

光学相位分布曲面的自适应调制系统

张鸿州, 朱智康, 黄凯, 陆建钢

引用本文:

张鸿州, 朱智康, 黄凯, 等. 光学相位分布曲面的自适应调制系统[J]. 液晶与显示, 2021, 36(4): 522–528.

ZHANG Hong-zhou, ZHU Zhi-kang, HUANG Kai, et al. Adaptive modulation system for optical phase profile[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(4): 522–528.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0327>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

温度对液晶波前校正器响应速度及LUT的影响研究

Effect of temperature on LUT and response speed of liquid crystal wavefront corrector

液晶与显示. 2018, 33(11): 911–917 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183311.0911>

扭曲向列相液晶太赫兹相位调制器特性研究

Characteristics of twisted nematic liquid crystal terahertz phase modulator

液晶与显示. 2021, 36(3): 379–388 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0258>

纯位相液晶调制器的响应特性计算

Calculation of electro-optical characteristics of phase-only liquid crystal modulator

液晶与显示. 2017, 32(3): 182–189 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173203.0182>

空间光调制器用于多光束二维偏转的算法研究

Algorithm research of spatial light modulator for multi-beam two-dimensional deflection

液晶与显示. 2020, 35(6): 537–546 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203506.0537>

挠曲电效应对液晶微波相位调制的影响

Influence of flexoelectric effect on the microwave phase modulation of liquid crystal

液晶与显示. 2018, 33(1): 23–29 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183301.0023>

文章编号:1007-2780(2021)04-0522-07

光学相位分布曲面的自适应调制系统

张鸿州, 朱智康, 黄 凯, 陆建钢*

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 液晶调制器件的相位分布一直无法实现精确的区域表征, 同时相位分布曲面的驱动电场也只能通过间接光学调制结果进行调整, 因此我们构建了一种相位分布曲面的自适应调制系统。通过将相位深度转换为透过率, 并经过高分辨率探测器件的灰度测试, 可以得到精确的区域相位深度信息。系统将实际的相对透过率分布曲面与预期中理想的相对透过率分布曲面做比较, 代入自适应算法得到新的电压信号, 形成自动化的闭环控制环路。针对迭代调试复杂的问题, 通过自适应调制系统大大减少相位调制过程中的时间, 提升相位分布的调制精度。可广泛应用于液晶光栅和液晶透镜等电控相位调制器件。

关键词: 相位分布曲面; 自适应控制; 液晶相位调制器件; 最小误差平方和

中图分类号: TN206; O753+.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2020-0327

Adaptive modulation system for optical phase profile

ZHANG Hong-zhou, ZHU Zhi-kang, HUANG Kai, LU Jian-gang*

(School of Electronic, Information and Electrical Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The phase distribution of the liquid crystal modulation device is unable to achieve accurate regional characterization, and the driving electric field of the phase distribution can only be adjusted by the indirect optical modulation result. Therefore, we constructed an adaptive modulation system of the phase distribution. By converting the phase depth to transmittance and passing the gray scale test of the high-resolution detector, the accurate regional phase depth information can be obtained. The system compares the actual relative transmittance distribution with the expected ideal relative transmittance distribution and substitutes the adaptive algorithm to obtain a new voltage signal, forming an automated closed-loop control loop. Aiming at the complicated problem of iterative debugging, the adaptive modulation system greatly reduces the time in the phase modulation process and improves the modulation accuracy of the phase profile. It can be widely used in phase modulation devices such as liquid crystal gratings and liquid crystal lenses.

