

液晶电光器件相位延迟的二维分布特征的测试

漆明春¹ 黄子强¹ 幺周石² 谭庆贵² 汪相如¹

(¹ 电子科技大学电子科学技术研究院, 四川 成都 610054)
(² 中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710000)

摘要 基于 1/4 波片法, 提出了相位延迟的二维分布测试方法。完成了液晶光楔及光寻址液晶空间光调制器 (SLM) 的二维相位分布测试, 得到了两种液晶电光器件的二维相位分布特性的测试结果。编写程序计算得到液晶光楔二维相位分布特性曲线, 结果表明: 随着测试电压的增大, 液晶光楔的顶角 θ 增大。同理, 编写程序计算作出 SLM 的二维相位等高线图并分析二维相位分布规律。

关键词 光学器件; 补偿法; 液晶可调波片; 相位二维分布

中图分类号 TM930.12+6; TM933.3+12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s108004

Measurement of Phase Delay of Two-Dimensional Distribution Characteristics of Liquid Crystal Electro-Optic Devices

Qi Mingchun¹ Huang Ziqiang¹ Yao Zhoushi² Tan Qinggui² Wang Xiangru¹

(¹ *Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China*
² *Xi'an Academy of Space Information System, Xi'an, Shaanxi 710000, China*)

Abstract Based on the Senamont method, a method of testing the two-dimensional (2D) distribution of phase delay is presented. The 2D distribution of phase delay of liquid crystal optical wedge and OA-LC-SLM is measured. The results we have measured is reported. The 2D phase distribution characteristic curve of the liquid crystal optical wedge is calculated by writting a program. The results show that the apex angle of the liquid crystal optical wedge adds when the testing voltage increasing. In the same way, the 2D phase contour map of the OA-LC-SLM is calculated. The 2D phase distribution of the OA-LC-SLM is analyzed.

Key words optical devices; compensation method; liquid crystal variable retarder; 2D distribution of phase delay

OCIS codes 120.5050; 160.3710; 230.2090; 230.3720; 230.6120

1 引言

液晶的电控双折射性质正在被逐步应用于各种液晶光电器件去完成光学系统中的光束控制、波前探测与校正。如液晶电控光开关、衰减器^[1-2]能够实现光强度的调制; 液晶光学相控阵列器件 (LC-OPA) 能够连续均匀可编程电控光束实现多衍射角度、多波束独立偏转、高效率、高精度的空间二维 (2D) 偏转扫描^[3-6]; 液晶空间光调制器 (LC-SLM) 常用于自适应光学技术。它是一种实时可控和高效的激光束整形方法^[7]。利用液晶空间光调制器可以

组成自适应光学视网膜高分辨率成像系统, 并获得了细胞量级清晰的眼底视网膜细胞图像^[8]。液晶空间光调制器也能够代替传统的变形镜作为波前校正器, 实现对大气湍流引入的光波畸变的低成本、高分辨、高精度的波前校正^[9]。总之, 液晶电控光电器件已是光学信息处理、自适应光学、自由空间光通信等方面的重要器件, 未来应用潜力巨大。

与电光晶体相比, 液晶电光器件的特点在于: 1) 驱动电压低, 所以与大规模集成电路可直接匹配; 2) 液晶材料在电场下双折射改变大, 所以其厚度很薄,

收稿日期: 2013-10-06; **收到修改稿日期**: 2013-11-04

作者简介: 漆明春 (1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事液晶器件方面的研究。E-mail: 793608741@qq.com

导师简介: 黄子强 (1956—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事液晶器件方面的研究。

E-mail: zqhuang@188.com (通信联系人)

一般在 $10\ \mu\text{m}$ 以下;3) 液晶电光器件的工作波长一般在微米级,要求液晶层带来的光程差的误差不能大于 $0.05\ \mu\text{m}$ 。由于后两条因素,考虑到液晶电光器件中液晶材料的光学各向异性 Δn 大致为 0.2 ,所以液晶层的厚度均匀性应该优于 $0.1\ \mu\text{m}$ 。正因为液晶电光器件的厚度很薄,也由于液晶材料本身为流体,液晶电光器件的厚度均匀性控制有较大难度,因而特别需要一种简单而准确的方法测定液晶电光器件的相位延迟分布特性,以便评估、校正相位延迟的不均匀分布所造成的误差对液晶电光器件的影响。

