般 K 的值被限制在 $1 \sim 7$,从图9(a)可以看出最大的间距为 $210 \mu\text{m}$,最小的间距为 $30 \mu\text{m}$ 。从图9(b)中可以看出最大的间距为 $140 \mu\text{m}$,最小的间距为 $20 \mu\text{m}$ 。为了避免相邻螺旋线间狭缝衍射产生较强的线性杂散光,电极间距需要仔细考量和设计。

透镜的结构简化图和实物图如图10所示。在上层玻璃基底的上下两面用射频磁控溅射镀上一层 30 nm 厚的ITO薄膜;然后用激光刻蚀工艺在4个电极中心引脚上钻孔,并用钢颗粒填充使得上下面相导通;通过光刻和电感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀得到螺旋电极图案;最后再加上PI取向层。最终制成的液晶微透镜阵列样品大小为 $20 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,如图10(b)所示。最终测试的两个典型值为在大小为 $45.6 \text{ V}_{\text{rms}}$ 的电压下焦距为 1.75 mm ,在 $55.0 \text{ V}_{\text{rms}}$ 电压下焦距为 2.35 mm 。

3.1.2 包含介电层的液晶微透镜阵列

为了使电极产生的电场分布更加接近于抛物线型,在电极之间可引入具有一定介电常数的介

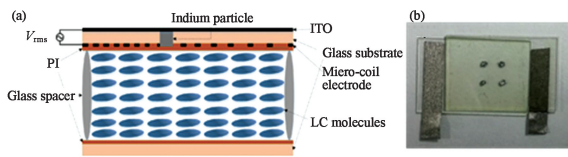


图 10 (a)液晶微透镜结构侧视图;(b)液晶微透镜实物图^[27]。

Fig.10 LC device fabrication. (a) Side view diagram; (b) Appearance of the final device^[27].

电层。介电层不仅可以降低光的散射,还可以降低开启电压。这是因为液晶层和介电层可以看作是连续的电容,施加的电压会被有效分压:

$$V_{\text{total}} = V_{\text{LC}} + V_{\text{dielectric}} \quad (5)$$

Chu 等人设计了一种包含不同介电常数的介电层的液晶微透镜阵列^[28],如图 11 所示。在平面电极间隙之间和周围涂有一层低介电常数的电阻层,在底部的基板上旋涂一层高介电层,有助于平滑相位面。由于电阻层的存在,在液晶层厚度相对较薄的情况下,液晶透镜阵列的孔径可以相对较大。当适当的电压加载在平面基底时,就会在液晶层内产生梯度电场。这种梯度电场的产生来自两个方面:在较低的衬底上,条形电极之间的间隙降低了中心区域的电场强度;同时,高介电层有助于从液晶透镜中心到边缘产生线性变化的电势,平滑液晶透镜的相位面,将相位面从方形转变为抛物线型。该研究工作采用了一种透明的全聚合物渗透复合材料作为介电层,由聚偏氟乙烯-三氟乙烯-氯三氟乙烯(PVDF-TrFE-CTFE: 62 : 26 : 12,量比)和体积浓度为 0.23 的 PANI 组成,介电常数在 100 Hz 下可达 2 000。

作者通过仿真来比较设计的透镜和理想透镜的梯度折射率分布和相位面。液晶层的最低折射率为 1.563,最高折射率为 1.723 4,可形成比较大的折射率差,在 3.2 V_{rms} 的驱动电压下,可形成近

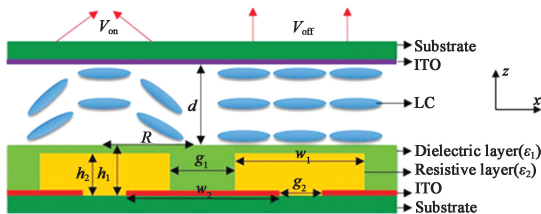


图 11 包含介电层的液晶微透镜侧视图^[28]

Fig.11 Side view diagram of the proposed LC lens array with a resistive layer^[28]

似抛物线型的折射率梯度和相位面,可调焦距的范围由 3.99 mm 至接近无穷远。

另外,作者还提出了另一种介电层液晶微透镜的设计^[29],如图 12 所示。类似地,透镜的介电层也包含了两种不同介电常数的材料。不同的是该透镜的 ITO 电极的设计,在透镜边缘有两个 ITO 电极充当电源电极,在透镜中间位置低介电层上方和液晶盒上层的 ITO 电极接地。中心接地电极能稳定在其上方的液晶指向矢,并且可以通过调整其宽度来调整液晶分子的倾角分布。