Key words: phase profile; adaptive system; liquid crystal phase modulator; minimum sum square error

收稿日期:2020-12-07; 修订日期:2020-12-24.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61727808, No.61775135)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61727808, No.61775135)

* 通信联系人, E-mail: lujg@sjtu.edu.cn

1 引言

由于可电控调制双折射,液晶相位调制器件在现代光学中起着越来越重要的作用。它可以广泛应用于许多领域,例如液晶光栅^[1-3]和液晶透镜^[4-6]。液晶光栅可产生涡旋光束^[7-8]、矢量光束、艾里光束^[9]和贝塞尔光束,在信息科学和生物学等领域有广泛的应用。液晶透镜有利于增强显示系统中器件的集成,可以有效节约系统空间和减轻器件质量^[10-14],广泛应用于三维显示、成像系统、变焦系统^[15]和光束控制等领域。

液晶调制器件的相位分布一直无法实现精确的区域表征^[16],同时相位分布曲面驱动电场的调制也只能通过间接光学调制结果进行调整,因此我们提出了一种光学相位分布曲面的自适应调制系统。通过相位深度与透过率的转换,利用高分辨率灰度测试装置可以获取相位深度的精确区域分布信息,结合自适应算法,可快速准确地将相位深度调制到设计分布曲面。本系统通过计算机实现自动化操作,节省时间和人力,调控速度和精度较高,将来能应用于液晶光栅和液晶透镜等电控相位器件。

2 自适应相位调制系统的设计原理

2.1 相位调控系统的构成

图1为自适应相位调制系统的原理图。它由光源、多路驱动系统、偏振片、液晶相位调制器件、光学放大系统、高精度亮度测试系统和计算机组成。

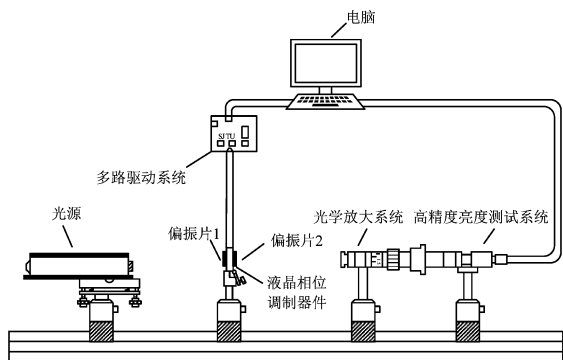


图1 相位调控系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of phase control system

由于液晶相位调制器件的相位深度无法直接表征,我们采用在液晶器件的入射表面和出射表面放置正交偏振片的方式,将其相位深度转化为透过率。光源产生的光束经过偏振片1形成偏振光束。偏振光束经过液晶器件的相位深度调制后,光束对应区域的光程差变化,经过偏振片2后,其光强随之变化。光束通过光学放大系统生成图像,图像由高精度亮度测试系统采集得到灰度信号,灰度信号由电脑转换得到透过率,通过将透过率和电压结合,推导得到精确的区域相位深度信息。

出射光的强度(I)与入射光的强度(I_0)之比,即透过率与相位深度满足公式(1):

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} \sin^2(2\beta) \sin^2\left(\frac{\pi(n_{\text{eff}} - n_o)d}{\lambda}\right), \quad (1)$$

式中, T 为透过率; $2\pi(n_{\text{eff}} - n_o)d/\lambda$ 为相位深度; n_{eff} 为液晶分子的有效非寻常光折射率; β 为偏振片方向与取向层方向的夹角; d 为液晶层的厚度; n_o 为液晶分子的寻常光折射率。

由式(2)可知,相位深度变化 2π ,透过率随之变化一个周期。当 β 为 $\pi/4$ 时,透过率 T 可达到最大值,从而推导出公式(2):

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{4} \left(1 - \cos\left(2\pi \frac{(n_{\text{eff}} - n_o)d}{\lambda}\right)\right), \quad (2)$$

定义 θ 为液晶层厚度方向上液晶分子的平均倾斜角,此时有效折射率 n_{eff} 满足公式(3):

$$\frac{1}{n_{\text{eff}}^2} = \frac{\cos^2\theta}{n_e^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_o^2}, \quad (3)$$

