

文章编号:1007-2780(2022)08-1086-09

集会聚发散功能一体化的液晶柱透镜阵列

薛莹莹^{1,3}, 李 靖^{1,4}, 陆红波^{1,2,4}, 徐 苗^{1,2,4*}

- (1. 合肥工业大学 特种显示技术国家工程实验室, 现代显示技术省部共建国家重点实验室, 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009;
2. 合肥工业大学 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室, 仪器科学与光电工程学院 安徽 合肥 230009;
3. 合肥工业大学 物理学院, 安徽 合肥 230009;
4. 合肥工业大学 先进功能材料与器件安徽省重点实验室, 化学与化工学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:本文提出了一种制备集会聚和发散功能一体化的液晶柱透镜阵列的方法。液晶柱透镜阵列呈“三明治”结构,从上到下依次为:上电极基板、液晶层、聚合物柱透镜阵列、下电极基板。为了将会聚和发散功能集成在单一液晶盒中,制备聚合物柱透镜阵列的紫外光敏胶的折射率(n_p)需介于液晶的寻常光折射率(n_o)和非寻常光折射率(n_e)之间。通过在下基板表面修饰图案化疏水层,利用亲疏水效应使得紫外光敏胶自组装形成表面光滑、尺寸均一的柱透镜阵列。所制备的液晶柱透镜阵列有两种调节聚焦和散焦功能的方式:一种是改变入射光的偏振方向;另一种是施加电场调控液晶层的有效折射率。实验结果表明:当外加电压从 0 调节到 0.7 V_{rms} 时,液晶柱透镜的焦距从 -4 mm 调节到 ∞ ;当外加电压在 1~7 V_{rms} 变化时,液晶柱透镜阵列的焦距从 6.0 mm 调节到 4.5 mm。该方法制备的液晶柱透镜阵列具有制备方法简单、器件结构紧凑、驱动电压低、调焦范围大等优点,在成像、显示、光通信等领域具有潜在的应用价值。

关键词:液晶柱透镜阵列;折射率匹配;亲疏水效应;会聚透镜;发散透镜

中图分类号:O753⁺.2;TH74 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2021-0352

Liquid crystal lenticular lens array with switchable positive and negative power

XUE Ying-ying^{1,3}, LI Jing^{1,4}, LU Hong-bo^{1,2,4}, XU Miao^{1,2,4*}

- (1. National Engineering Lab of Special Display Technology, National Key Lab of Advanced Display Technology, Academy of Opto-electric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
3. School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
4. Key Laboratory of Advance Functional Materials and Devices of Anhui Province, School of Chemistry and Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A method is proposed to prepare a liquid crystal lenticular lens array (LCLA) with switchable

收稿日期:2021-12-31;修订日期:2022-01-28.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61805066);中央高校基本科研业务费专项资金(No. JZ2022HGTB0294)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61805066); Fundamental Research Funds of the Central Universities of China (No. JZ2022HGTB0294)

*通信联系人, E-mail: xumiao0711@hfut.edu.cn

positive and negative focal length. The LCLA exhibits a “sandwich” structure which consists of top electrode substrate, LC layer, polymeric lenticular lens array, and bottom electrode substrate. In order to integrate the convergence and divergence functions in a single LC cell, the refractive index of the polymer should be between the ordinary refractive index (n_o) and extraordinary refractive index (n_e) of LC material. The hydrophobic-hydrophilic strips array modified on the surface of the bottom substrate enables the formation of lenticular lens array self-assembly. There are two methods to switch the focal length of LCLA from negative to positive values: by changing the polarization direction of the incident light for 90° ; or by applying an external electric field to adjust the effective refractive index of the LC layer. The experimental results show that when the applied voltage adjusted from 0 V_{rms} to 0.7 V_{rms} , the focal length of the LCLA changed from -4 mm to ∞ . When the applied voltage changed from 1 V_{rms} to 7 V_{rms} , the focal length of the LCLA varied from 6.0 mm to 4.5 mm. The as-obtained LCLA has the advantages of simple fabrication, compact structure, low driving voltage and large range of focal length, which has potential applications in the fields of imaging, display, and optical communication.

Key words: liquid crystal lenticular lens array; refractive index matching; hydrophilic-hydrophobic effects; converging lenses; diverging lens

1 引言

柱透镜仅在一个轴上会聚或发散光,可以用于光学测量、激光扫描、光谱、激光二极管、声学和光学处理器。传统柱透镜的材质为玻璃或聚合物,通过改变厚度实现聚焦和散焦功能,其焦距固定不变。若要实现变焦距功能,需使用多镜片组,通过齿轮、电机、轴承等机械部件参与变焦,复杂的机械运动不仅磨损镜头、降低使用寿命,而且体积庞大且笨重,不能满足人们对透镜集成化、微型化及智能化的需求。