液晶器件的相位延迟测试的传统方法多基于正交偏光下干涉光强的变化,然而,光强的量化测量容易受到外界光的干扰和光源偏振度的影响,并且由于液晶电光器件上的缺陷所造成的光强度异常,使相位延迟的测量有较大的误差^[10-11]。因为同样的原因,液晶电光器件上相位延迟分布的测量难以采用未知非线性特性的摄像照相设备通过光强的量化

而准确测量。本文基于 $1/4$ 波片法,提出相位延迟的二维分布测试方法,给出了两种液晶电光器件二维相位分布特性的测试结果。

2 原理与测试方法

$1/4$ 波片法测试系统如图 1 所示^[12],选择 x 和 y 轴分别沿 $1/4$ 波片的快慢轴,并让试样液晶相位可变延迟器(LCVR)的快、慢轴, $1/4$ 波片(QWP)的快、慢轴分别与 x 轴成 $\pm 45^\circ$ 角。实际的装置由 WYL-4 应力双折射仪加上物镜(OBJ)和 CCD 相机改装组成,可实现 LCVR 的显微结构测量,用于光学相控阵的研究。其中光源采用带光阑的波长为 $590\ \text{nm}$ ND20(GP-20Na) 低压钠灯,电压源选用 SDG1025 型函数发生器/计数器,实现对液晶波片的驱动频率,电压的控制,光强接收器采用型号为 Dino-Lite 数码显微镜 AM411T 相机。

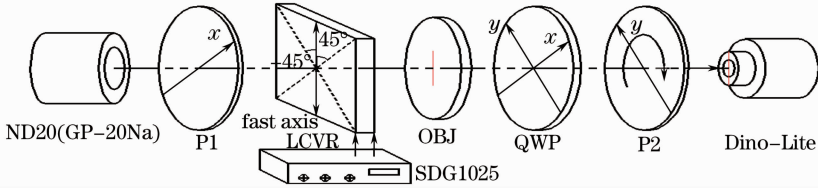


图 1 测定液晶电光器件相位的 $1/4$ 波片法的结构

Fig. 1 Framework of $\lambda/4$ plate method for the determination of liquid crystal electro-optic's phase

钠黄光经过起偏器 P1 后成为线偏振光,其琼斯矢量为

$$\mathbf{E}_{m_1} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

相位延迟量为 δ 的液晶电光器件的琼斯矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & -i \tan \frac{\delta}{2} \\ -i \tan \frac{\delta}{2} & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$1/4$ 波片的琼斯矩阵为

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}, \quad (3)$$

于是,从 $1/4$ 波片透出光的琼斯矢量为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -i \tan \frac{\delta}{2} \\ -i \tan \frac{\delta}{2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ \tan \frac{\delta}{2} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

(4)式归一化后得

$$\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \frac{\delta}{2}}} \begin{pmatrix} 1 \\ \tan \frac{\delta}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \frac{\delta}{2} \\ \sin \frac{\delta}{2} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

于是 $1/4$ 波片透出线偏振光,其光矢量与 x 轴的夹角 γ 等于位相延迟 δ 的一半:

$$\gamma = \frac{\delta}{2}, \quad (6)$$

把偏振片 P2 转到消光位置,转动角度为 γ ,则由上式可求出位相延迟 δ 。

若液晶电光器件较厚,则 $1/4$ 波片透出的线偏振光的光矢量与 $1/4$ 波片的快慢轴的夹角 γ 等于

$$\gamma = \frac{\delta}{2} - N \cdot 180^\circ, \quad (7)$$

即

$$\delta = 2\gamma + N \cdot 360^\circ, \quad N = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

$1/4$ 波片法无需量化透射光的强度,只需转动检偏器 P2 使 CCD 相机探测到的光达到极小即可。在二维测量的情况下,CCD 相机摄取到液晶电光器件因干涉而出现的暗条纹,该暗条纹代表了相等相位延迟量的点所连成的线,相位延迟量的值等于检

偏器 P2 相对于 y 轴所转过的角度 γ 的 2 倍。转动 P2 可以发现暗条纹在液晶电光器件表面连续移动，因而暗条纹所在新位置的相位延迟，亦等于检偏器 P2 与 y 轴新的夹角的 2 倍。

3 实验及结果分析

3.1 液晶光楔的电控相位分布结果

液晶光楔可用于激光束的微小角度偏转^[13]。它实现光束偏转的工作原理是液晶光楔中的液晶分子在电场作用下所产生的斜坡式相位调制。连续改变电场强度使液晶非常光折射率改变，等效于光楔的顶角连续改变。由于液晶光楔的结构是一个斜劈状的液晶盒，在光学性质上它可以等效为一个具有斜坡式折射率分布的棱镜。当施加的电压可编程变化时，液晶光楔产生的相位斜坡的斜率也会发生变化，从而可以控制入射光束通过液晶光楔后的偏转角度，实现光束的可编程高精度偏转和扫描。液晶光楔实现光束偏转的示意图如图 2 所示。

