

四电极液晶可调光楔驱动方法

徐律涵, 张亚磊, 刘志强, 叶茂*

电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 611731

摘要 光楔是一种顶角很小的棱镜,常被用于控制光束的偏转角或补偿光线小角度的偏差。提出了一种四电极驱动的矩形孔液晶器件实现光楔的驱动方法。该液晶光楔的优势在于体积小、质量轻,可以通过电压控制其楔角大小、无需机械装置就可旋转光楔,有望被应用在需要控制光束偏转方向和角度的场合中,如光镊、激光雷达等。

关键词 光学器件; 液晶器件; 光楔; 光束偏转; 相位调制器

中图分类号 TN715+.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1323001

Driving Method for Adjustable Liquid Crystal Optical Wedge with Four Electrodes

Xu Lühan, Zhang Yalei, Liu Zhiqiang, Ye Mao*

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

Abstract The optical wedge is a prism with a small apex angle, which is often used to control the deflection angle of the light beam or compensate for the deviation of the small angle of the light beam. A driving method for a kind of liquid crystal device driven by four electrodes with rectangular aperture to realize an optical wedge is proposed. The advantage of the liquid crystal wedge lies in its small size and light weight. The wedge angle can be controlled by voltage and the optical wedge can be rotated without a mechanical device. It is expected to be used in some fields where the deflection direction and angle of the beam need to be controlled, such as optical tweezers, lidar and so on.

Key words optical devices; liquid crystal device; optical wedge; beam deflection; phase modulator

1 引言

随着科学技术的发展,诸多光学器件(如光镊、激光雷达)都需要对光束进行精确控制。由于轻量化的趋势,因此光学器件对体积、质量较为注重。光楔是一种楔角很小的棱镜,其可以对垂直入射的光束进行小角度的偏转,由于偏转角度不可变,故常通过两个光楔的组合,使它们分别绕一公共轴心旋转用以产生不同的偏向角^[1-6]。然而,这种双光楔系统需要利用机械装置来控制两个光楔旋转,这大大增加了系统的体积,并且偏向角的控制方式较为复杂。

液晶(LC)具有双折射特性,自它被发现以来,诸多研究者对液晶相位调制器件展开了研究。使用楔形液晶盒实现可调光楔的方式被证实可行。

2017年,Laberdesque等^[7]使用楔形的液晶盒制作了可调的液晶光楔并将其应用于干涉仪中以调节干涉条纹的疏密,由于盒厚不均匀,故调节效果并不理想。液晶光学相控阵是一种新型的可编程相位调制器件,通过外加电压调制入射光的波前相位实现光束的偏转。然而,由于其形成的相位分布并不连续且易受到平面电极间间隔的影响,故偏转性能并不优秀^[8-10]。

2006年,Hands等^[11]在光镊中使用四电极的液晶器件,实现了一定角度内的光束偏转,其使用高阻膜进行分压,可以在有效区域内实现线性连续的相位分布,但仅限于在两个正交的方向上。之后,Ivanova等^[12]使用此结构实现了 $\pm 45^\circ$ 方向的偏转,并指出其可以实现任意方向的偏转。本文基于此结构提出了一种液晶光楔的驱动方法,通过施加适

收稿日期: 2021-10-27; 修回日期: 2021-12-29; 录用日期: 2022-01-10

基金项目: 四川省科技计划(2021YJ0102)

通信作者: *mao_ye@uestc.edu.cn

当的电压组合可以同时改变偏转方向和偏转角度, 进而能够任意控制光束的指向。

2 基本原理

2.1 液晶光楔结构

液晶光楔由上下两块镀有氧化铟锡 (ITO) 电极图形的玻璃基板和中间的液晶层构成。如图 1 所示, 上下玻璃基板的两侧有矩形的 ITO 电极, 中间镀有均匀分布的高阻抗膜, 矩形电极之间的距离可调, 上下基板反向平行摩擦, 成盒时由间隔子控制盒厚, 液晶为向列相液晶, 两基板高阻抗膜重叠的矩形区域即为有效区域。

2.2 电场特性

4 个矩形 ITO 电极分别对应 4 个正弦驱动电压 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 , 在有效区域内建立坐标系, 如图 2 (a) 所示, 规定沿着上基板 V_1 到 V_2 的方向为 x 轴正方向, 沿着下基板 V_3 到 V_4 的方向为 y 轴正方向, 坐标原点为有效区域的中心。为表征光束的偏转方向角 φ 和偏转角度 θ , 建立了图 2 (b) 中的空间坐标系, 规定入射光束方向为 z 轴, 液晶光楔平面为 xoy 平面。

