

液晶光学相控阵相位调制特性测量

王晓章 李琦 王骐

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 为了测试设计波长为 1550 nm 的液晶光学相控阵在 633 nm 波段的相位调制特性, 采用泰曼格林干涉法和偏振光干涉法相结合的方法来进行测量。实验结果表明, 液晶光学相控阵的相位延迟随灰度近似呈线性分布, 在 0~255 的灰度范围内针对 633 nm 激光的实际相位调制在 $0\sim 3.76\pi$ 之间, 在 135~255 的灰度范围内线性度良好, 可以作为液晶的工作区域。由于液晶相位控制的准确性和精度是通过加载相应的灰度来实现的, 因此测量相位延迟和灰度对应关系的研究对于液晶光学相控阵用于高精度光束偏转和跟踪有着重要价值。

关键词 测量; 液晶光学相控阵; 泰曼格林干涉; 偏振光干涉; 相位调制

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.s108010

Measurement of Phase Modulation Characteristics of Liquid Crystal Optical Phased Arrays

Wang Xiaozhang Li Qi Wang Qi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract In order to measure the phase modulation characteristics of the liquid crystal optical phased array with 633 nm, the whose design wavelength is 1550 nm, the Tymann Green interferometry combined with the polarized light interference methods are used. The experimental results show that the phase delay of the liquid crystal optical phased array is a linear distribution. In 0~255 gray-scale range for 633 nm, the actual phase modulation is $0\sim 3.76\pi$. The phase modulation characteristics have a good linearity in 135~255 gray-scale range. It can be used as the liquid crystal work area. Since the accuracy and precision of the liquid crystal phase control are depend the loading gray scale to achieve, so measuring the relation between the phase delay and gray has an important value in high precision light beam deflection and tracking for liquid crystal optical phased array.

Key words measurement; liquid crystal optical phased array; Tymann Green interference; polarized light interference; phase modulation

OCIS codes 120.5050; 070.6120; 260.3160; 060.5060

1 引言

光学相控阵相比于传统的光束偏转技术有结构简单、重量轻、稳定性好、指向精度高和电可控等优点。目前已存在多种光学相控阵, 而液晶光学相控阵具有宽双折射范围、宽响应波段、低驱动电压、制造工艺成熟、重量和损耗较低等优点, 最有潜在应用价值^[1]。液晶光相控阵器件通过改变加载在液晶盒

上的电压来改变液晶分子指向, 从而改变双折射率, 实现对入射光束的相位调制。在不同电压作用下, 液晶会产生不同的相位延迟, 相位延迟与加载电压的对应关系, 就是液晶光相控阵的相位调制特性。对相位调制特性的测量, 就是要得到加载电压与相位延迟量变化曲线。这一曲线的准确测量对于实现高精度光束偏转有着重要意义。随着不同应用领域

收稿日期: 2011-12-28; **收到修改稿日期:** 2012-02-18

作者简介: 王晓章(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事液晶光学相控阵方面的研究。

E-mail: xiaozhang_wang@yahoo.com.cn

导师简介: 李琦(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事激光雷达和太赫兹成像等方面的研究。

E-mail: hit_liqi@yahoo.cn

对器件的性能和精度要求的提高,对液晶相控阵自身特性的测试和评价也成为重要研究课题^[2]。

实验中测试的器件为液晶空间光调制器。为了提高响应速度,液晶盒一般设计为反射式,液晶层厚几个微米,并且针对特定波长 1550 nm 的调制范围为 $0 \sim 2\pi$ 。由于液晶折射率的变化是一个与波长相关的函数。如果改变入射光波长,则在长波长方向的相位调制范围会小于 2π ,短波长方向的相位调制范围会大于 2π 。初步实验采用 633 nm 激光,没有现成的用户查找表可供参考,因此对于该波长下的相位调制特性测量尤为重要。目前人们已采用多种方法对液晶光相控阵的相位调制特性进行测量,其中有泰曼格林干涉法^[3]、径向剪切干涉法^[4,5]和双缝干涉法^[6]等。由于后两种方法比较适合于透射式器件的测量,而单独采用泰曼格林干涉法对实验环境的要求比较高,一般采用此方法对器件设计波长处的用户查找表进行验证和修正^[7]。泰曼格林法测量干涉条纹的相对位移受环境的干扰很大,不利于得到准确的结果。而偏振光干涉受环境影响较小,可以得到较为准确的结果,但是直接测量的是光强变化,无法判断相位延迟的变化方向,因此在没有查找