液晶光楔可使激光的受控偏转角度的精度达到 $1 \mu\text{rad}$ ，最大偏转量达到 $100 \mu\text{rad}$ 。然而，楔形结构

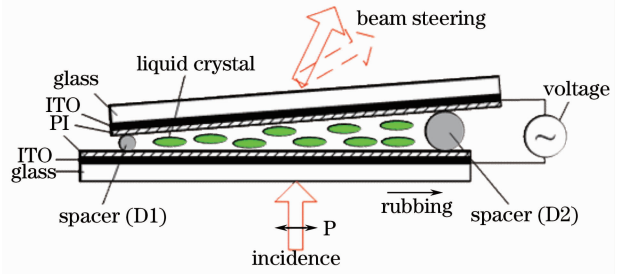


图 2 液晶光楔实现光束偏转示意图

Fig. 2 Schematic diagram of LCD optical wedge achieving optical beam deflection

在电场下能否保持平滑对束散角有很大的影响。液晶光楔的电控相位分布的测试过程为：给光楔加载 $0 \sim 20 \text{ V}$ 变化的电压，电压步进值为 0.5 V 。每一步进电压值确定以后再旋转检偏器。例如，给定电压为 5 V 时，旋转 WYL-4 应力双折射仪的刻度盘，以 20 nm 为步长， 0 nm 为起始位置改变，得到了 30 张不同相位下的光强分布图，即每一步进值记录到的消光黑条纹图像，换算成相位值得到结果如图 3 所示。从而记录了在一个波长范围 (590 nm) 的液晶光楔的相位延迟二维分布。

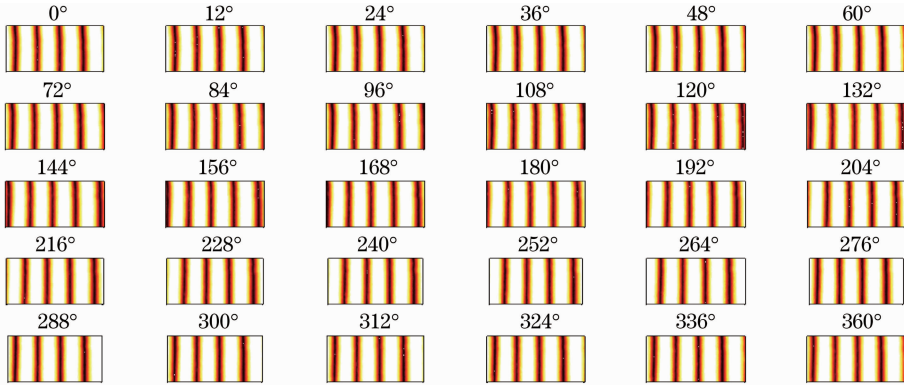


图 3 $V_{\text{set}} = 5 \text{ V}$ 时，一个波长范围内 30 次旋转 P2 在 CCD 上所获得的照片

Fig. 3 Part of the pictures on CCD obtained by rotating P2 with 30 times within a wavelength range when voltage is set 5 V

图 3 中每一幅图像中的黑条纹中亮度最低处的相位延迟等于 P2 旋过角度的 2 倍。将上述图像加载于 Matlab 程序，采用极小值搜寻，找出这些点的位置，结合 P2 旋过的角度，得到相位延迟特性二维分布如图 4 所示。通过拟合计算得到了不同电压下的光楔的顶角 θ 如表 1 所示。结合图 3 与图 4 分析得知，图 3 黑条纹成周期分布区域对应于图 4 所包括的曲线段，彼此间隔的条纹之间相差 2π 。对比数据可以得出，随着测试电压的增加，周期分布的条纹沿着同一个方向移动，而且光楔的顶角逐渐增大，相

位值差 2π 的条纹间距展宽，曲线趋于平缓。

表 1 不同电压下楔形液晶波片的顶角

Table 1 Apex angle of wedge liquid crystal wave plate with different voltages

$V_{\text{set}} / \text{V}$	Slope of fitting line k	$\theta / (^{\circ})$
5	314.5621	0.182
6	284.2141	0.201
7	251.9184	0.227
8	200.1076	0.286