式中, n_e 为液晶分子的非寻常光折射率。

由上式可知,当电压增加时,有效折射率 n_{eff} 从 n_e 减少至 n_o ,从而相位深度 $2\pi(n_{\text{eff}} - n_o)d/\lambda$ 减少。通过改变电压,可改变液晶分子的平均倾斜角 θ ,从而改变相位深度 $2\pi(n_{\text{eff}} - n_o)d/\lambda$,最终改变其透过率 T 。

我们设计了一款具有多路电极的液晶器件。如图2所示。液晶器件的上基板包括玻璃衬底、接地电极和取向层,下基板包括玻璃衬底、多路电极和取向层,液晶层位于上基板与下基板之间。其电极采用钢锡氧化物半导体透明导电薄膜,对光波吸收率低。多路电极共有48路,宽度和间距为 $10\mu\text{m}$,加载交流方波电压($f=1\text{kHz}$, V_{RMS} =

V_{in}), 其中 f 为频率, V_{RMS} 为电压均方根值, V_{in} 为电极对应的驱动电压。

液晶层采用高折射率、高介电常数的液晶材料 HTD028200 ($\Delta n = 0.305$, $\Delta\epsilon = 7.9$, $T_c = 103^\circ\text{C}$, $\gamma_1 = 27 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, $\lambda = 589 \text{ nm}$), 其中 $\Delta\epsilon$ 为介电常数, T_c 为液晶材料的清亮点, 即液晶材料变为各向同性态时的温度, γ_1 为液晶材料的粘滞系数。该液晶材料在 589 nm 波段同时具有高双折射率和高介电常数, 能够实现高相位深度, 满足液晶器件使用的要求。

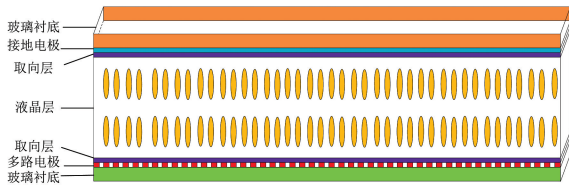


图 2 液晶相位调制器件

Fig.2 Liquid crystal phase modulation device

在液晶相位调制器件上加载固定步长的电压, 可得到透过率与电压的变化曲线。如图 3 所示, 在透过率与电压正相关的绿色区间内, 定义斜率向量 $f(n)$ 为 $+1$; 在透过率与电压负相关的蓝色区间内, 定义斜率向量 $f(n)$ 为 -1 。

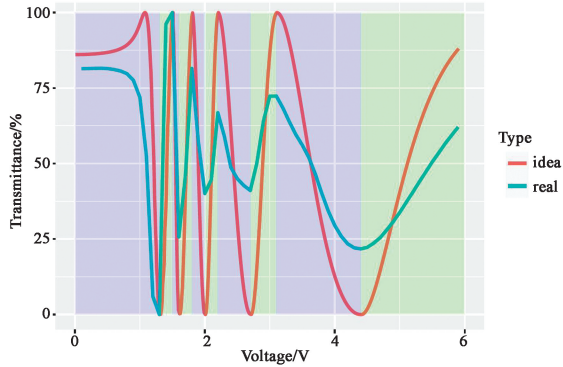


图 3 相对透射率与电压关系

Fig.3 Ideal relative transmittance distribution

采用光学放大系统和高精度亮度测试系统对器件进行灰度测试, 得到器件区域的灰度信号, 对其作归一化处理, 得到相对透射率。由公式(2)可推导出公式(4):

$$2\pi \frac{(n_{\text{eff}} - n_o) d}{\lambda} = a \cos(1 - 4T) \quad (4)$$

上式表明, 可从相对透射率得到多个相位深

度, 再由图(3)可从电压得到多个相位深度中唯一的有效值。例如, 当相对透过率为 50% 时, 若电压位于从左到右的第一个蓝色区间内, 则相位深度变化范围为 $[0, \pi]$, 对应的相位深度为 $2\pi n_e d / \lambda - \pi/2$; 若电压位于从左到右的第一个绿色区间内, 则相位深度变化范围为 $[\pi, 2\pi]$, 对应的相位深度为 $2\pi n_e d / \lambda - 3\pi/2$ 。