液晶(Liquid Crystal, LC)是一种既具备晶体的各向异性又具备液体的流动性的软物质,因其独特的光电响应特性被广泛应用在各种光学元件中^[1-4]。例如,液晶显示器^[5]、空间光调制器^[6-9]、智能窗户^[10]、液晶光开关^[11]、光衰减器^[12]等。最早关于液晶透镜的研究始于20世纪90年代,日本科学家S. Sato提出一种新型的单元孔液晶透镜^[13],随后各类液晶透镜^[14-18]相继被报道。基于折射率匹配原则的液晶透镜是利用液晶分子的双折射特性和入射光的偏振方向来调控液晶透镜的焦距。集会聚发散功能一体化的液晶透镜^[19]通过调节电压调控液晶分子的空间排布,能够灵活实现光束的会聚和发散功能,具有结构紧凑^[20]、易于集成、调焦范围宽、低功耗、性能稳定、响应速度快等优点^[14]。

2009年,南洋理工大学的研究团队^[21]利用喷墨打印技术在电极基板上制备出微凸起阵列,结合液晶制成了既具有发散功能又具有会聚功能的液晶微透镜阵列。但喷墨打印技术需要一个一个地打印微凸起结构,存在喷头易堵塞、液体选择受限、加工效率低等问题。2011年Lin等研究团队^[22]将双频液晶填充在具有微凸起阵列的液晶盒中制备出液晶透镜。通过调节频率可以实现会聚或发散功能。但在不同频率的电压下快速且多次切换时,双频液晶分子会产生电致加热现象,从而影响器件的稳定性和使用寿命。2018年韩国庆北大学的研究团队^[23]利用纳米压印技术制备聚合物凹形阵列,结合液晶制成液晶柱透镜阵列。但纳米压印技术所需要的母版制备工艺复杂、对环境工艺要求高且制成的微凸起结构表面粗糙度差。2021年北京航空航天大学的研究团队^[24]通过两个柱透镜阵列的正交排列,中间用 $\lambda/2$ 波片,使得偏振角旋转 90° ,然后对一层液晶柱透镜阵列施加电压实现一维的2D/3D可切换显示效果,对两层液晶柱透镜阵列同时施加电压实现二维的2D/3D可切换显示效果。此液晶透镜阵列具有工作电压低、焦距短、制作工艺简单等特点。

本文提出一种利用亲疏水效应制备聚合物微柱凸起阵列^[25],结合液晶制成集会聚发散功能一体化的液晶透镜的方法。首先采用光刻涂敷

法在电极基板上制备出亲疏水条形阵列,将紫外光敏胶涂敷在亲疏水图案化表面。利用亲疏水区域表面能的差异,紫外光敏胶倾向于附着在亲水条形区域,并在表面张力的作用下形成柱透镜阵列。该方法能够精确控制柱透镜单元的尺寸、形状、位置、填充率等,而且可以快速制备大面积均一化的聚合物柱透镜阵列。由于所选用的紫外光敏胶固化后的折射率(n_p)恰好介于液晶的寻常光折射率(n_o)和非寻常光折射率(n_e)之间,所以所制备的液晶透镜既能实现发散功能又能实现会聚功能。通过改变入射光的偏振方向或者调控液晶柱透镜阵列的外加电场,可以获得会聚功能或发散功能。该方法制备的液晶柱透镜阵列具有驱动电压低、焦距调节范围广、响应速度快等优点,在2D/3D可切换显示、光通信、光信号处理、激光阵列、生物医学检测技术中具有潜在的应用价值。

2 器件制备与工作原理

液晶柱透镜包括ITO玻璃基板、取向层、聚合物层、液晶层。液晶为向列相液晶E7(粘度 $\eta_{ic} \approx 56 \text{ mm}^2/\text{s}$, $n_e \approx 1.747$, $n_o \approx 1.52$,介电各向异

性 $\Delta\epsilon \approx 16.3$,平行于分子轴方向上的介电常数 $\epsilon_{//} \approx 19.9$,展曲弹性系数 $K_{11} \approx 11 \times 10^{-12} \text{ N}$,扭曲弹性系数 $K_{22} \approx 6.5 \times 10^{-12} \text{ N}$,弯曲弹性系数 $K_{33} \approx 17 \times 10^{-12} \text{ N}$)。制备聚合物柱透镜阵列的材料为紫外光敏胶NOA1625($n_p \approx 1.625$,在 25°C 时粘度 $\eta_p \approx 60 \sim 80 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,介电常数 $\epsilon \approx 5$,Norland),其折射率(n_p)介于液晶的寻常光折射率(n_o)和非寻常光折射率(n_e)之间,这是使液晶柱透镜阵列集会聚发散功能于一体的关键之处。