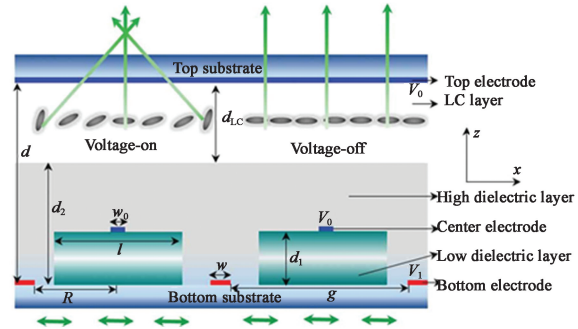
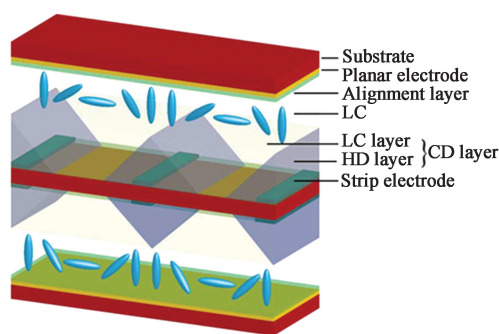


图 12 另一种液晶微透镜结构示意图^[29]

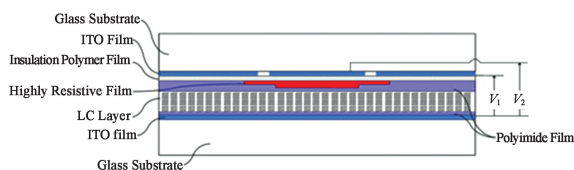
Fig. 12 Side view diagram of another LC microlens array^[29]

Li 等人提出了一种基于复合介电层的双层液晶透镜^[30],如图 13 所示。复合介电层由三角棱镜形的高介电层(HD)和旋涂形成的低介电层(LD)组成。高介电层的正下方为条形电极,介电层上方为液晶层。对称的两个液晶透镜组合成一个液晶透镜,提高了聚焦的能力,当然同时也增大了透镜的厚度和制作的难度。

作者通过仿真得到液晶透镜的成像效果。选用的液晶为 E7,双折射率为 $Dn=0.224$,介电各向异性为 $D\epsilon=11.4$ 。HD 和 LD 的介电常数为 $\epsilon_{\text{HD}}=1\,000$ 和 $\epsilon_{\text{LD}}=3.8$ 。液晶层的厚度为 $D_{\text{LC}}=50\,\mu\text{m}$,介电层厚度为 $d=190\,\mu\text{m}$,HD 的半宽度为 $l=210\,\mu\text{m}$,条形电极宽度为 $w=5\,\mu\text{m}$ 。单介电层的开启电压大于 3.3 V。当施加电压为 10.7 V 时,液晶透镜的折射率分布才能近似于抛物线型。而对于复合介电层透镜,施加电压为 3.3 V 时便可以得到近似于抛物线型的折射率分布。因而可以直观地看出这种新型的复合介电层液晶透镜可以有效地降低所需电压,其可调焦距范围从 1.782 7 mm 至接近无穷远,液晶透镜的上升时间和下降时间分别为 0.9 s 和 0.32 s。

图 13 双层液晶透镜结构示意图^[30]Fig.13 Device configuration of the double-layer LC lens array with the CD layer^[30]

类似地, Kawamura 和 Sato 设计了一种基于高电阻层的液晶微透镜^[31], 如图 14 所示。该透镜采用了传统的中心圆孔电极透镜, 在圆环电极和底部电极上施加电压 V_1 , 在圆孔电极和底部电极上施加电压 V_2 。通过施加电压 V_1 , 电极可以产生一个空间上不均匀、轴对称的电场, 而通过施加电压 V_2 可以调节焦距。当 V_1 大于 V_2 时透镜为正透镜, 反之则为负透镜。电阻层分为两个不同直径的薄层, 与电极之间隔着一层绝缘层。电阻层可以平缓电场分布, 使电场分布更接近抛物线型。通过计算可以发现, 施加电压和调整电阻层的直径等参数会影响梯度折射率分布。通过平衡这些参数, 最终可以得到一个近似抛物线型的梯度折射率分布, 实现一个低像差的液晶微透镜。

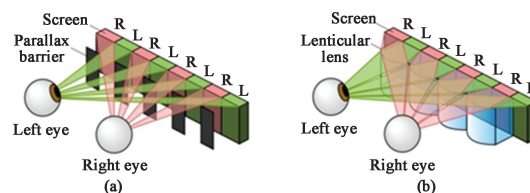
图 14 宽调谐范围的液晶微透镜结构图^[31]Fig.14 Side view diagram of the LC microlens with variable wide range of power^[31]