我们采用菲涅尔透镜轮廓作为预期的相位深度分布曲面。与相同焦距的自聚焦透镜相比, 菲涅尔透镜的梯度变化快, 周期个数多, 对相位深度的调制要求高, 因此它更适合作为预期的相位深度分布曲面。如图 4 所示, 我们设计了一款菲涅尔透镜 ($f = 50 \text{ mm}$, $r = 1.00 \text{ mm}$), 其中 f 为焦距, r 为半径, 其直径与手机的相机镜头大致相同。

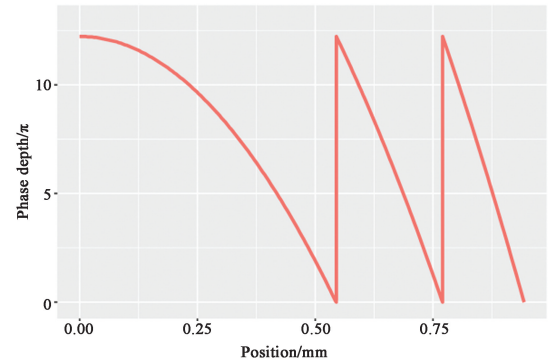


图 4 理想相位深度分布

Fig.4 Ideal phase depth distribution

将理想相位深度分布代入式(2)得到理想透过率分布, 做归一化处理, 得到理想相对透过率分布, 如图 5 所示。理想相对透过率大于 80% 的波峰数量为 15 个, 小于 20% 的波谷数量为 15 个。

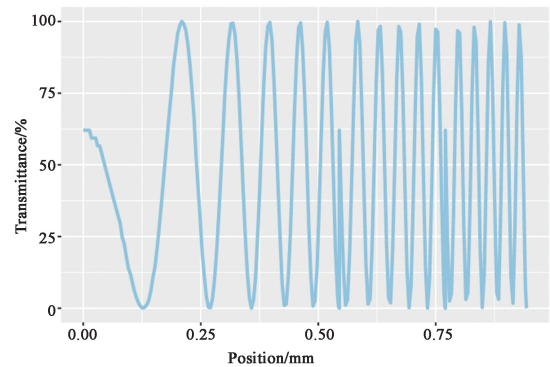


图 5 理想相对透射率分布

Fig.5 Ideal relative transmittance distribution

2.2 相位调控系统的工作原理

相位调控系统得到实测的相对透过率分布曲面后,与预期的理想相对透过率分布曲面做比较,计算二者之间的误差系数。若误差系数小于事先设定的阈值,且结合电压推导的相位深度与理想相位深度在 2π 范围之内,则可认为实测的相位分布曲面符合预期,计算机自动记录驱动电压。若误差系数大于事先设定的阈值,或者结合电压推导的相位深度与理想相位深度在 2π 范围之外,则可以认为实测的相位分布曲面不符合预期,电脑将误差系数代入自适应控制流程,得到调整后的电压分布,并通过多路驱动系统将相应电压信号传至液晶器件。不断重复上述过程,直至相位分布曲面与理想的相位分布曲面之间的误差系数小于事先设定的阈值。

2.3 自适应控制流程

为了实现自动化的调整功能,自适应控制通过采集实测透过率,由计算机按照实现设定的算法进行计算并输出迭代后的电压,如图6所示。迭代电压的变量 Δu 由相对透过率的误差 $e(n)$ 、迭代步长 m 和斜率向量 $f(n)$ 决定。其中,误差系数用于判断电压的调整大小,迭代步长用于判断电压的调整步长,斜率向量用于判断电压的调整方向。

