

文章编号:1007-2780(2022)08-1079-07

四路电压驱动液晶可变光阑的器件性能

周心晨, 谭奇璞, 李光勇, 尹 伊, 陈晓西*

(电子科技大学 光电科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 为了实现适用性更好的尺寸、椭圆率和中心可变的光阑, 本文设计了一种基于四路电压驱动的液晶器件的可变光阑, 通过数值计算和实验测试对液晶器件有效光阑区域的特性进行研究。通过数值计算仿真器件分布特性, 得到器件不同工作状态的电压条件及光阑中心移动方法的仿真结果; 通过光路搭建测试器件的光阑特性, 达到了圆形光阑和椭圆光阑分布的效果; 对比了移动电场后器件中心的变化与仿真结果。测试结果表明: 通过改变电压的幅值和相位的方式可以控制液晶光阑的工作状态。在上下基板电极频率不同、初始相位差不同的条件下基本实现了不同椭圆率的光阑效果。在有效区域内, 中心平移测量实际值与仿真结果的平均误差为 3.33%。器件基本满足不同孔径通光和场景内移动光阑中心的需求。

关键词: 电场仿真; 液晶可变光阑; 电场移动

中图分类号: O753⁺.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2022-0162

Properties of four voltage driven liquid crystal variable diaphragm

ZHOU Xin-cheng, TANG Qi-pu, LI Guang-yong, YIN Yi, CHEN Xiao-xi*

(School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: A novel low-voltage driven liquid crystal diaphragm driven by four-channel voltage is designed and prepared to realize the elliptical ratio, scale and center variable diaphragm with better applicability. The characteristics of the circular effective diaphragm region of the liquid crystal device are tested by experiment and numerical simulation software. Firstly, through numerical calculation and simulation of the distribution characteristics of the device, the simulation results of the voltage conditions of the device in different working states and the method of moving the center of the diaphragm are obtained. Then, the diaphragm characteristics of the device are tested through the optical path to achieve the distribution effect of the circular diaphragm and the elliptical diaphragm. Finally, the change of the optical axis of the device after moving the electric field is compared with the simulation results. The test results show that the working state of the liquid crystal diaphragm can be controlled by changing the amplitude and phase of the voltage. Under the conditions of different frequency of upper and lower substrate electrodes and different initial phase difference, the elliptical aperture transmission function is basically realized. In the effective region, the average error between the actual value of center translation measurement and the simulation result is 3.33%. The

收稿日期: 2022-05-10; 修订日期: 2022-05-27.

基金项目: 四川省科技厅项目 (No. 2020yj0327)

Supported by Science and Technology Department of Sichuan Province (No. 2020yj0327)

*通信联系人, E-mail: chenxiaoxi@uestc.edu.cn

device basically meets the requirements of different aperture pass and moving aperture center in the scene.

Key words: electric field simulation; liquid crystal variable aperture; electric field movement

1 引言

在成像实际光学系统中,需要对成像光束限制,满足像面和透镜大小的要求。光阑是限制成像光束或成像范围的光孔或框。在成像系统中按作用不同分为孔径光阑、视场光阑、渐晕光阑和消杂光光阑,数值孔径、分辨率和景深都与其有关^[1]。在非成像领域中,环形光阑可用于高通空间滤波与减小热流标定系统的热流源密度^[2],方形光阑可用于灯具主件中调节光斑形状^[3],还有可减少小尺度自聚焦的软边光阑^[4]等元件。随着工业科技的发展,在摄影镜头、显微镜的照明等应用中,需要用到可变光阑控制照明光束的宽度以改变成像面的照度、衬度来控制照明范围,限制杂散光进入成像空间,例如谢琼碧等人研发了一款两片式方形孔径光阑结构,为显微镜的应用提供了更好的照明环境^[5]。现有的可变光阑机构分为手动式和电控式。手动式可变光阑不利于控制光阑的开启速度,存在精度低、重复性差等问题。传统电控式可变光阑多采用驱动电机、涡轮和蜗杆结构,存在传动精度低、摩擦力大和寿命短等问题^[6]。Murade 等人在上下玻璃间填充不透明的油性液体与添加电场,通过改变电场强度和频率来改变油层直径从而改变光通量这种电润湿的方法改进了电控式可变光阑^[7]。中国科学院西安光学精密机械研究所的赵怀学等人采用改变光阑结构为双弧形有效解决了圆形收缩光阑存在的最小光阑孔径问题^[8]。Haan 等人则通过加装热驱动器,以外加电压控制金属的热膨胀和收缩来控制光阑的通光,改善电控式可变光阑^[9]。液晶材料具有优异的电光效应,液晶分子在电场作用下会发生偏转。人们采用液晶材料设计和制备如光开关、液晶可调波片、液晶透镜等光学元件^[10-14]。早在 1986 年,Ooba 等人便提出了 4 种电压信号驱动的具有扭曲向列效应的液晶光阑^[15]。