3.1.3 用于裸眼 3D 显示的柱状液晶微透镜阵列

Algorri 等人于 2016 年发表了一篇综述, 对裸眼 3D 显示液晶微透镜阵列的研究背景、现状和趋势做了详细的描述和讨论^[16]。3D 显示技术分为需要外部设备辅助的 3D 显示技术和不需要外部设备辅助的 3D 显示技术(也称裸眼 3D)。在电影院观看 3D 电影时观影者需要佩戴偏光眼镜, 就是一种典型的需要外部设备辅助的 3D 显

示技术。

空间多路复用是非常重要的裸眼 3D 显示技术。它利用了衍射、反射、折射、遮挡等光学现象, 以使图像偏离显示前的特定位置。在实现这一效果的各种技术中, 折射元件(微透镜)和遮挡元件(视差屏障)是最成功的。视差屏障由遮罩组成, 遮罩包含垂直光阑, 以一定角度覆盖光线(图 15(a))。基于此技术的设备已经商业化, 属于比较成熟的技术, 但它仍有很大的缺点, 如亮度低、视角小、串扰大等, 这些都是衍射造成的, 很难抑制。为了改善这类系统, 可以使用微透镜技术(图 15(b))。立体图由图像(对应于从两个不同角度观察的同一个场景)组成, 这些图像相互排列在像素列中。在这种情况下, 微透镜会使光线偏转到每个眼睛的特定方向。

图 15 裸眼 3D 显示技术原理。(a) 利用视差屏障实现; (b) 利用柱状透镜实现^[16]。Fig.15 Operation principle of autostereoscopic displays. (a) Achieved by using parallax barrier; (b) Achieved by using lenticular microlens^[16].

最近, Pagidi 等人提出了一种基于纳米聚合物分散液晶(Nano-PDLC)的 2D/3D 快速切换柱状液晶微透镜阵列^[13]。纳米聚合物分散液晶由聚合物和液晶混合而成。其优点是液晶微滴的尺寸小于光的波长, 因此不会引起光的散射。如图 16 所示, 作者根据底部交叉电极将透镜分成 3 个区域 I、II、III。在施加电压后, 液晶微滴中液晶的指向矢会随着电场而偏转, 不同区域的液晶偏转角度不同, 从而起到聚焦的效果。当入射光的偏振方向垂直于电极时, 光线会聚焦在电极间隙的中间位置; 当偏振方向平行于电极时, 光线会聚焦在电极上方。因此, 通过控制电压和光的偏振方向, 可以改变光的聚焦位置。这种微透镜阵列可以应用于 2D/3D 视觉的切换, 如图 17 所示。当未施加电压时, 液晶微滴中液晶取向是随机的, 因此入射光没有聚焦, 此时为 2D 模式; 当施加电

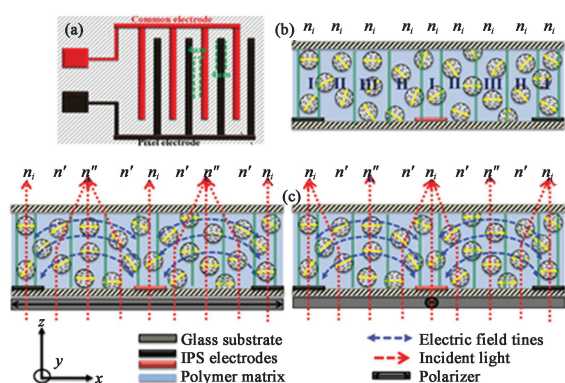


图 16 基于 nano-PDLC 的柱状液晶微透镜结构示意图。(a)底部手指电极;(b)未加电压时,各个微滴的液晶指向矢是随机的;(c)施加电压时,焦点位置可由入射光偏振方向控制^[13]。

Fig.16 Micro-lenticular lens arrays using nano-PDLC and its switching mechanism. (a) Top view of the electrodes; (b) Random orientation of LC directors in the field-off state; (c) Focused beam position in micro-lenticular arrays depending on the polarization direction of an incident beam in the field-on state^[13].

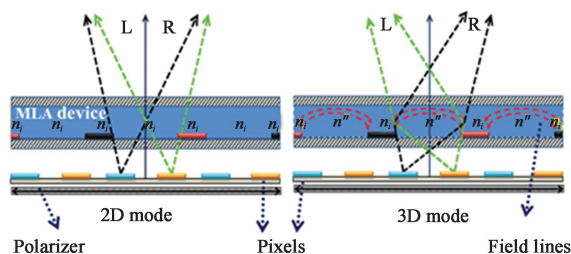


图 17 2D/3D 模式的快速切换原理^[13]

Fig.17 Operation principle of the 2D/3D switchable display with proposed micro-lenticular nano-PDLC device^[13]