而亲疏水条形阵列修饰层是利用亲疏水效应自组装形成聚合物柱透镜阵列的关键。本实验采用光刻涂敷法制备亲疏水条形阵列修饰层。首先,在洁净的ITO基板上涂敷正性光刻胶并透过掩模版对基板进行曝光处理,所选用的掩模版上具有明暗相间的条形阵列(图1(a));经过显影后获得与掩模版图案相对应的条形光刻胶阵列(图1(b));然后利用旋涂法将全氟聚(丁基乙烯醚)(CYTOP)溶液涂敷在基板表面;待溶剂全氟三丁胺完全挥发后,用丙酮去除剩余光刻胶,即可获得具有亲疏水条形阵列修饰层的基板(图1(c))。其中,ITO基板表面是亲水区域,CYTOP表面是疏水区域。

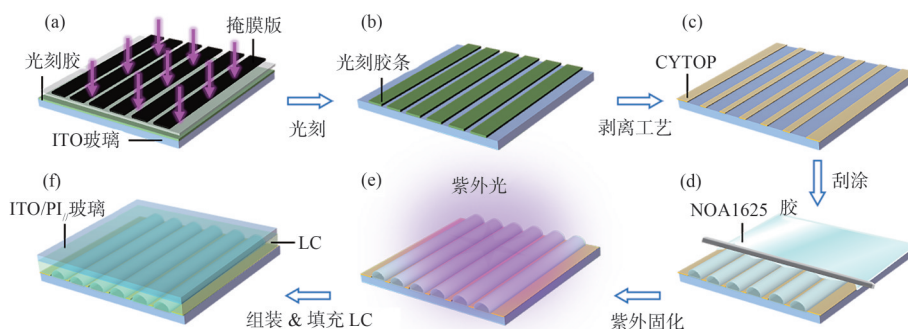


图1 液晶柱透镜阵列的制备流程。(a)涂敷光刻胶并透过掩模版进行曝光处理;(b)显影后的光刻胶条形阵列图案;(c)涂敷CYTOP疏水层后经过剥离工艺去除光刻胶获得亲疏水条形阵列图案;(d)刮涂NOA1625胶形成柱透镜阵列;(e)紫外固化得到聚合物柱透镜阵列;(f)与ITO/PI_{||}玻璃基板组装并填充液晶得到液晶柱透镜阵列。

Fig. 1 Preparation processes of LCLA. (a) Spin-coating photoresist followed by mask exposure processing; (b) Photore-sist strips array after developing; (c) Removal of a photoresist by lift-off process after spin-coating CYTOP layer to obtain hydrophilic-hydrophobic strips array; (d) Blade-coating NOA1625 glue to form lenticular lens array; (e) Cured lenticular lens array; (f) Assembled with ITO/PI_{||} substrate and filled with LC to obtain LCLA.

再利用刮涂法将紫外光敏胶NOA1625涂敷在亲疏水图案化表面(图1(d))。由于条形图案之间表面能的差异,使得流经其表面的液体倾向于附着在亲水区域,并在表面张力的作用下形成拱形,

从而获得柱透镜阵列。在紫外光($\lambda \approx 365 \text{ nm}$, $20 \text{ mW}/\text{cm}^2$)照射下连续固化 15 min ,即可得到聚合物柱透镜阵列(图1(e))。最后,将取向层经过平行摩擦处理后的ITO玻璃基板作为上基板,具有

聚合物柱透镜阵列的ITO基板作为下基板,以 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的垫片控制盒厚,制成液晶盒。注入向列相液晶E7后,获得液晶柱透镜阵列(图1(f))。

液晶柱透镜阵列的电控变焦原理如图2所示。当未施加电压时($V=0$),由于基板表面平行摩擦取向,液晶分子沿摩擦方向排列,液晶层的有效折射率(n_{eff})与非寻常光折射率(n_e)相近且大于聚合物的折射率(n_p),即 $n_e > n_p$,从而产生发散光线的作用,此时液晶透镜呈现负透镜效应。

通过外加电压调制液晶分子转动从而使得液晶层的有效折射率逐渐减小。当 $V=V_1$ 时,液晶层的有效折射率近似等于 n_p 时,光束透过液晶盒后不发生偏转,此时液晶盒无透镜效应(见图2(b))。当持续增加电压($V=V_2$)使得液晶分子垂直于基板排列时,液晶层的有效折射率接近寻常光折射率(n_o)且小于聚合物的折射率(n_p),即 $n_o < n_p$,从而产生会聚光线作用(图2(c)),此时液晶透镜具有正透镜效应。

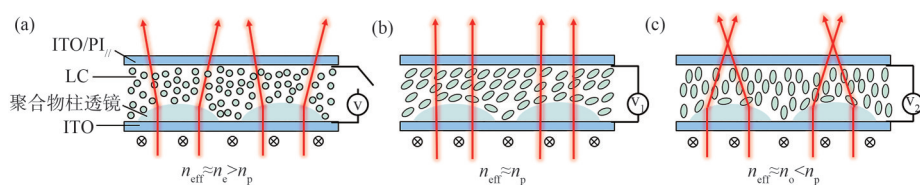


图2 液晶柱透镜阵列的电控变焦原理示意图。(a) $V=0$, 发散透镜效应; (b) $V=V_1$, 无透镜效应; (c) $V=V_2$, 会聚透镜效应。

Fig. 2 Schematic diagram of the working principle of LCLA. (a) $V=0$, divergent lens effect; (b) $V=V_1$, without lens effect; (c) $V=V_2$, convergent lens effect.