本文介绍了一种基于反平行排列液晶盒的可变光阑,通过四路电压驱动实现光阑大小、椭圆率和中心位置的改变。

2 液晶可变光阑结构及其工作原理

2.1 液晶可变光阑的结构

图 1 为液晶可变光阑的俯视结构图,该器件由上偏振片、上玻璃基板、液晶层、下玻璃基板和下偏振片构成。在每块透明玻璃基板两端镀置条状金属或氧化铟锡(ITO)电极,其余部分镀有方块电阻为 $10^4 \sim 10^6 \Omega/\text{mm}^2$ 的高阻抗膜。两块透明基板垂直交叠排列形成具有矩形通光口径的液晶可变光阑。如图 1 所示,上玻璃基板两端电极分别为 A 和 B、下玻璃基板两端电极分别为 C 和 D。通过改变 4 个电极 A、B、C、D 上的电压 $V(V_i, f_i, \phi_i)$ 来实现有效区域内平均电场分布的改变,进而控制液晶分子的排列分布,其中 V 为输入电压的幅值, f 为输入电压的频率, ϕ_i 为输入电压的初相位。器件结构截面图如图 2 所示,由于采用负性液晶的垂面取向,在低电压驱动下,负性液晶使

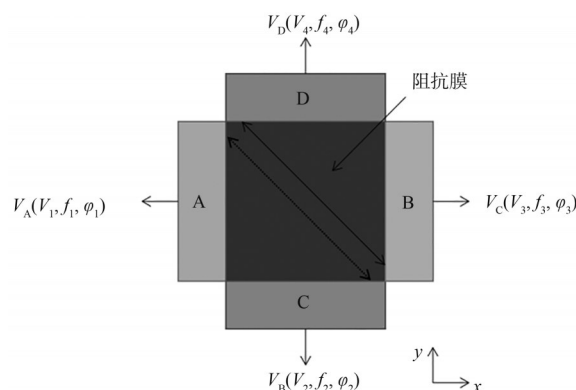


图 1 液晶光阑俯视图

Fig. 1 Top view of the liquid crystal diaphragm

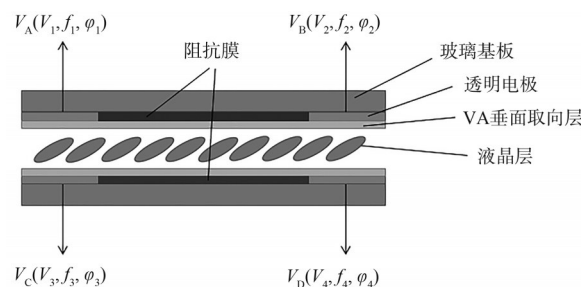


图 2 液晶光阑结构截面图

Fig. 2 Cross section view of the liquid crystal diaphragm

器件呈透过态。

2.2 液晶可变光阑的工作原理

液晶可变光阑通过在ITO电极上施加函数电压使阻抗膜间产生合适的平均电压差分布,即液晶层内产生合适的电场分布。液晶分子指向矢在电场作用下产生特定偏转,偏转程度取决于施加电场的频率电压等参数。选用透过率高、稳定性良好的掺铝氧化锌(AZO)导电薄膜为高阻层,采用射频磁控溅射法在玻璃基板表面镀膜。如图3所示,位于器件中心的负性液晶在低于阈值电压的电场作用下基本不发生偏转,在这种状态下,中心区域液晶分子对经过检偏器入射的线偏振光没有明显的调制作用,线偏光维持原有偏振态通过检偏器,达到透光的效果。在高于阈值电压的电场作用的区域,对入射线偏振光加入特定的相位延迟量,使线偏光的偏振状态发生改变,从而无法通过检偏器,达到消光的效果。由此产生的可调光阑可以通过电极施加的电压进行调制。