正弦驱动电压 $V_i (i=1, 2, 3, 4)$ 的表达式为

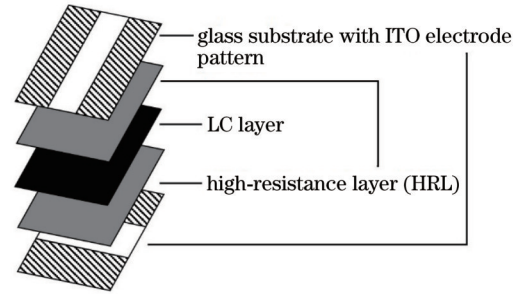


图 1 矩形孔 LC 光楔结构图

Fig. 1 Structural diagram of LC optical wedge with rectangular aperture

$$V_i = v_i \sin(f_i t + \phi_i), \quad (1)$$

式中: v_i 为电压幅值; f_i 为电压频率; ϕ_i 为电压相位。

在给本文中的液晶器件的 4 个电极施加同频率 ($f_1=f_2=f_3=f_4$) 同相位 ($\phi_1=\phi_2=\phi_3=\phi_4=0$) 的正弦电压的情况下, 当电压幅值满足 $\max(v_1, v_2) < \min(v_3, v_4)$ 或 $\max(v_3, v_4) < \min(v_1, v_2)$ 时, 有效区域的电场分布为倾斜平面, 本文使用的是后一种情况。改变 4 个电压的幅值, 可以旋转和倾斜该电场平面。

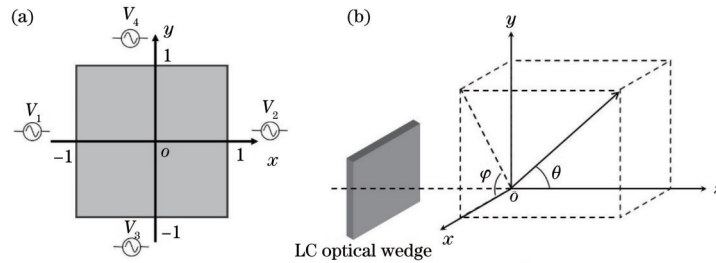


图 2 LC 光楔坐标系。(a) LC 光楔有效区域平面坐标系; (b) 光束偏转空间坐标系

Fig. 2 Coordinate system of LC optical wedge. (a) Plane coordinate system of effective area of LC optical wedge; (b) spatial coordinate system of beam deflection

当高阻抗膜的模式参数较小时, 电压在高阻抗膜上呈线性分布^[13-14], 此时上下基板的电压分布为

$$\begin{cases} V_{\text{up}}(x, y) = V_1 + \frac{(V_2 - V_1)(x + 1)}{2} \\ V_{\text{down}}(x, y) = V_3 + \frac{(V_4 - V_3)(y + 1)}{2} \end{cases} \quad (2)$$

对上下基板压差在一个周期内进行积分可得有效区域的有效电压分布 v_{rms} , 其表达式为

$$v_{\text{rms}} = \frac{\sqrt{2}}{4} |v_3 + v_4 + v_1(-1 + x) - v_2(1 + x) - v_3y + v_4y| \quad (3)$$

有效电压形成的是一个倾斜的平面, 其法向量在 xoy 平面的投影与偏转光束在 xoy 平面的投影共线, 并且工作区域内的最大与最小有效电压一定出现在正方形的 4 个顶点处。因为本文中使用的为正性液晶, 所以偏转光束在 xoy 平面的投影由最大电压指向最小电压且垂直于有效电压等势线, 即

$$\begin{cases} \cos \varphi = \frac{v_1 - v_2}{(v_1 - v_2)^2 + (v_4 - v_3)^2} \\ \sin \varphi = \frac{v_4 - v_3}{(v_1 - v_2)^2 + (v_4 - v_3)^2} \end{cases} \quad (4)$$

这样便得到了偏转方向角 φ , 偏转角度 θ 需要结合液晶光楔的长度 l 来确定。图 3 为不同 φ 下的有效电压等势线分布图, 液晶光楔的长度 l 并非固定值, 它随着偏转方向角 φ 的变化而变化, 其满足的函数关系为

$$l = \begin{cases} \sqrt{2} a |\cos(\varphi - \pi/4)|, & \varphi \in \left[-\pi, -\frac{\pi}{2}\right] \cup \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \\ \sqrt{2} a |\sin(\varphi - \pi/4)|, & \varphi \in \left(-\frac{\pi}{2}, 0\right) \cup \left(\frac{\pi}{2}, \pi\right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: a 为正方形有效区域的边长, 可以看出光楔的长度 l 变化范围为 $[a, \sqrt{2}a]$ 。