压时,像素点发出的光会被微透镜阵列聚焦到特定的眼中,此时为 3D 模式。

Chang 等人提出了一种包含高电阻层的可旋转的用于裸眼 2D/3D 视觉的液晶微透镜阵列^[15]。我们知道手机、平板电脑等便携电子产品已经成为人们日常生活中必不可少的工具,而这些电子产品有水平和竖直两种显示模式。因此可旋转成为便携电子产品 3D 显示的要求。作者设计的液晶微透镜阵列如图 18 所示。高电阻层的作用在前面已经介绍过,这里不再赘述。为了实

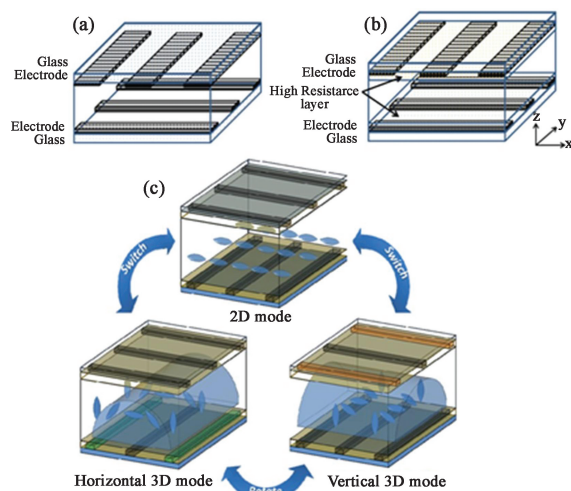


图 18 可旋转液晶透镜的结构示意图。(a)电极分布;(b)电极上的高电阻层;(c)2D/3D 模式切换和水平竖直切换原理^[15]。

Fig.18 Device configuration of the rotatable high-resistance liquid-crystal lens. (a) Configuration of the electrodes; (b) High-resistance layer; (c) Structure in the X-Z (horizontal) plane, and Y-Z (vertical) plane^[15].

现可旋转,上层和下层的条纹电极的方向应该相互垂直。当上层电极全部施加电压 V_{com} ,下层电极交替施加电压 V_D 和 V_{com} ,由于高电阻层的作用,上层条状电极等效于平面电极,下层电极将产生平滑的梯度电场分布,从而转换为水平模式。反之,则转换为竖直模式。

对用于裸眼 3D 视觉的柱状液晶微透镜阵列也有很多种不同结构和不同类型。Wang 等人提出了一种无需取向处理的聚合物网络液晶(PNLC)微透镜阵列^[10],与传统的 PNLC 微透镜相比,作者发现在施加电压以后液晶分子会沿着电场线的方向重新排列,因此无需取向处理,简化了制作的程序。Ma 等人则从更加实际的角度出发,设计了一种可直接与高分辨率 LCD 设备匹配的 2D/3D 可切换液晶微透镜阵列^[14]。Shi 等人利用铁电液晶作为入射光偏振方向的调制器,结合聚合物液晶层实现 2D/3D 视觉的切换^[11]。类似的研究还有很多。可以看出,用于裸眼 3D 视觉的液晶微透镜阵列的研究是比较热门的研究领域。

3.2 基于衍射原理的液晶微透镜阵列

3.2.1 液晶菲涅尔透镜

近期,Jull 等人研制了一种掺杂染料的液晶

菲涅尔透镜^[32],主要研究了振幅调制对菲涅尔器件相对效率的影响。这个透镜通过直接光取向制作,其中一面在相邻半波带正交取向形成菲涅尔图案,另一面为垂直取向,如图19所示。染料掺杂液晶菲涅尔透镜会产生交替的透明和不透明半波带,从而通过幅度调制聚焦光束。由于蒽醌二色性染料分子的跃迁矩平行于分子长轴,因此只吸收特定偏振角的入射光。当把染料分子掺杂在液晶中时,它会随着液晶分子的取向而排列。因此通过控制液晶分子的取向,可以控制染料分子对光的吸收,形成交替的透明和不透明区域,形成菲涅尔透镜。当施加足够大的电压,液晶分子会重新分布为垂直取向,此时染料分子对光的吸收一致,聚焦效果消失。由于液晶的双折射效应,因此同时也会产生由相位差引起的菲涅尔效应。当施加电压后,随着相位差逐渐减小,聚焦效果消失。在液晶中加入蒽醌二色性染料可以显著提高器件的最高效率,从33%提高到37%。通过控制电压可以控制聚焦效率,在20 V_{rms}的电压下接近0%。

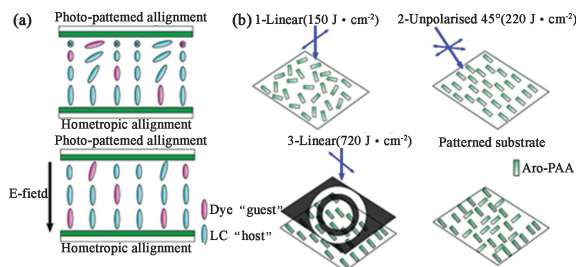


图19 掺杂染料的液晶菲涅尔透镜的工作原理(a)和制作过程(b)^[32]