3 结果与讨论

3.1 自组装形成聚合物柱透镜阵列

图3(a)为光学显微镜(DM2500M 德国 Leica 公司)下观察到的亲疏水条形阵列修饰的基板表面。从图中可以看出,CYTOP疏水条的横截面尺寸为 $30\text{ }\mu\text{m}$,ITO亲水条的横截面尺寸为 $200\text{ }\mu\text{m}$,亲疏水区域界线分明,无任何缺陷和杂质,说明光刻涂敷法可以获得精度高、图案清晰的亲疏水图案。ITO玻璃的表面能为 53.2 mN/m ,表现为亲水性。CYTOP层的表面能为 12.6 mN/m ,表现为疏水性^[25]。液体在固体表面的接触角反映了液体对其表面的润湿程度。使用接触角测量仪分别测量紫外光敏胶NOA1625在ITO玻璃表面和CYTOP表面的接触角。紫外光敏胶NOA1625在ITO玻璃表面的接触角为 40° (图3(b)),在CYTOP表面的接触角为 79° (图3(c))。接触角的较大差异表明紫外光敏胶倾向于附着在ITO玻璃表面,这为利用亲疏水效应制备柱透镜阵列提供了有利条件。

图4(a)为尺寸均一、表面光滑的聚合物柱透镜阵列表面形貌,聚合物柱透镜单元节距约为 $200\text{ }\mu\text{m}$,间隙为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 。从图4(b)中可以看出聚

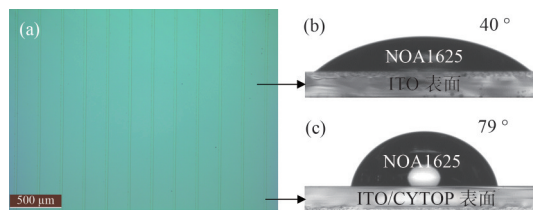


图3 亲疏水条形阵列修饰的基板表面(a),紫外光敏胶NOA1625在ITO玻璃(b)和CYTOP表面(c)的接触角。

Fig. 3 Hydrophilic-hydrophobic strip arrays modified substrate surface (a), contact angles of NOA1625 glue on the surface of ITO glass (b) and CYTOP layer (c).

合物柱透镜的聚焦效果,是一排排亮度均匀的亮线。由于光刻设备(MA/BS6 德国 SUSS 公司)的限制,该方法所制备的聚合物柱透镜阵列的有效面积最大为 $12.7\text{ cm} \times 12.7\text{ cm}$ 。使用光学表面轮廓仪(DHM R2100, Lyncee Tec)测量单个聚合物柱透镜的三维表面形貌和轮廓,其中标尺颜色从蓝到红说明高度从低到高。图4(c)中聚合物柱透镜单元颜色分布均匀且对称,说明聚合物柱透镜具有均匀的表面。从聚合物柱透镜的截面轮廓图(图4(d))可以看出,聚合物柱透镜单元的轮廓高度为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。

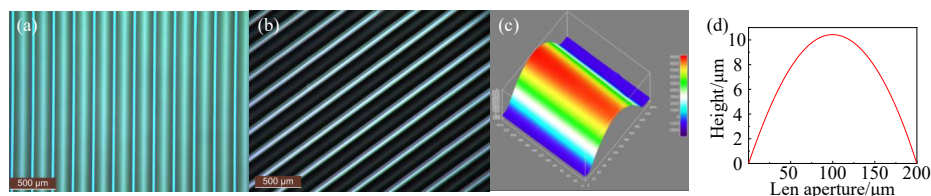


图4 聚合物柱透镜阵列(a)和其聚焦亮线(b),及其聚合物柱透镜单元的三维形貌(c)和表面轮廓(d)。

Fig. 4 Polymeric lenticular lens array (a) and it's focused bright line (b), and 3D surface profile (c), cross-section profile (d) of lenticular lens.

3.2 非连续调谐

通过调节偏振光的入射方向平行或垂直于液晶盒的摩擦方向,可以获得发散或会聚光线的功能。图5(a)为测试液晶柱透镜阵列的聚焦特性实验装置示意图。首先由氦氖激光器(HRS015B, $\lambda \approx 632.8$ nm, Thorlabs)发出光束,依次经过衰减片和偏振片后照射在液晶柱透镜阵列上,输出光束经过一个成像透镜由探测器(CCD, BC106 N-VIS, 350~1 100 nm, Thorlabs)接收。衰减片的作用是调节光路中光束强度。当入射光的偏振方向与液晶盒的摩擦方向平行时,液晶层的有效折射率(n_{eff})近似于 n_e ,由于