同一基板两电极之间的电压分布如图4所示。光阑中心区域 d 达到阈值,维持入射线偏光偏振特性不变,其他区域偏振态被改变,液晶器

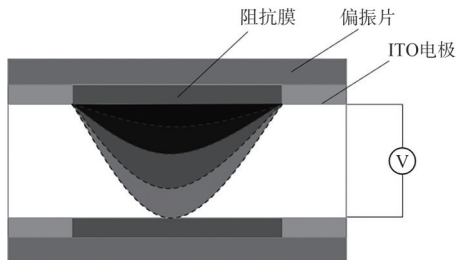


图3 光阑原理

Fig. 3 Diaphragm principle

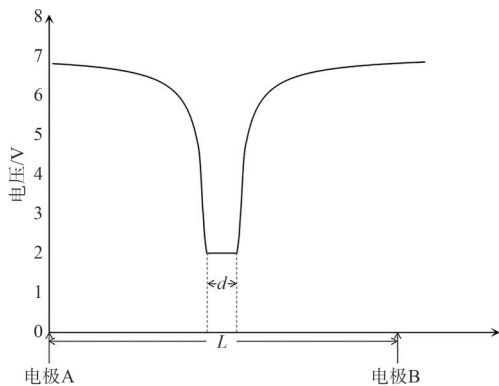


图4 电压位置分布图

Fig. 4 Voltage distribution diagram

件前后偏振片方向平行,从而使该区域光无法通过检偏器,形成光阑效果。

3 测量实验与结果

3.1 液晶可变光阑电场仿真计算

通过控制幅值、相位和频率3个变量,分别控制液晶器件的4个电极。根据液晶分子指向矢分布受电压控制的特点,达到电控驱动液晶光阑的目的。

通过数值计算对液晶光阑的圆形有效区域进行仿真计算。如图5所示,建立归一化坐标系。有效区域中心处为坐标原点,4个电极对应中心点A、B、C、D的坐标分别为 $(-1, 0)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(0, -1)$ 、 $(0, 1)$ 。

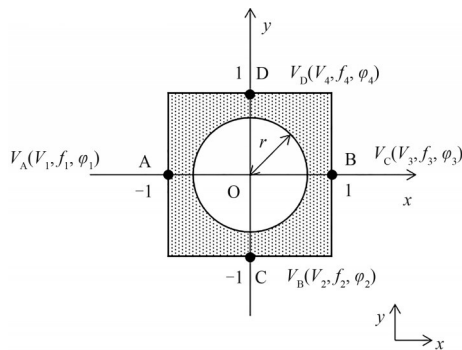


图5 有效区域归一化坐标系

Fig. 5 Normalized coordinate system of the effective area

镀有高阻膜的液晶器件上电压近似呈线性分布,可以得到所取有效区域内液晶层内有效电压为:

$$V = \sqrt{\frac{\int_0^T (V_{\text{upper}} - V_{\text{lower}})^2}{T}}, \quad (1)$$

其中: V_{upper} 和 V_{lower} 分别表示上基板和下基板的瞬时电压。在保证积分时间 T 小于液晶响应时间,并且同一基板两电极所加电压频率相等,即 $f_1 = f_2, f_3 = f_4$ 条件下进一步化简,令上下基板频率不相等,可以得到:

$$\begin{aligned} V_{\text{rms}}^2 = & \left[\frac{1}{8} V_1^2 (x-1)^2 + V_2^2 (x+1)^2 + \right. \\ & V_3^2 (y-1)^2 + V_4^2 (y+1)^2 - \\ & 2V_1 V_2 (x+1)(x-1) \cos \phi_{21} - \\ & \left. 2V_3 V_4 (y+1)(y-1) \cos \phi_{43} \right]. \quad (2) \end{aligned}$$

其中: $\phi_{21} = \phi_2 - \phi_1, \phi_{43} = \phi_4 - \phi_3$ 。可以得出其电场分布是椭圆分布, 且由椭圆方程 $Ax^2 + By^2 + Cxy + Dx + Ey + F = 0$ 可以得到该椭圆方程系数为:

$$\begin{cases} A = \frac{1}{8}(v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2 \cos \phi_{21}) \\ B = \frac{1}{8}(v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2 \cos \phi_{43}) \\ C = 0 \\ D = \frac{1}{8}(-2v_1^2 + 2v_2^2) \\ E = \frac{1}{8}(-3v_3^2 + 2v_4^2) \\ F = \frac{1}{8}[v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + v_4^2 + 2v_1v_2 \cos \phi_{21} + 2v_1v_2 \cos \phi_{43}] \end{cases} \quad (3)$$