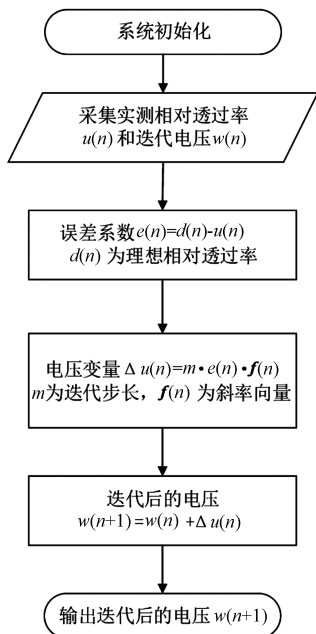


图6 自适应控制流程图

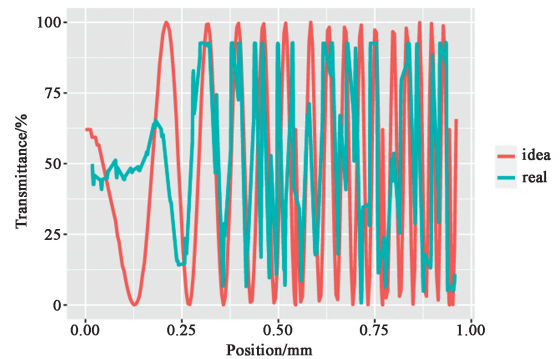
Fig.6 Adaptive algorithm flowchart

3 测量实验与结果

3.1 透过率迭代效果

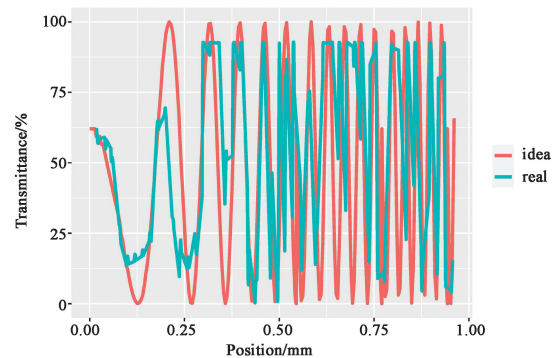
随迭代次数增加,实测相对透过率逐渐与理想相对透过率一致,如图7所示。在迭代初始时,实测透过率曲线在 $0\sim 0.10$ mm范围内为一条水平线,与理想透过率曲线相差40%。在 0.5 mm处的波峰未能与理想透过率的波峰对齐,在 0.7 mm处的波谷未能与理想透过率的波谷对齐。同时透过率大于80%的波峰数量为10个,小于理想透过率的波峰数量15个;透过率小于20%的波谷数量为11个,小于理想透过率的波谷数量15个。

在迭代结束后,实测透过率曲线在 $0\sim 0.10$ mm范围内为一条曲线,与理想透过率曲线贴合。透过率相差最大的地方是 0.12 mm处,实测透过率与理想透过率曲线相差20%。在 0.5 mm处的波峰与理想透过率的波峰对齐,在 0.7 mm处的



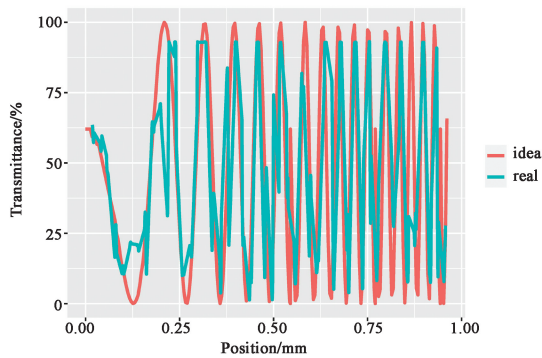
(a)第1次迭代的相对透过率

(a)Relative transmittance of the first iteration



(b)第5次迭代的相对透过率

(b)Relative transmittance of the 5th iteration



(c) 第 15 次迭代的相对透过率

(c) Relative transmittance of the 15th iteration

图 7 相对透过率的迭代过程

Fig.7 Iterative process of relative transmittance

波谷与理想透过率的波谷对齐。同时实际透过率大于 80% 的波峰数量为 15 个, 等于理想透过率的波峰数量 15 个; 透过率小于 20% 的波谷数量为 14 个, 接近理想透过率的波谷数量 15 个, 在 0.80 mm 波谷处的透过率与理想透过率相差 20%, 在波峰和波谷数量上有 50% 的改善。