$n_e > n_p$,液晶柱透镜呈现负透镜效应。通过调整成像透镜、液晶透镜和探测器的相对位置,可以观察到聚焦峰阵列(图5(b)),说明液晶柱透镜阵列的焦平面恰好处于探测器上。此时,若将偏振片旋转 90° ,使入射光的偏振方向与样品的摩擦方向垂直(图5(c)),聚焦峰阵列消失(图5(d)),这是由于液晶层的有效折射率(n_{eff})接近于 n_o ,而 $n_o < n_p$,液晶柱透镜阵列呈现正透镜效应,通过调节成像透镜、液晶透镜和探测器的相对位置亦可获得聚焦峰阵列。这种方法可实现液晶柱透镜阵列会聚发散功能,其焦距是非连续调谐的。

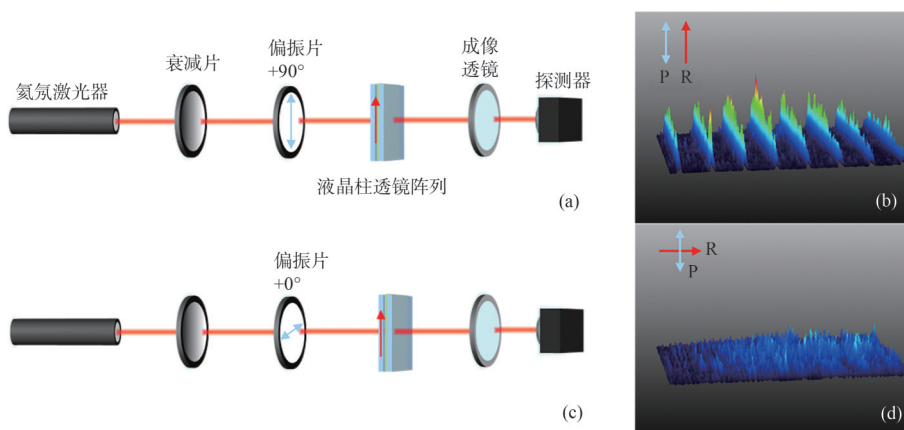


图5 检测液晶柱透镜阵列聚焦性能的光路图及光束分布情况。(a),(b)入射光偏振方向与液晶盒摩擦方向平行;(c),(d)入射光偏振方向与液晶盒摩擦方向垂直(其中,P代表偏振方向,R代表摩擦方向)。

Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup for testing focusing performance of LCLA. (a), (c) Polarization direction of incident light set parallel with rubbing direction; (c), (d) Incident light polarization direction perpendicular to the rubbing direction (P represents the direction of polarization, R represents the rubbing direction).

3.3 连续调谐

若要实现液晶柱透镜阵列的焦距连续调谐功能,可通过调控外加电场强度来实现。首先利用COMSOL Multiphysics有限元仿真软件对液晶盒内部的电场分布进行仿真,颜色由蓝到红以

及电场线由疏到密均意味着电场强度由弱到强。如图6所示,聚合物柱透镜单元的节距为 $200 \mu\text{m}$,透镜的间距是 $30 \mu\text{m}$,轮廓高度是 $10 \mu\text{m}$ 。当驱动电压为 $0.7 V_{\text{rms}}$ 时,液晶盒内电场分布情况的模拟结果如图6(a)所示。柱透镜肩部的电场强度

最强,电场线分布较密,顶部中心电场强度最弱,电场线也分布较疏。此时,电场强度较弱,较弱的电场能够使液晶分子发生偏转,但不足以使液晶分子垂直于基板表面排列。若要驱动聚合物顶部的液晶分子垂直于基板排列,需要更高的电压。当 $V=7\text{ V}_{\text{rms}}$ 时,如图 6(b) 所示,液晶盒内电场强度整体增强。较强的电场强度能够使液晶盒内几乎所有液晶分子均垂直于基板表面排列,液晶层的有效折射率小于聚合物柱透镜的折射率,从而获得会聚功能。

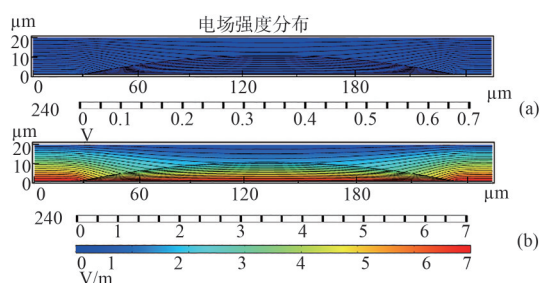


图6 液晶柱透镜单元的电场分布情况模拟。(a) $V=7\text{ V}_{\text{rms}}$; (b) $V=0.7\text{ V}_{\text{rms}}$ 。

Fig. 6 Simulation of the electric field distribution of the LC lenticular lens. (a) $V=7\text{ V}_{\text{rms}}$; (b) $V=0.7\text{ V}_{\text{rms}}$.