椭圆方程对应的中心点坐标为:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{CE - 2BD}{4AB - C^2} \\ y_0 = \frac{CD - 2AE}{4AB - C^2} \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)计算可得, 有效区域电场的中心点坐标表示为:

$$\begin{cases} x = \frac{V_1^2 - V_2^2}{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos \phi_{21}} \\ y = \frac{V_3^2 - V_4^2}{V_3^2 + V_4^2 - 2V_3V_4 \cos \phi_{43}} \end{cases} \quad (5)$$

可以看出, 当 $V_1 = V_2$ 且 $V_3 = V_4$ 时, 有 $x = y = 0$ 。此时, 有效电场满足中心位置条件。由式(2)可知, 在保证有效电场中心位置条件的基础上, 当 x^2 和 y^2 系数相等时, 即可形成圆形分布电场, 即:

$$\begin{aligned} V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos \phi_{21} = \\ V_3^2 + V_4^2 - 2V_3V_4 \cos \phi_{43} \end{aligned} \quad (6)$$

简单满足 $\phi_{21} = \phi_{43} = \phi$ 时, 有 4 个电极输出幅值相等, 且 $f_1 = f_2 \neq f_3 = f_4$, $V_1 = V_2 = V_3 = V_4$ 。仿真过程中默认 $f_1 = f_2 = 1$ kHz, $f_3 = f_4 = 2$ kHz, 取 $V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = 5$ V, $\phi = 120^\circ$ 时, 仿真结果如图 6 所示。选取的有效区域满足中心电场分布, 并且电场梯度分布呈良好的圆形分布。

液晶器件有效区域光场分布的椭圆比由式(3)中系数 A 与 B 的比值决定, 取 $V_1 = V_2 = 5$ V, $V_3 = V_4 = 10$ V, 根据式(2)得出均方根电压 V_{rms} 电场分布为椭圆, 由于低压驱动液晶器件椭圆特性比