Fig.19 Schematic of operation principle (a) and photo-patterning process (b) used to generate the Fresnel director pattern in the LC device^[32]

Lin等人提出了一种退火方法来提高聚合物蓝相液晶菲涅尔透镜的效率^[33],如图20所示。为了克服偏振依赖性,聚合物蓝相液晶(PS-BPLC)被广泛地应用在电控菲涅尔透镜上。作者利用聚合引发相分离法(PIPS),使用掩模版产生奇偶波带片来制作菲涅尔透镜。然而在制作过程中,会有一些聚合物分子残留在蓝相液晶富集区,这会降低蓝相液晶的光电特性。在之前的工作中,一般用二次曝光来解决这个问题,但是效果

并不好。作者通过温度引发相分离法(TIPS)使液晶和聚合物更好地分离,提高了液晶富集区的纯度。首先将液晶透镜加热至澄清点使其成为各向同性,然后按0.2 °C/min的速率降温。蓝相液晶微滴会随着温度的下降逐渐形成,聚合物分子也会随之离开液晶富集区。随后,用强度为3.0 mW/cm²的紫外光再一次固化。通过这种退火处理,使液晶菲涅尔透镜的效率达到36%,接近理论极限41%。

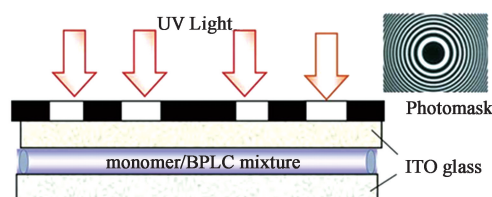


图20 聚合物蓝相液晶菲涅尔透镜制作原理^[33]

Fig.20 Schematic of the fabrication process of polymer/BPLC Fresnel lens^[33]

关于液晶菲涅尔透镜的应用,Wang等人提出了一种基于随机焦距的液晶菲涅尔微图形透镜的电开关智能玻璃^[34]。智能玻璃或智能窗的市场在不断地扩大,应用范围包括建筑、汽车,甚至增强现实(AR)。聚合物分散液晶(PDLC)由于液晶微滴与聚合物的折射率不匹配,形成强烈的光散射,从而形成不透明状态的原理被广泛地应用在智能窗领域。然而,这些设备都存在相似的问题,如过高的工作电压(>20 V)、低切换速率、透明状态下低清晰度。

作者提出的智能窗的结构和工作原理如图21所示。由于智能玻璃上有焦距和位置随机排列的液晶菲涅尔透镜,因而玻璃后面物体成的像会变得模糊不清。当加上电压后,菲涅尔透镜焦距消失,智能玻璃就能回到清晰的状态。经过测试,液晶智能玻璃在正常和倾斜观察下,在清晰状态(透光率>90%)和模糊状态(图像失真)下都表现出优异的性能,如低驱动电压(<1.4 V/μm)、低功耗、易制造、灵活设计(关状态为模糊或关状态为清晰)。这款智能玻璃可以用在建筑领域或便携式可穿戴应用中。

3.2.2 液晶PB透镜

与菲涅尔透镜类似的是Pancharatnam-Berry透镜,简称PB透镜。通常用具有空间变化光轴

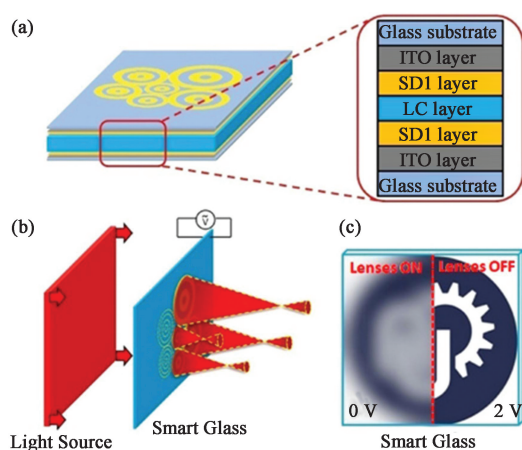


图 21 (a) 基于随机焦距的液晶菲涅尔透镜智能玻璃的结构示意图; (b) 开关状态下智能玻璃的工作原理; (c) 在 0 V 电压下(开状态)和 2 V 电压下(关状态)智能玻璃呈现出透明度的区别^[34]。

Fig.21 (a) Configuration of the smart glass with LC Fresnel lenses having distinct focal lengths; (b) Operation principle of LC smart glass; (c) Effect diagram of the LC smart glass placed in front of a school logo, the region of the smart glass under 0 V shows a blurry (lenses ON) state and the region under 2 V exhibits a clear (lenses OFF) state^[34]。