检测液晶柱透镜阵列聚焦效果的实验光路如图 5(a) 所示,入射光的偏振方向与样品的摩擦方向平行。当 $V=0$ 时,液晶分子沿摩擦方向均匀排列,液晶层的有效折射率(n_{eff})近似于 n_e 。由于 $n_e > n_p$,液晶柱透镜阵列表现出发散光线功能。通过调整成像透镜、液晶透镜和探测器的相对位

置,可观察到聚焦峰阵列(图 7(a))。图 7(b) 和 (c) 分别为 $V=0.2\text{ V}_{\text{rms}}$ 和 $V=0.4\text{ V}_{\text{rms}}$ 时光束通过液晶柱透镜阵列的光强分布情况。一旦所施加的电压超过 Freddricksz 阈值,液晶分子就开始沿着电场方向重新定向,导致液晶的有效折射率(n_{eff})降低。在强锚固力和小预倾角条件下,液晶 E7 的阈值电压为 $0.95\text{ V}_{\text{rms}}$ 。由于 CYTOP 疏水层的表面能较低,液晶分子垂直于其表面。因此,液晶盒中 CYTOP 表面液晶分子已经垂直于基板表面排列,只需较低的电压便可使液晶盒中所有液晶分子垂直排列,这是诱发低阈值电压的主要原因。当 $V=0.7\text{ V}_{\text{rms}}$ 时,聚焦峰阵列消失(图 7(d)),说明在此状态下没有透镜效应。因为此时液晶层的有效折射率(n_{eff})与聚合物柱透镜的折射率 n_p 接近,光束通过液晶盒后不发生偏转。当电压从 0 变化到 $0.7\text{ V}_{\text{rms}}$ 时,液晶柱透镜阵列的焦距从 -4 mm 调节到 ∞ ,如图 7(e) 所示。若外加电压高于 $0.7\text{ V}_{\text{rms}}$,液晶层的有效折射率逐渐减小。当 n_{eff} 小于 n_p 时,液晶柱透镜阵列表现出对光线的会聚作用,具有正透镜效应。当 $V=1\text{ V}_{\text{rms}}$ 时,通过适当调整成像透镜、液晶柱透镜阵列和探测器的相对位置,无聚焦峰阵列(图 8(a))。当 $V=3\text{ V}_{\text{rms}}$ 时,开始出现微弱的聚焦峰(图 8(b))。当 $V=5\text{ V}_{\text{rms}}$ 时,聚焦峰强度增加,出现明显的光强分布。当外加电压增加到 7 V_{rms} 时,聚焦峰阵列最为清晰且光强值最大(图 8(d))。此时,即使增大外加电场强度,聚焦峰的强度也不会发生巨大变化。这说明液晶分

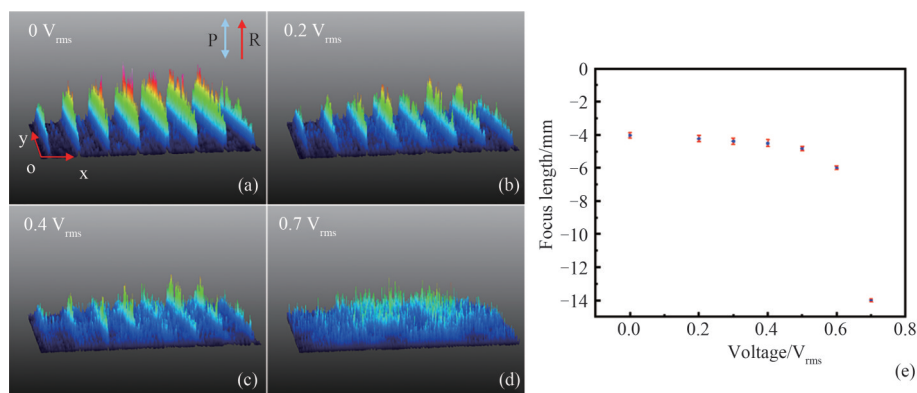


图7 具有发散功能的液晶柱透镜阵列的聚焦效应。(a) $V=0$; (b) $V=0.2\text{ V}_{\text{rms}}$; (c) $V=0.4\text{ V}_{\text{rms}}$; (d) $V=0.7\text{ V}_{\text{rms}}$; (e) 焦距随电压变化。

Fig. 7 Focusing effect of LCLA with divergent lens effect. (a) $V=0$; (b) $V=0.2\text{ V}_{\text{rms}}$; (c) $V=0.4\text{ V}_{\text{rms}}$; (d) $V=0.7\text{ V}_{\text{rms}}$; (e) Focal length varies with voltage.