较复杂, 在本文实验中不考虑椭圆中心偏移的情况, 仿真结果如图 7 所示, 形成了长轴短轴比为 2 的椭圆中心电场分布。

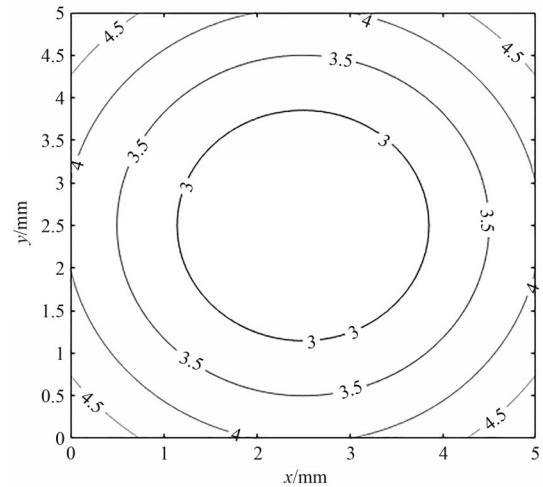


图 6 液晶光阑圆形电场分布

Fig. 6 Circular electric field distribution of liquid crystal diaphragm

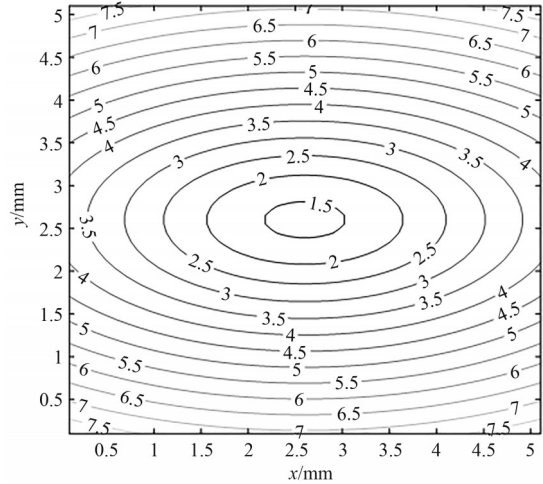


图 7 液晶光阑椭圆电场分布

Fig. 7 Elliptical electric field distribution of liquid crystal diaphragm

根据式(5)可得, 可以通过改变同一基板上两电极初始相位差 ϕ_{21} 和 ϕ_{43} 以及电压幅值来改变电场中心位置并实现预期椭圆比的分布。当 $V_1 = 5.7$ V, $V_2 = 3.5$ V, $V_3 = 5.4$ V, $V_4 = 3.8$ V, $\phi_{21} = 120^\circ$, $\phi_{43} = 108^\circ$, 得到仿真结果如图 8(a) 所示; 当 $V_1 = 3.8$ V, $V_2 = 5.4$ V, $V_3 = 3.5$ V, $V_4 = 5.7$ V, $\phi_{21} = 108^\circ$, $\phi_{43} = 120^\circ$, 得到仿真结果如

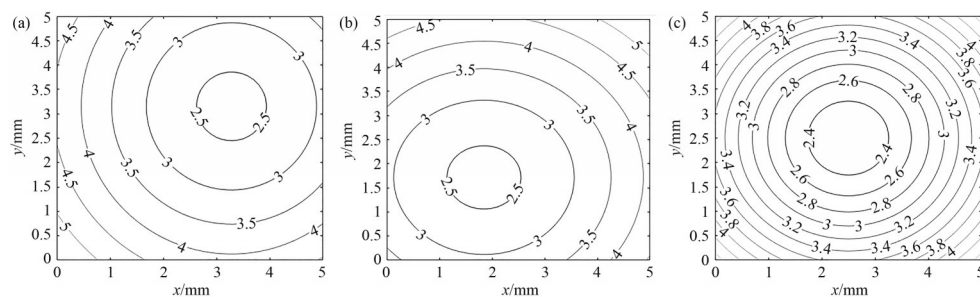


图8 电场分布。(a) $V_1=5.7\text{ V}$, $V_2=3.5\text{ V}$, $V_3=5.4\text{ V}$, $V_4=3.8\text{ V}$; (b) $V_1=3.8\text{ V}$, $V_2=5.4\text{ V}$, $V_3=3.5\text{ V}$, $V_4=5.7\text{ V}$; (c) $V_1=V_2=V_3=V_4=4.5\text{ V}$ 。

Fig. 8 Electric field distribution. (a) $V_1=5.7\text{ V}$, $V_2=3.5\text{ V}$, $V_3=5.4\text{ V}$, $V_4=3.8\text{ V}$; (b) $V_1=3.8\text{ V}$, $V_2=5.4\text{ V}$, $V_3=3.5\text{ V}$, $V_4=5.7\text{ V}$; (c) $V_1=V_2=V_3=V_4=4.5\text{ V}$ 。

图8(b)所示;当 $V_1=V_2=V_3=V_4=4.5\text{ V}$, $\phi_{21}=\phi_{43}=120^\circ$, 得到仿真结果如图8(c)所示,此时电场为中心圆形分布电场。可以看出在电场梯度分布基本不改变的情况下达到了移动中心的效果。

3.2 液晶可变光阑特性测量

测试系统光路示意图如图9所示。测试系统由激光器出射532 nm绿光经过偏振片1后转化为线偏振光,由于液晶分子的双折射特性,线偏振光通过液晶器件后,液晶器件将线偏光分解为o光和e光两种成分,液晶只对e光有调制作用。经过检偏器时,e光经过液晶的调制偏振态发生改变,o光偏振态不改变,由图像传感器记录。通过分析对比成像区域大小和形状观察光阑特性变化。

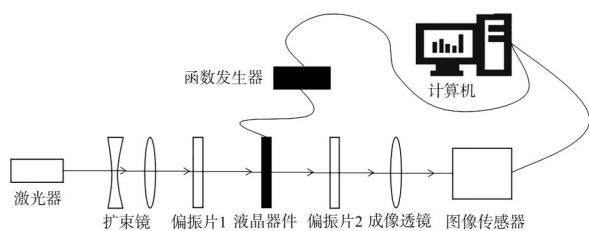


图9 测试系统光路示意图

Fig. 9 Test system optical path

根据式(3)得出的中心圆电场条件,使用图9测试光路,在 $f_1=f_2=1\text{ kHz}$, $f_3=f_4=2\text{ kHz}$ 的条件下测量得出满足中心位置条件的圆形光阑,如图10(a)所示,由于测试光路中偏振片等器件的影响,产生了部分细微条纹,但基本实现了光阑圆形分布的功能。改变相邻电极输入电压幅值,