的超表面或双折射材料来获得 PB 相位。对于液晶 PB 透镜, 可以用基于全息干涉、数字微反射镜(Digital micromirror device, DMD)、等离子激元和激光直写的光取向技术或纳米压印技术来获得任意的液晶取向。He 等人提出一种利用纳米压印(Nanoimprint lithography, NIL)取向液晶的可调 PB 微透镜阵列^[35]。首先通过激光直写制作出 PDMS 印章, 印章上的取向图案包含一组亚微米周期光栅, 其方向按照设计要求在平面内旋转, 如图 22 所示。将 PDMS 印章压印在旋涂了 SU-8 薄层的 ITO 玻璃上, 经过 UV 曝光和后烘等一系列处理, 就完成了取向层的制作。每个 PB 微透镜的直径为 $148 \mu\text{m}$, 凹槽的周期为 600 nm , 深度约为 100 nm 。

在光学显微镜下测得不同波长对应的焦距: $R=633 \text{ nm}$, $G=546 \text{ nm}$, $B=450 \text{ nm}$ 分别对应 $\pm 3.40 \text{ mm}$, $\pm 2.84 \text{ mm}$, $\pm 2.49 \text{ mm}$ 。透镜两侧的两个焦点对应于两束正交的圆偏振光。当施加

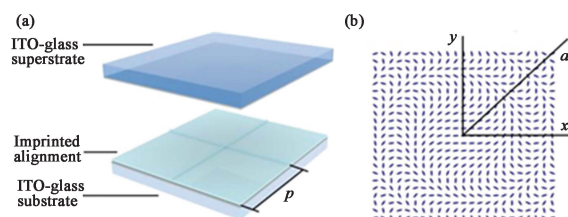


图 22 (a) 液晶 PB 微透镜阵列的结构示意图; (b) 一个微透镜中液晶分子的理想排布^[35]。

Fig.22 (a) Configuration of the single-side aligned PB microlens array where P denotes the periodicity of the microlens array; (b) Ideal distribution of the LC directors for a single microlens^[35]。

电压达到 $8 V_{\text{rms}}$ 时, 透镜效果消失。这种 PB 透镜最大的优点是, 由于液晶层厚度很薄(约 $1.6 \mu\text{m}$), 因此响应时间非常短。经测量, 下降时间为 $3.57 \mu\text{s}$ 。

目前, 液晶 PB 透镜的 f 数(f -number)仍比较大(>10)且达不到衍射极限。最近, Jiang 等人提出了一种用等离子激元掩膜光取向的方法并制备了低 f 数的达到衍射极限的液晶 PB 微透镜^[36]。制备方法如下: 首先利用微纳加工技术制备出含有纳米方形孔洞阵列图案的铝膜作为等离子激元超掩膜(Plasmonic metamasks, PMMs), 然后通过投影将 PMM 上的偏振信息转移到液晶聚合物上完成取向。在紫外偏振光的作用下, 液晶聚合物中掺入的光敏分子发生光致异构化反应, 进而通过分子间作用力对液晶分子取向。

为制备 f 数为 2 的 PB 透镜所需要的 PMM 在偏光显微镜下的图像如图 23(a) 所示。可以看出透射光带有空间变化的偏振方向。图 23(b) 展示了 PMM 的 SEM 图像。可以看出 PMM 上分布有周期为 270 nm 的矩形孔洞阵列, 其中最小的偏振正交的同心圆距离为 $1.5 \mu\text{m}$ 。图 23(c) 展示了图(b)区域的透射光偏振方向, 可以看出光的偏振方向正好垂直于纳米方孔的长轴。制备的液晶 PB 透镜在偏光显微镜下的图像如图 23(d) 所示。液晶分子的排布(图 23(e), (f)) 和 PMM 上的矩形孔洞的排布一一对应。

由瑞利判据估计的衍射极限分辨率为 $R \approx 0.7 \mu\text{m}$, 而最小的偏振正交的同心圆距离为 $1.5 \mu\text{m}$, 意味着等离子激元光取向的分辨率达到了衍射极限。这是目前光取向技术达到的最高分辨率。

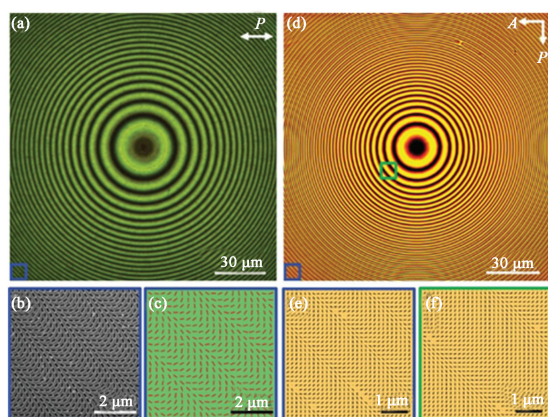


图 23 (a)制备的 PMM 在偏光显微镜下的图像;(b)蓝色框内的 SEM 图像;(c)光透过蓝色框的偏振方向(红标);(d)制备的 PB 透镜在偏光显微镜下的图像;(e,f)在蓝色框和绿色框内的液晶分子取向^[36]。