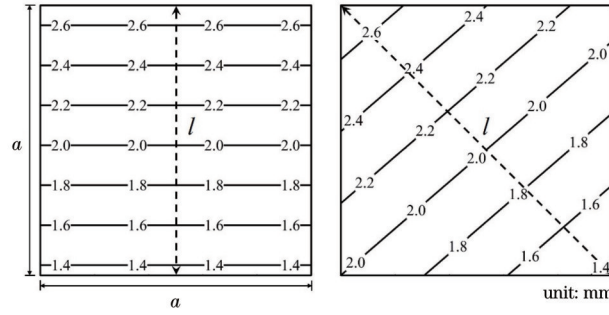


图 3 不同偏转方向的光楔长度

Fig. 3 Length of optical wedge at different deflection directions

图 4 中所用向列相液晶(江苏合成有限公司, HTW137700-100)的寻常光折射率为 1.513, 非寻常光折射率为 1.774, 液晶盒盒厚为 50 μm , 响应时间为 2 s^[15], 使用波长为 457 nm 的激光观察液晶盒随电压的亮暗变化, 得到了液晶相位延迟随有效电压的变化曲线。可以看出, 当有效电压值在液晶的线性响应区间内时, 相位延迟与有效电压成近似线性关系。因此, 提出两种电压驱动方法来控制偏转角度 θ 的大小:

1) 固定工作区域最小有效电压值为液晶线性工作区内最小电压 v_{\min} , 控制有效区域内的最大有效电压值 v_{\max} 在液晶线性响应电压区间内变化, 得到偏转角度 θ 的表达式为

$$\theta = \arctan \left[\frac{\delta_{\max}(v_{\max} - v_{\min})}{(v_{\max} - v_{\min})l} \right], \quad (6)$$

式中: δ_{\max} 为在液晶的线性工作区域内产生的最大光程差;

2) 固定工作区域最大有效电压值为液晶线性工作区内的最大电压 v_{\max} , 控制工作区域内的最小有效电压值 v_{\min} 在液晶线性响应电压区间内变化, 得到偏转角度 θ 的表达式为

$$\theta = \arctan \left[\frac{\delta_{\max}(v_{\max} - v_{\min})}{(v_{\max} - v_{\min})l} \right]. \quad (7)$$

本文中采用的液晶线性响应区间为 1.5~2.5 V, 选用式(6)的电压驱动方法进行实验。

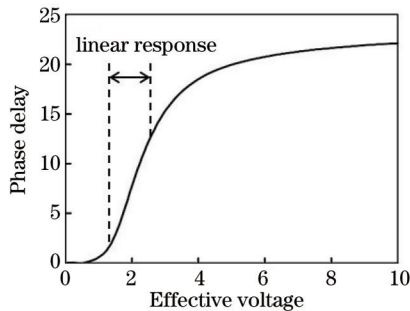


图 4 50 μm LC 盒的相位延迟随有效电压的变化

Fig. 4 Phase delay of 50 μm LC cell varying with effective voltage

3 液晶光楔实验

选用与图 4 中相同的液晶材料, 按照图 1 中的结构制备出大小为 5 mm \times 5 mm 的正方形孔径的液晶光楔, 液晶盒盒厚为 50 μm , 高阻抗膜的材料为氧化锌掺铝。在本实验的器件孔径尺寸下, 此高阻抗膜的模式参数较小, 电压在高阻抗膜上呈线性分布趋势^[13-14]。将液晶光楔置于迈克耳孙干涉光路中, 使用 457 nm 波长的激光器观察干涉条纹。在图 5(a)中, 通过改变电压实现了对偏转方向角 φ 的控制, 即对光楔进行旋转。在图 5(b)中, 通过改变电场的倾斜度, 实现了对偏转角度 θ 的控制。