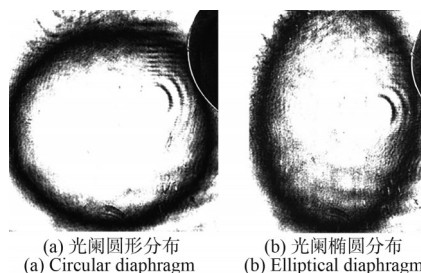


图10 液晶光阑椭圆分布

Fig. 10 Elliptic distribution of liquid crystal diaphragm

在长短轴比为2的条件下采集图像如图10(b)所示,基本实现了椭圆光阑的功能。

3.3 液晶可变光阑光轴移动测量

液晶器件可以通过改变驱动电压,在保持电场梯度变化的情况下,改变电场中心。若选取合适的驱动参数让液晶可变光阑正常工作,则可以通过电场移动的方式实现光轴可调节的液晶光阑。由于液晶可调光阑椭圆分布特性较为复杂,本文只考虑圆形中心偏移的情况,如图11所示。

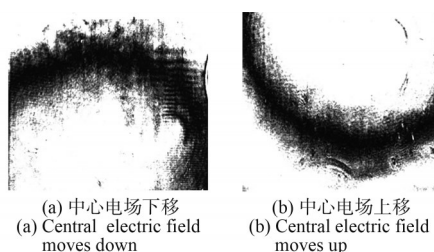


图11 电场中心移动

Fig. 11 Electric field center movement

根据式(5)计算4个电极输入电压幅值和相位差改变时的电场中心移动情况。通过图9所示的测试光路,得到器件电场中心移动后的数

据结果如表 1 所示。在电场平移的过程中,条纹区域内,电场平移没有使得器件电场梯度发生没有发生明显的堆积或其他形状变化。在有效改变。

表 1 电场移动下的测试参数

Tab. 1 Test parameters of electric field movement

电压参数	0	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
幅值	V_1/V_{rms}	4.0	3.0	6.0	3.8	5.7	5.4
	V_2/V_{rms}	4.0	6.0	3.0	5.4	3.5	3.8
	V_3/V_{rms}	4.0	4.5	4.5	3.5	5.4	3.8
	V_4/V_{rms}	4.0	4.5	4.5	5.7	3.8	5.4
相位	$\varphi_1=\varphi_3/(^{\circ})$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	$\varphi_2/(^{\circ})$	120.0	100.0	120.0	108.0	120.0	108.0
	$\varphi_4/(^{\circ})$	120.0	120.0	100.0	120.0	108.0	108.0
	中心坐标(x_0,y_0)	(0,0)	(-0.41,0)	(0.48,0)	(-0.21,-0.32)	(0.33,0.24)	(0.25,-0.27)
仿真结果(x,y)		(0,0)	(-0.52,0)	(0.52,0)	(-0.24,-0.31)	(0.31,0.24)	(0.26,-0.26)

取 $r^2=x^2+y^2$, 计算移动后的中心位置距器件中心的距离与仿真结果对比,如图 12 所示,具体电压参数条件见表 1。可以看出,实际测量结果与仿真数据结果基本吻合,计算得到其平均误差为 3.33%,在电压参数(a)的条件下的误差较大可能是由于器件制作时实际中心与仿真中心

的偏差导致。制作的四路低压驱动液晶光阑能够实现光阑中心发生预想中的移动,对不同场景有更好的适用性。

4 结 论

本文根据更高效可变光阑的需求,设计了一种四路低压驱动镀有方块电阻范围为 $10^4\sim10^6\ \Omega/\text{mm}^2$ 的高阻膜的液晶可变光阑结构,并通过数值仿真得出了器件的相位特性和不同驱动状态的驱动方法。实际测量结果证明:所制备的四路低压驱动液晶器件具有良好的可变光阑性能,能在 $f_1=f_2=1\ \text{kHz}, f_3=f_4=2\ \text{kHz}$ 的频率下以 4 V 电压幅值驱动为基准,根据电压幅值和相位差改变电场中心位置,移动平均误差为 3.33%。