Fig.23 (a) Polarized optical microscopy image of the fabricated PMM for the microlens with f -number $N_f = 2$; (b) SEM image of the blue square area; (c) Measured polarization directions (red bars) of light transmitted through the blue square area; (d) Cross-polarized microscopy image of the PB microlens; (e,f) Orientations of LC molecules in the blue and green boxes in (d)^[36].

4 总 结

本文介绍了液晶微透镜阵列的基本原理并对近些年来液晶微透镜的发展做了简要的归纳总结。液晶微透镜阵列由于其电控调焦、制作简单、低功耗、结构紧凑、稳定性良好等优点,被广泛地应用于各种领域中,一直以来都是一个重要的研究课题。当然,液晶微透镜阵列也存在一些缺点限制其进一步的应用,比如工作电压较高、响应速度慢、器件透射率低、调焦范围小等。未来可以通过几个方面进一步提高液晶微透镜阵列的性能:一是从新材料入手。比如利用石墨烯的高导电性、透明性、灵活性和弹性代替 ITO 充当电极^[37]。又比如利用新的液晶材料(蓝相液晶)来提高响应速度。二是针对不同的应用场景去设计液晶微透镜阵列。如成像的应用对器件的响应速度没有太高的要求,但是对成像质量(像差)有较高的要求。相信在微纳制造工艺愈发成熟、新材料层出不穷的今天,液晶微透镜阵列的性能会不断提高,得到越来越广泛的应用。

参 考 文 献:

- [1] HUANG H Y, ZHAO Y. Optofluidic lenses for 2D and 3D imaging [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2019, 29(7): 073001.
- [2] XU S, LI Y, LIU Y F, *et al.* Fast-response liquid crystal microlens [J]. *Micromachines*, 2014, 5(2): 300-324.
- [3] LIN Y H, WANG Y J, RESHETNYAK V. Liquid crystal lenses with tunable focal length [J]. *Liquid Crystals Reviews*, 2018, 5(2): 111-143.
- [4] KIM S U, NA J H, KIM C, *et al.* Design and fabrication of liquid crystal-based lenses [J]. *Liquid Crystals*, 2017, 44(12/13): 2121-2132.
- [5] ALGORRI J F, ZOGRAFOPOULOS D C, URRUCHI V, *et al.* Recent advances in adaptive liquid crystal lenses [J]. *Crystals*, 2019, 9(5): 272.
- [6] 王建国.液晶微透镜阵列研究进展[J].激光与光电子学进展,2013,50(1):010005.
WANG J G. Research progress of liquid crystal microlens array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010005. (in Chinese)
- [7] LIN Y H, CHEN M S. A pico projection system with electrically tunable optical zoom ratio adopting two liquid crystal lenses [J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(7): 401-404.
- [8] LIN H C, COLLINGS N, CHEN M S, *et al.* A holographic projection system with an electrically tuning and continuously adjustable optical zoom [J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27222-27229.
- [9] DE BOER D K G, HIDDINK M G H, SLUIJTER M, *et al.* Switchable lenticular based 2D/3D displays [C]// *Proceedings of SPIE 6490, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIV*. San Jose, CA: SPIE, 2007: 64900R.