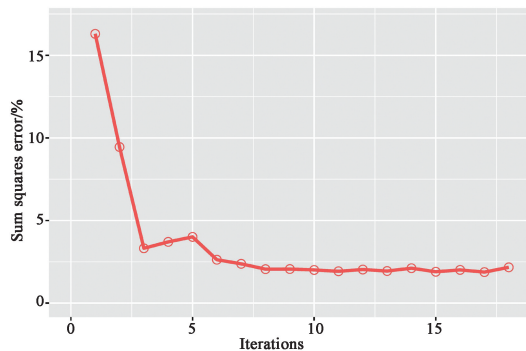


图 8 误差平方和曲线

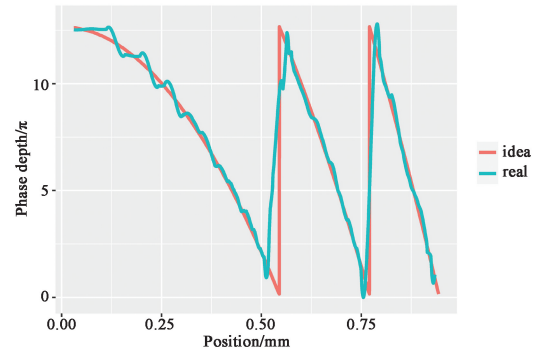
Fig.8 Sum squares error curve

相对透过率的误差平方和曲线也随迭代次数增加而迅速下降并趋于稳定, 如图 8 所示。误差平方和曲线由迭代过程中 48 个区域理想相对透过率和实际相对透过率相减的差值平方求和得到。总体来看, 随着自适应迭代, 实测透过率的误差平方和从 16.30% 减少到 1.87%, 在曲线贴合程度上具有 80% 的改善。误差平方和曲线在迭代后期为一条水平直线, 表明该自适应控制过程具有收敛稳定性。

3.2 相位深度迭代效果

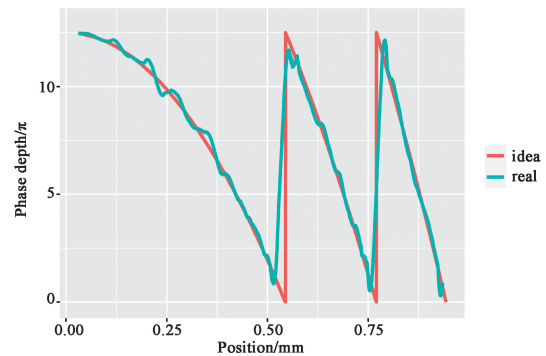
随迭代次数增加, 实测相位深度逐渐与理想相位深度一致, 如图 9 所示。迭代初始时, 在 0.12 mm

处实测相位深度与理想相位深度偏差 π , 在 0~0.50 mm 范围内实测相位深度曲线的波折数量为 10 个。迭代结束时, 在 0.12 mm 处实测相位深度与理想相位深度偏差 0.2π , 减少 80% 的相位差值, 实测相位深度曲线的波折数量从 10 个减少至 4 个。