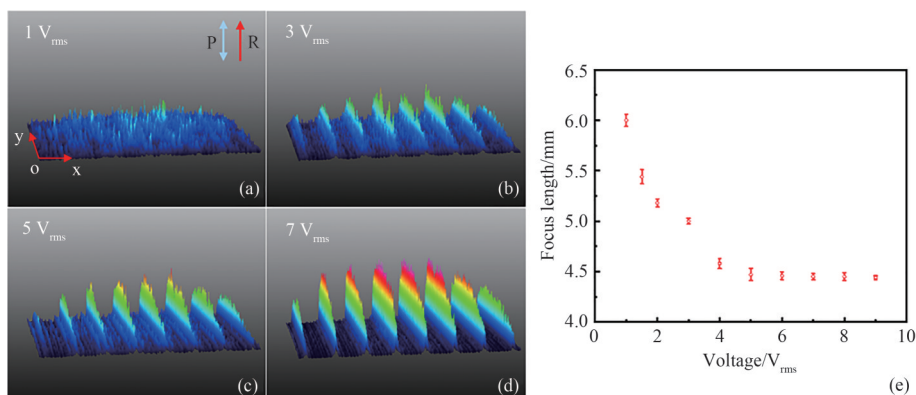


图 8 具有会聚功能的液晶柱透镜阵列的聚焦效应。(a) $V=1\text{ V}_{\text{rms}}$; (b) $V=3\text{ V}_{\text{rms}}$; (c) $V=5\text{ V}_{\text{rms}}$; (d) $V=7\text{ V}_{\text{rms}}$; (e) 焦距随电压的变化。

Fig. 8 Focusing effect of LCLA with convergence lens effect. (a) $V=1\text{ V}_{\text{rms}}$; (b) $V=3\text{ V}_{\text{rms}}$; (c) $V=5\text{ V}_{\text{rms}}$; (d) $V=7\text{ V}_{\text{rms}}$; (e) Focal length varies with voltage.

子几乎完全垂直于基板表面排列,液晶层的有效折射率(n_{eff})近似于 n_o ,由于 $n_o < n_p$,液晶柱透镜阵列具有正透镜效应且焦距在此状态下达到最短值。当电压从 1 V_{rms} 变化到 7 V_{rms} 时,液晶柱透镜的焦距从 6.0 mm 变化到 4.5 mm ,如图8(b)所示。

根据聚合物柱透镜单元的截面轮廓高度可计算液晶透镜的理论焦距,如式(1)、(2)所示:

$$f = (h^2 + r^2) / 2h(n_p - n_{\text{eff}}), \quad (1)$$

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

式中: h 和 r 分别表示聚合物柱透镜单元的截面轮廓高度和 $1/2$ 节距; n_p 和 n_{eff} 分别表示聚合物的折射率和液晶的有效折射率; θ 表示液晶分子长轴与线偏振光振荡方向之间的夹角。

已知柱透镜单元节距为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 时,截面轮廓高度为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。由公式(1)可知,当 n_{eff} 近似为 n_e 时,液晶柱透镜的理论焦距值为 -4.14 mm ;当 n_{eff} 近似为 n_o 时,液晶柱透镜的理论焦距为 4.81 mm 。由图7(e)和图8(e)可知,液晶柱透镜的焦距测量值与理论值相吻合。

4 结 论

本文设计并制备了一种集会聚发散功能一体化的液晶柱透镜阵列,其结构包括上层电极基板、液晶层和具有聚合物柱透镜阵列的下层电极基板。其中上基板表面涂敷聚酰亚胺取向层并经过平行摩擦处理。下基板具有亲疏水条形阵列,这