- [10] WANG X H, REN H W, WANG Q H. Polymer network liquid crystal (PNLC) lenticular microlens array with no surface treatment [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(8): 773-778.
- [11] SHI L Y, SRIVASTAVA A K, WAI TAM A M, *et al.* 2D-3D switchable display based on a passive polymeric lenticular lens array and electrically suppressed ferroelectric liquid crystal [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(17): 3435-3438.
- [12] PARK M K, PARK H, JOO K I, T, *et al.* Polarization-dependent liquid crystalline polymeric lens array with aberration-improved aspherical curvature for low 3D crosstalk in 2D/3D switchable mobile multi-view display [J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20281-20297.
- [13] PAGIDI S, MANDA R, BHATTACHARYYA S S, *et al.* Fast switchable micro-lenticular lens arrays using highly transparent nano-polymer dispersed liquid crystals [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2019, 6(18): 1900841.
- [14] MA Q G, ZHAO J, ZHANG S D, *et al.* Tilted LCD pixel with liquid crystal GRIN lens for two-dimensional/three-dimensional switchable display [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 6901509.
- [15] CHANG Y C, JEN T H, TING C H, *et al.* High-resistance liquid-crystal lens array for rotatable 2D/3D autostereoscopic display [J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 2714-2724.
- [16] ALGORRI J F, URRUCHI V, GARCÍA-CÁMARA B, *et al.* Liquid crystal microlenses for autostereoscopic displays [J]. *Materials*, 2016, 9(1): 36.
- [17] 刘晓林, 谢佳, 张永栋, 等. 基于电控液晶透镜的自由立体显示技术研究 with 实现 [J]. 液晶与显示, 2013, 28(4): 552-555.
LIU X L, XIE J, ZHANG Y D, *et al.* Study and realization of auto-stereoscopic display based on electric-field-driven LC lens [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(4): 552-555. (in Chinese)
- [18] ALGORRI J F, URRUCHI V, BENNIS N, *et al.* Tunable liquid crystal cylindrical micro-optical array for aberration compensation [J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 13899-13915.
- [19] TSOU Y S, CHANG K H, LIN Y H. A droplet manipulation on a liquid crystal and polymer composite film as a concentrator and a sun tracker for a concentrating photovoltaic system [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(24): 244504.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] LI L W, BRYANT D, VAN HEUGTEN T, *et al.* Near-diffraction-limited and low-haze electro-optical tunable liquid crystal lens with floating electrodes [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8371-8381.
- [24] BEECKMAN J, YANG T H, NYS I, *et al.* Multi-electrode tunable liquid crystal lenses with one lithography step [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 271-274.
- [25] HAN X J, DAI W W, MENG J J, *et al.* Electrically controlled liquid-crystal microlens arrays based on plane non-uniform spiral microcoils [C]//*Proceedings of SPIE* 10964, *Tenth International Conference on Information Optics and Photonics*, Beijing, China; SPIE, 2018: 109641T.
- [26] HAN X J, DAI W W, LI D P, *et al.* Design and fabrication of electronically controlled liquid crystal microlens arrays with non-uniform coil electrode arrays [C]//*Proceedings of SPIE* 10607, *MIPPR 2017: Multispectral Image Acquisition, Processing, and Analysis*, Xiangyang, China; SPIE, 2018: 1060709.
- [27] CHEN M C, HAN X J, DAI W W, *et al.* Optical properties of a liquid-crystal microlens with an arrayed planar non-uniform spiral micro-coil electrode [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(11): 3174-3180.
- [28] CHU F, TIAN L L, LI R, *et al.* Adaptive nematic liquid crystal lens array with resistive layer [J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(4): 563-571.
- [29] TIAN L L, CHU F, DOU H, *et al.* Short-focus nematic liquid crystal microlens array with a dielectric layer [J].

- Liquid Crystals*, 2020, 47(1): 76-82, doi: 10.1080/02678292.2019.1630491.
- [30] LI R, CHU F, DOU H, *et al.* Double-layer liquid crystal lens array with composited dielectric layer [J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(2): 248-254.
- [31] KAWAMURA M, SATO S. Variable wide range of lens power and its improvement in a liquid-crystal lens using highly resistive films divided into two regions with different diameters [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2018, 57(5): 052602.
- [32] JULLE I L, WAHLE M, WYATT P J M, *et al.* Efficiency improvements in a dichroic dye-doped liquid crystal Fresnel lens [J]. *Optics Express*, 2019, 27(19): 26799-26806.
- [33] LIN H Y, AVCI N, HWANG S J, *et al.* High-diffraction-efficiency Fresnel lens based on annealed blue-phase liquid crystal-polymer composite [J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(9): 1359-1366.
- [34] WANG X Q, TAM A M W, JIA S H, *et al.* Low-voltage-driven smart glass based on micro-patterned liquid crystal Fresnel lenses [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(4): 1146-1151.
- [35] HE Z Q, LEE Y H, CHEN R, *et al.* Switchable Pancharatnam-Berry microlens array with nano-imprinted liquid crystal alignment [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 5062-5065.
- [36] JIANG M, GUO Y B, YU H, *et al.* Low f -number diffraction-limited Pancharatnam-Berry microlenses enabled by plasmonic photopatterning of liquid crystal polymers [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(18): 1808028.
- [37] KAUR S, KIM Y J, MILTON H, *et al.* Graphene electrodes for adaptive liquid crystal contact lenses [J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8782-8787.

作者简介:



蔡文锋(1996—),男,广东汕头人,硕士研究生,2019年于华南理工大学获得学士学位,主要从液晶器件和超材料的研究。E-mail: 11930196 @ mail.sustech.edu.cn



刘言军(1977—),男,山东莱阳人,副教授,研究员,2007年于新加坡南洋理工大学获得博士学位,主要从事液晶光电子学、等离子体光子学、超材料及超表面等领域的研究。E-mail: yjliu@sustech.edu.cn