搭建了图 6 所示的测试光路对液晶光楔的偏转能力进行测试, 激光经过扩束镜后进入偏振片, 偏振片方向与液晶光楔摩擦方向平行, 偏振光束经过液晶光楔后发生一微小角度偏转, 偏转后的光束进入焦距为 f 的玻璃透镜后被聚焦于互补金属氧化物半导体器件(CMOS)上。初始状态时液晶光楔不工作, 光束聚焦在透镜光轴上。当液晶光楔开始工作时, 由于入射到玻璃透镜的光束有一定的入射角, 故此时焦点会在焦平面上发生移动, 如图 7 所示。测量该焦点在不同电压下的 x 与 y 方向的移动像素个数 n_x 与 n_y , 则光楔的偏转方向角测量值 φ_m 与偏转角度测量值 θ_m 的表达式为

$$\theta_m = \arctan \left[\frac{\sqrt{(n_x d_x)^2 + (n_y d_y)^2}}{f} \right], \quad (8)$$

$$\varphi_m = \arctan \left(\frac{n_x d_x}{n_y d_y} \right), \quad (9)$$

式中: d_x 和 d_y 为 CMOS 的像素尺寸, 值均为 2.2 μm 。本实验中 f 为 500 mm。

根据实验数据, 该光楔的偏转方向角测量值为 $\varphi_m \in [-180^\circ, 180^\circ]$, 可实现偏转角度测量值为 $\theta_m = [0, 0.048^\circ]$ 。如图 8 所示, 实验测量值与理论值之间存在一定误差, 主要是因为液晶光楔的偏转角度较小, 光束的偏转准确性会受到光路准直性、液晶盒盒厚均匀性和高阻膜均匀性的影响。与使用楔形液晶盒的液晶光楔相比, 所设计的液晶光楔可以实现对偏转方向角

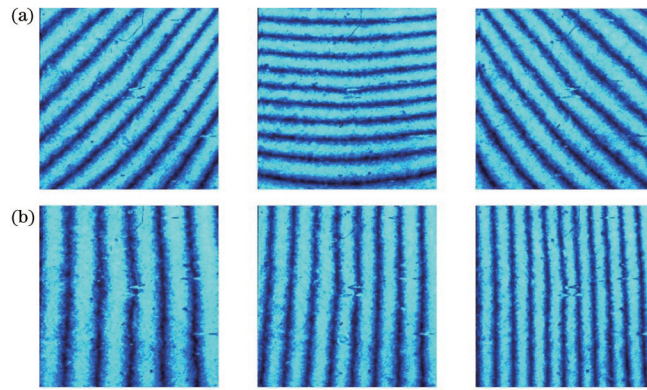


图 5 LC 光楔干涉条纹图。(a)不同 φ 下的 LC 光楔干涉条纹图;(b) φ 相同, θ 逐渐增加情况下的 LC 光楔干涉条纹图

Fig. 5 Interference fringes of LC optical wedge. (a) Interference fringes of LC optical wedge under different φ ; (b) interference fringes of LC optical wedge with same φ and gradually increasing θ

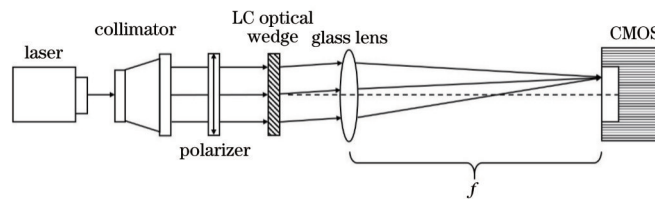


图 6 LC 光楔偏转性能测试装置图

Fig. 6 Test device diagram for deflection performance of LC optical wedge

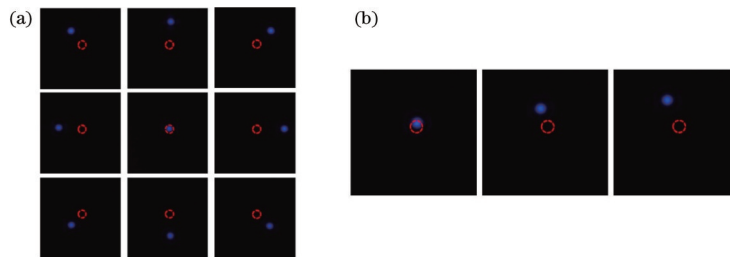


图 7 光束偏转实验(虚线圆圈代表光斑初始位置)。(a)不同的偏转方向角;(b) $\varphi = 120^\circ$, θ 逐渐增大

Fig. 7 Beam deflection experiment (dashed circle represents initial position of light spot). (a) Different deflection direction angles; (b) $\varphi = 120^\circ$ with gradually increasing θ