是制备自组装成型的聚合物柱透镜阵列的关键。由于存在亲疏水差异性,液体在流经基底表面时倾向于附着在亲水区域,并在表面张力的作用下收缩成柱透镜形貌。该方法能够快速制备大面积、尺寸均一、表面光滑的聚合物柱透镜阵列。柱透镜单元尺寸和透镜填充率可以通过设计亲疏水条的宽度与间隙进行调控。而所制备的液晶柱透镜阵列之所以能够集会聚和发散功能于一体,其关键在于所选用的聚合物的折射率介于液晶的寻常光折射率(n_o)和非寻常光折射率(n_e)之间。液晶柱透镜阵列有两种变焦方式:一是通过改变入射光的偏振方向;二是通过调节外加电场强度。通过旋转偏振片,使入射光的偏振方向平行或垂直于液晶盒的摩擦方向,可以实现从发散到会聚光线的功能。通过外加电场强度的调节,可以实现液晶柱透镜焦距的连续调谐。在低驱动电压下,由于液晶层的有效折射率大于 n_p ,液晶柱透镜阵列呈现负透镜效应,具有发散功能。当电压从 0 变化到 $0.7\text{ V}_{\text{rms}}$ 时,焦距由 -4 mm 变为 ∞ 。而在高驱动电压下,液晶层的有效折射率小于 n_p ,液晶柱透镜阵列呈现正透镜效应,具有会聚光线的功能。当电压从 1 V_{rms} 变化到 7 V_{rms} 时,焦距从 6.0 mm 变化到 4.5 mm 。由于疏水层的存在,液晶柱透镜阵列的驱动电压大大降低。该方法所制备的液晶柱透镜阵列具有结构紧凑、调焦范围宽、驱动电压低、制备方法简单等优点,在2D/3D可切换显示、光通信、光信号处理、激光阵列、生物医学检测等领域具有潜在的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] WANG Y J, LIN Y H. Liquid crystal technology for vergence-accommodation conflicts in augmented reality and virtual reality systems: a review [J]. *Liquid Crystals Reviews*, 2021, 9(1): 35-64.
- [2] 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.
- [3] KANG S, DUOCASTELLA M, ARNOLD C B. Variable optical elements for fast focus control [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(9): 533-542.
- [4] TABIRYAN N V, ROBERTS D E, LIAO Z, *et al.* Advances in transparent planar optics: enabling large aperture, ultrathin lenses [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(5): 2001692.
- [5] 张兴,郑成武,李宁,等. 液晶材料与3D显示 [J]. 液晶与显示, 2012, 27(4): 448-455.
ZHANG X, ZHENG C W, LI N, *et al.* Liquid crystal materials and 3D display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(4): 448-455. (in Chinese)
- [6] FUENTES J L M, FERNÁNDEZ E J, PRIETO P M, *et al.* Interferometric method for phase calibration in liquid crystal spatial light modulators using a self-generated diffraction-grating [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14159-14171.
- [7] PENG F L, LEE Y H, LUO Z Y, *et al.* Low voltage blue phase liquid crystal for spatial light modulators [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 5097-5100.
- [8] PENG F L, XU D M, CHEN H W, *et al.* Low voltage polymer network liquid crystal for infrared spatial light modulators [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2361-2368.
- [9] LU Y Q, DU F, LIN Y H, *et al.* Variable optical attenuator based on polymer stabilized twisted nematic liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2004, 12(7): 1221-1227.
- [10] OH S W, NAM S M, KIM S H, *et al.* Self-regulation of infrared using a liquid crystal mixture doped with push-pull azobenzene for energy-saving smart windows [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(4): 5028-5033.
- [11] LI K, WANG J W, CAI W F, *et al.* Electrically Switchable, Polarization-sensitive encryption based on aluminum nanoaperture arrays integrated with polymer-dispersed liquid crystals [J]. *Nano Letters*, 2021, 21(17): 7183-7190.
- [12] CHIANG S P, WANG C T, FENG T M, *et al.* Selective variable optical attenuator for visible and mid-infrared wavelengths [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17009-17014.
- [13] SATO S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1979, 18(9): 1679-1684.
- [14] 蔡文锋,李怡霏,蒋浩东,等. 液晶微透镜阵列研究进展 [J]. 液晶与显示, 2020, 35(7): 749-761.
CAI W F, LI Y F, JIANG H D, *et al.* Research progress of liquid crystal microlens arrays [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 749-761. (in Chinese)
- [15] CHU F, WANG D, LIU C, *et al.* Multi-view 2D/3D switchable display with cylindrical liquid crystal lens array [J]. *Crystals*, 2021, 11(6): 715.
- [16] CHEN W W, PAN J W, JENG S C. Circularly polarized optical microscope using a low aberration liquid crystal lens [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(18): 4434-4437.
- [17] XIONG J H, WU S T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications [J]. *eLight*, 2021, 1(1): 3.
- [18] ALGORRI J F, MORAWIAK P, ZOGRAFOPOULOS D C, *et al.* Cylindrical and Powell liquid crystal lenses with positive-negative optical power [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(17): 1057-1060.
- [19] GAO J J, PAN J W, JENG S C. Low-aberration liquid crystal lens with positive and negative focal length [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(18): 5077-5080.
- [20] KUMAR M B, KANG D, JUNG J, *et al.* Compact vari-focal augmented reality display based on ultrathin, polarization-insensitive, and adaptive liquid crystal lens [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128: 106006.
- [21] DAI H T, LIU Y J, SUN X W, *et al.* A negative-positive tunable liquid-crystal microlens array by printing [J]. *Optics Express*, 2009, 17(6): 4317-4323.

- [22] 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.
- [23] PARK M K, PARK H, JOO K I, *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.
- [24] CHU F, GUO Y Q, ZHANG Y X, *et al.* Four-mode 2D/3D switchable display with a 1D/2D convertible liquid crystal lens array [J]. *Optics Express*, 2021, 29(23): 37464-37475.
- [25] XU M, ZHOU Z W, WANG Z, *et al.* Self-assembled microlens array with controllable focal length formed on a selective wetting surface [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(6): 7826-7832.

作者简介:



薛莹莹(1996—),女,安徽宿州人,硕士研究生,2015年于安庆师范大学获得学士学位,主要从事液晶光电子器件的制备与3D显示技术方面的研究。
E-mail: xueyingying0526@163.com



徐苗(1987—),女,新疆昌吉人,博士,副研究员,2016年于韩国国立全北大学获得博士学位,主要从事自适应光电子器件的制备与成像技术方面的研究。E-mail: xumiao0711@hfut.edu.cn