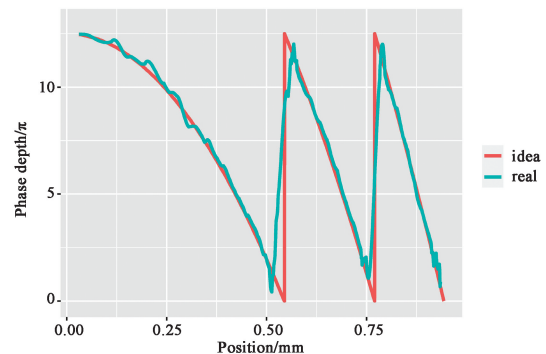
(a) 第 1 次迭代的相位深度分布

(a) Phase depth distribution of the first iteration



(b) 第 5 次迭代的相位深度分布

(b) Phase depth distribution of the 5th iteration



(c) 第 15 次迭代的相位深度分布

(c) Phase depth distribution of the 15th iteration

图 9 相位深度分布的迭代过程

Fig.9 Iterative process of phase depth distribution

4 结 论

提出了一种新的光学相位分布曲面的自适应调制系统。该系统可以精确表征相位分布,同时也可通过计算机自动控制驱动电场,使实际的相位分布曲面接近理想的相位分布曲面,提高液晶

相位调制器件的衍射效率。针对相位分布检测的问题,通过高精度亮度检测系统方法,实现透过率到相位深度的转换。针对迭代调试复杂的问题,通过自适应调制系统,大幅减少相位调制过程的时间,提升相位调制特性。将来能应用于液晶光栅和液晶透镜等电控相位器件。

参 考 文 献:

- [1] LEI T, ZHANG M, LI Y R, *et al.* Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Dammann gratings [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(3): e257.
- [2] DAI H T, SUN X W, LUO D, *et al.* Airy beams generated by a binary phase element made of polymer-dispersed liquid crystals [J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 19365-19370.
- [3] LIU Y J, SUN X W, LUO D, *et al.* Generating electrically tunable optical vortices by a liquid crystal cell with patterned electrode [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(10): 101114.
- [4] SRIVASTAVA A K, WANG X Q, GONG S Q, *et al.* Micro-patterned photo-aligned ferroelectric liquid crystal Fresnel zone lens [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1643-1646.
- [5] WANG X Q, YANG W Q, LIU Z, *et al.* Switchable Fresnel lens based on hybrid photo-aligned dual frequency nematic liquid crystal [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(1): 8-15.
- [6] LIN H C, CHEN M S, LIN Y H. A review of electrically tunable focusing liquid crystal lenses [J]. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 2011, 12(6): 234-240.
- [7] ZHAN Q W. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(1): 1-57.
- [8] YAO A M, PADGETT M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 161-204.
- [9] SIVILOGLOU G A, BROKLY J, DOGARIU A, *et al.* Observation of accelerating airy beams [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(21): 213901.
- [10] 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)
- [11] JI H S, KIM J H, KUMAR S. Electrically controllable microlens array fabricated by anisotropic phase separation from liquid-crystal and polymer composite materials [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(13): 1147-1149.
- [12] REN H W, FAN Y H, GAUZA S, *et al.* Tunable-focus flat liquid crystal spherical lens [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(23): 4789-4791.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 吕文明,张红霞,宋晓敏,等.梯形凸起电极液晶变焦透镜[J].液晶与显示,2018,33(1):30-37.
LV W M, ZHANG H X, SONG X M, *et al.* Tunable liquid crystal lens with raised trapezoidal electrodes [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(1): 30-37. (in Chinese)
- [16] 刘伯晗,张健,吴丽莹.液晶空间光调制器的纯相位调制特性研究[J].光学精密工程,2006,14(2):213-217.
LIU B H, ZHANG J, WU L Y. Research of the phase-only modulation characterization of a liquid crystal spatial light modulator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(2): 213-217. (in Chinese)

作者简介:



张鸿州(1996—),男,四川成都人,硕士研究生,2018 年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事液晶光学方面的研究。E-mail: zhanghz@sjtu.edu.cn



陆建钢(1973—),男,浙江嘉兴人,博士,研究员,2003 年于浙江大学获得博士学位,主要从事液晶材料与光电器件方面的研究。E-mail: lujg@sjtu.edu.cn