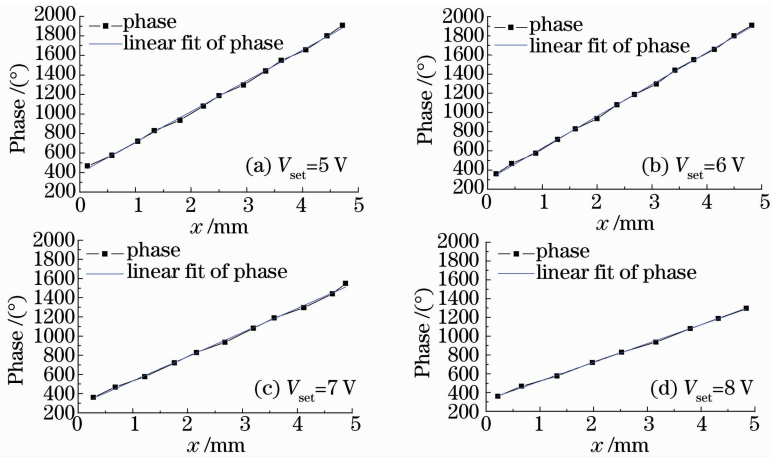


图 4 液晶光楔不同电压下的相位延迟二维分布

Fig. 4 2D phase distribution of the DLD with different voltages

3.2 光寻址液晶空间光调制器相位分布测试

由于光敏材料薄片厚度仅 0.1 mm, 所以制作过程中难以实现 SLM 的厚度均匀控制。然而, 只要其厚度均匀性控制在 $1/10$ 波长以内, 就能采用控制光补偿的方法实现 SLM 对波前的精确调控。为此, 测试了本实验室 SLM 初样在不同条件下的相位分布特性, 记录到的消光黑条纹图像如图 5 所示。

图 5 中每一幅图像中的黑条纹中亮度最低处的相位延迟等于 P2 旋过角度的 2 倍。将上述图像加载于 Matlab 程序, 完成利用灰度图像二值化, 条纹细化处理找出这些点并连点成线, 摘取 360° 范围内相应的相位值 ($80^\circ, 120^\circ, 160^\circ, 200^\circ, 240^\circ$) 作图, 结果如图 6 所示, 测试时随着 P2 旋转, 条纹向内吞吐,

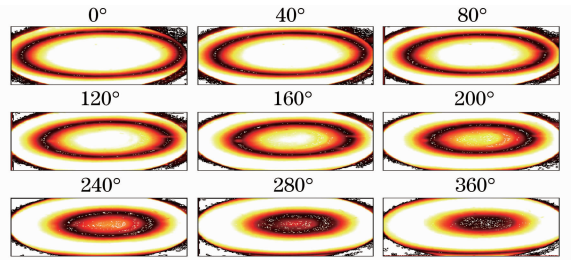


图 5 $V_{set} = 0$ V SLM 以 2π 周期旋转 P2 在 CCD 上所获得的部分照片

Fig. 5 Part of the pictures on CCD obtained by rotating P2 in a 2π cycle when voltage is set 0 V

即所得圆环的半径减小。测试多个波长范围, 条纹变化规律周期性再现; 而且, 随着测试电压增加, 条纹间距展宽。

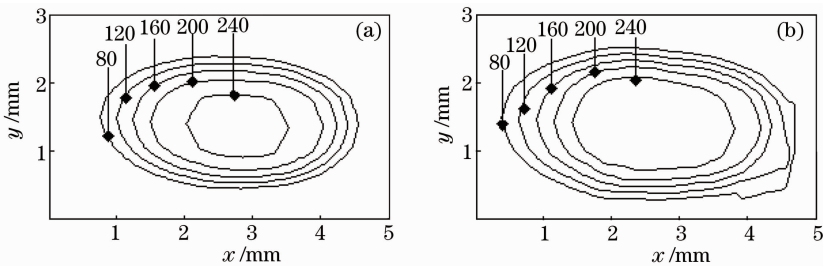


图 6 SLM 不同电压下的相位延迟二维分布图。(a) $V_{set} = 0$ V; (b) $V_{set} = 2$ V

Fig. 6 2D phase distribution of the SLM with different voltages. (a) $V_{set} = 0$ V; (b) $V_{set} = 2$ V