与偏转角度的任意控制并且具有低驱动电压、孔径任意的特点。

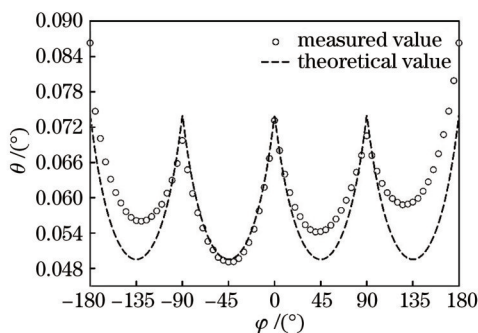


图 8 当 $v_{\max} = 2.5 \text{ V}$, $v_{\min} = 1.5 \text{ V}$ 时不同的偏转角度测量值与理论值对比

Fig. 8 Comparison between measured values and theoretical values of different deflection angles When $v_{\max} = 2.5 \text{ V}$ and $v_{\min} = 1.5 \text{ V}$

4 结 论

选用一种四电极结构的液晶器件实现了光楔的功能,并且可以对光楔的偏转角度和偏转方向角进行调节。所提液晶器件具有电压驱动方式较为简单、体积小和质量轻的优点,并且它形成的相位平面是连续的,相较液晶相控阵具有较高的开口率,有望被应用于光束指向领域中。

参 考 文 献

- [1] 丁贤澄, 匡定波. 双光楔两自由度光束导向的理论分析[J]. 红外与毫米波学报, 1992, 11(1): 53-58.
Ding X C, Kuang D B. Theoretic analysis of 2-D beam steering with dual-edge[J]. Journal Infrared Millimeter and Waves, 1992, 11(1): 53-58.
- [2] 吕溥, 韩国华. 双光楔在激光测距机光轴校正中的应用[J]. 激光技术, 2012, 36(2): 151-153, 159.

- Lü P, Han G H. Application of dual wedges in optical axis alignment for laser rangefinders[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(2): 151-153, 159.
- [3] 禹凯, 刘岩, 陈波, 等. 基于双光楔的像移补偿方法研究[J]. *光学仪器*, 2015, 37(3): 245-248.
Yu K, Liu Y, Chen B, et al. The study of image motion compensation method based on a double wedge[J]. *Optical Instruments*, 2015, 37(3): 245-248.
- [4] Lai S F, Lee C C. Double-wedge prism scanner for application in thermal imaging systems[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(22): 6290-6299.
- [5] 杨克君, 杨振, 张勇, 等. 基于旋转双光楔的像方扫描大视场成像光学系统设计[J]. *飞行与探测*, 2020, 3(6): 43-56.
Yang K J, Yang Z, Zhang Y, et al. Design of optical system for wide field-of-view imaging with image side scanning technology based on rotary dual-wedge[J]. *Flight Control & Detection*, 2020, 3(6): 43-56.
- [6] 李硕丰, 徐文东, 赵成强. 激光三维成像中双光楔扫描参数的确定及优化[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(8): 20190508.
Li S F, Xu W D, Zhao C Q. Determination and optimization of Risley prisms scanning parameters in laser 3D imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 20190508.
- [7] Laberdesque R, Jullien A, Bortolozzo U, et al. Tunable angular shearing interferometer based on wedged liquid crystal cells[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(31): 8656-8662.
- [8] 张健, 徐林, 吴丽莹, 等. 液晶光学相控阵可编程光束偏转研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(8): 1497-1502.
Zhang J, Xu L, Wu L Y, et al. Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(8): 1497-1502.
- [9] 闫宗群, 国涛, 吴健, 等. 基于液晶相控阵和体全息光栅的激光多目标指示技术[J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 0323001.
Yan Z Q, Guo T, Wu J, et al. Laser multi-target indication technique based on liquid crystal optical phased array and volume holographic grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0323001.
- [10] 王琦, 高旭峰, 张大伟, 等. 液晶光学相控阵技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(17): 1700007.
Wang Q, Gao X F, Zhang D W, et al. Research progress in liquid crystal optical phased array technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1700007.
- [11] Hands P J W, Tatarikova S A, Kirby A K, et al. Modal liquid crystal devices in optical tweezing: 3D control and oscillating potential wells[J]. *Optics Express*, 2006, 14(10): 4525-4537.
- [12] Ivanova N L, Isaev M V, Fedorov M A, et al. Two-coordinate electrically controlled liquid-crystal optical phase wedge[J]. *Journal of Optical Technology*, 2010, 77(6): 373-375.
- [13] Kotova S P, Mayorova A M, Samagin S A. Tunable 4-channel LC focusing device: summarized results and additional functional capabilities[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(5): 055602.
- [14] Zhang Y L, Li G Y, Chen X X, et al. Driving methods for liquid crystal lens with rectangular aperture and four voltages[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2021, 60(10): 102002.
- [15] 张亚磊. 大口径液晶透镜的特性及应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2021: 15-16.
Zhang Y L. Characteristics and applications of large-aperture liquid crystal lenses[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021: 15-16.