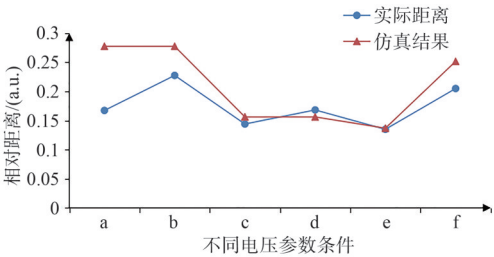


图 12 仿真结果对比

Fig. 12 Comparison of simulation results

参 考 文 献:

[1] 高爱梅,李星辰,王婷婷. 光学系统设计中的光阑应用分析[J]. 电子工业专用设备,2019,48(2):24-27.
GAO A M, LI X C, WANG T T. Analysis of diaphragm applied to optic system design [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2019, 48(2): 24-27. (in Chinese)

[2] 朱新新,王辉,杨庆涛,等. 一种环形光阑:中国,206420589U[P]. 2017-08-18.
ZHU X X, WANG H, YANG Q T, *et al.* Annular diaphragm: CN, 206420589U [P]. 2017-08-18. (in Chinese)

[3] 韩天云. 方形光阑(01):中国,303672064S[P]. 2016-05-11.
HAN T Y. Square diaphragm (01): CN, 303672064S [P]. 2016-05-11. (in Chinese)

[4] MCCANN T E, DEGROOT J S. Acceleration of solid macro-particles by laser produced ablation [J]. *Bulletin of the American Physical Society*, 1977, 22(9): 1205-1206.

[5] 谢琼碧. 一款新型可变光阑的设计[J]. 机电技术,2015(3):17-18.

- XIE Q B. A new type of variable aperture design [J]. *Mechanical & Electrical Technology*, 2015(3): 17-18. (in Chinese)
- [6] 汪洋,陈安森. 一种电控可变光阑杜瓦:中国,202886705U[P]. 2013-04-17.
WANG Y, CHEN A S. Electrically-controlled variable diaphragm Dewar: CN, 202886705U [P]. 2013-04-17. (in Chinese)
- [7] MURADE C U, OH J M, ENDE DVAN DEN, *et al.* Electrowetting driven optical switch and tunable aperture [J]. *Optics Express*, 2011, 19(16): 15525-15531.
- [8] 赵怀学,赵建科,段亚轩,等. 高精度电控光阑装置:中国,104749767B[P]. 2017-05-03.
ZHAO H X, ZHAO J K, DUAN Y X, *et al.* High-precision type electric control diaphragm device: CN, 104749767B [P]. 2017-05-03. (in Chinese)
- [9] HAAN K, CHUN K. Tunable aperture controlled by thermal expansion of copper beams [C]//2017 *IEEE AFRI-CON*. Cape Town: IEEE, 2017.
- [10] SATO S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1979, 18(9): 1679-1684.
- [11] KONFORTI N, MAROM E, WU S T. Phase-only modulation with twisted nematic liquid-crystal spatial light modulators [J]. *Optics Letters*, 1988, 13(3): 251-253.
- [12] 王芬,谭炳辉,潘雪丰,等. 一种基于聚合物分散液晶的荧光开关研究[J]. 光电子·激光,2011,22(4):520-523.
WANG F, TAN B H, PAN X F, *et al.* Study on a kind of fluorescent switch based on PDLC [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2011, 22(4): 520-523. (in Chinese)
- [13] NOSE T, SATO S. A liquid crystal microlens obtained with a non-uniform electric field [J]. *Liquid Crystals*, 1989, 5(5): 1425-1433.
- [14] 巩伟兴,于涛,王伟邴,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)
- [15] Ooba Y, Sugihara S, Shiwa S. Basic study of a bright area-modulative liquid crystal cell [C]//*Proceedings of SPIE* 0639, *Optical Information Processing II*. Orlando: SPIE, 1986: 47-55.

作者简介:



周心晨(1998—),男,湖北监利人,硕士研究生,2020年于电子科技大学获得学士学位,主要从事液晶光电子器件的研究。E-mail: laoluoto1228@163.com



陈晓西(1979—),女,浙江温州人,博士,副教授,2008年于浙江大学获得博士学位,主要从事液晶光电子器件及计算成像等方面的研究。E-mail: chenxiaoxi@uestc.edu.cn