4 结 论

基于 $1/4$ 波片法完成了液晶光楔的二维电控相位分布及光寻址液晶空间光调制器相位分布测试。分析计算出液晶光楔的顶角; 叠加合成的黑条纹成周期分布, 且此周期对应于图 4 所包括的曲线段; 间隔的条纹间相位值相差 2π 的整数倍。对比数据我们得出, 随着测试电压的增加, 光楔的顶角 θ 逐渐增

大, 周期分布的条纹沿着同一个方向移动, 相位值差 2π 的条纹间距展宽, 相位分布曲线趋于平缓; 分析测试得到的 2π 周期 SLM 的二维相位分布, 并摘取相应的相位值作了二维相位等高线图, 得出相位值变化规律, 该方法记录了 360° 或超过 360° 多倍范围内 SLM 二维相分布特性。

参 考 文 献

- 1 Gu Lingjuan, Zheng Jihong, Chen Gang, *et al.*. The study of polymer-dispersed liquid crystal (PDLC) optical switching[J]. *Optical Instruments*, 2002, 24(3): 28-33.
顾玲娟, 郑继红, 陈刚, 等. 聚合物分散液晶(PDLC)光开关研究[J]. *光学仪器*, 2002, 24(3): 28-33.
- 2 Zhong Zhingcheng, Liu Caixia, Zhang Xindong, *et al.*. A novel variable optical attenuator based on PDLC[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(5): 1744-1746.
仲志成, 刘彩霞, 张歆东, 等. 基于PDLC的可变光衰减器的研制[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(5): 1744-1746.
- 3 Zhan Jian, Xu Lin, Wu Liying, *et al.*. Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(8): 1497-1502.
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.
- 4 Kong Lingjiang, Zhu Ying, Song Yan, *et al.*. A beam steering approach of liquid crystal phased array based on nonperiodic blazed grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0123001.
孔令讲, 朱颖, 宋艳, 等. 基于非周期闪耀光栅的液晶相控阵波控方法研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0123001.
- 5 Zhang Cai, Huang Yongmei, Qi Bo, *et al.*. Beam steering control based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(9): 0905005.
张彩, 黄永梅, 齐波, 等. 基于液晶空间光调制器的光束偏转控制[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0905005.
- 6 Wang Xiangru, Tan Qinggui, Huang Ziqiang, *et al.*. Dual beam formation and 2-D scan technique of liquid crystal optical phased array[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(5): 631-635.
汪相如, 谭庆贵, 黄子强, 等. 液晶光学相控阵的双光束成形和二维扫描技术[J]. *激光技术*, 2013, 37(5): 631-635.
- 7 Yu Xiaochen, Hu Jiasheng, Wang Lianbao. Laser beam shaping based on liquid-crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 32(5): 0514001.
于晓晨, 胡家升, 王连宝. 基于液晶空间光调制器的激光束整形[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0514001.
- 8 Cheng Shaoyuan, Hu Lifa, Cao Zhaoliang, *et al.*. Application of liquid crystal adaptive optics system on human eye fundus imaging with high spatial resolution[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(10): 2524-2527.
程少园, 胡立发, 曹召良, 等. 液晶自适应光学在人眼眼底高分辨率成像中的应用[J]. *中国激光*, 2009, 36(10): 2524-2527.
- 9 Cai Dongmei, Yao Jun, Jiang Wenhan. Performance of liquid-crystal spatial light modulator using for wave-front correction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 285-291.
蔡冬梅, 姚军, 姜文汉. 液晶空间光调制器用于波前校正的性能[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 285-291.
- 10 Bo Feng, Zhu Jianqiang, Kang Jun. Precise measurement and factors analysis for phase retardation of wave plate[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(6): 851-856.
薄锋, 朱健强, 康俊. 波片相位延迟的精确测量及影响因素分析[J]. *中国激光*, 2007, 34(6): 851-856.
- 11 Zhang Zhiyong, Deng Yuanyong, Wang Dongguang, *et al.*. Comparison and analysis of several methods for measuring wave plate retardation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(11): 1678-1685.
张志勇, 邓元勇, 王东光, 等. 几种波片位相延迟测量方法的比较[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11): 1678-1685.
- 12 Huang Ziqiang. Principle of Liquid Crystal Display[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006. 97-99.
黄子强. 液晶显示原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. 97-99.
- 13 Xu Lin, Huang Ziqiang, Yang Ruofu. A Wedge Liquid Crystal Device[P]. China: CN201110029932.5. [2011-5-25].
徐林, 黄子强, 杨若夫. 一种液晶光楔器[P]. 中国: CN201110029932.5. [2011-5-25].

栏目编辑:何卓铭