表可供参考的情况下,本文结合两种方法对液晶空间调制器相位延迟特性进行分析,先用泰曼格林干涉法测量干涉条纹的移动方向,用以判断相位延迟的变化方向,然后用偏振光干涉法来精确测量不同加载灰度下的相位延迟。

2 相位调制特性

液晶光学相控阵多采用向列相液晶,改变电压可改变其双折射,会对入射光产生一定的相位延迟。但由于液晶光相控阵只对一定偏振方向的线偏振光有调制,所以在其前后应加上起偏器和检偏器。液晶的双折射控制,主要是控制液晶分子指向矢倾角在外加电场的倾斜,其关系可以近似描述为^[8]

$$\theta = \frac{\pi}{2} - 2\arctan[\exp(-v)], \quad (1)$$

根据双折射晶体理论,等效折射率可表示为

$$n_e(\theta) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}}. \quad (2)$$

液晶光学相控阵的相位调制特性可由琼斯矩阵表示^[9]为

$$\mathbf{E}_{out} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_2 & \sin \varphi_2 \\ -\sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 & -\cos \varphi_1 \end{bmatrix} \mathbf{E}_{in}, \quad (3)$$

式中第 2,4 项为偏振旋转项,第 3 项为液晶双折射率项,其中 φ_1 和 φ_2 表示起偏器和检偏器的偏振方向分别与液晶光轴的夹角; β 为双折射系数。根据(3)式可以得出不同的偏振角入射情况下的液晶光学相控阵所产生的相位延迟量^[10]:

$$\delta = \beta + \arctan \left\{ \frac{\sin \beta [\cos(\varphi_2 + \varphi_1) + \cos(\varphi_2 - \varphi_1)]}{\cos(\varphi_2 + \varphi_1) - \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + \cos \beta [\cos(\varphi_2 + \varphi_1) + \cos(\varphi_2 - \varphi_1)]} \right\}, \quad (4)$$

强度透射率为

$$T = \frac{1}{4} \{ \cos(\varphi_2 + \varphi_1) - \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + \cos \beta [\cos(\varphi_2 + \varphi_1) + \cos(\varphi_2 - \varphi_1)] \}^2 \times \frac{1}{4} \sin^2 \beta [\cos(\varphi_2 + \varphi_1) + \cos(\varphi_2 - \varphi_1)]^2, \quad (5)$$

由(5)式可以看出,液晶光学相控阵的调制模式取决于起偏器和检偏器与液晶光轴的夹角。如果起偏器与检偏器的偏振方向均平行于液晶光轴,即 $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$,则此时处于纯相位调制状态,强度透射率和相位延迟分别为^[11]

$$T = 1, \quad \delta = 2\pi d [n_e(\theta) - n_o] / \lambda. \quad (6)$$

如果起偏器的偏振方向与液晶光轴夹角为 45° ,检偏器与起偏器的偏振方向平行或垂直,此时液晶光学相控阵处于强度与相位共同调制状态,并

且强度调制最大。这时的强度透射率分别为^[12]

$$T_{//} = I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2}, \quad T_{\perp} = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2}. \quad (7)$$

因此,只要当偏振方向确定,测量透射率光强即可得到相位延迟。

3 测量原理

液晶光学相控阵的每一个像素都可以通过独立寻址控制,美国 BNS 公司将器件的驱动电压映射为计算机显示的灰度值,可以由计算机将灰度变化的

8 bit 位图加载到驱动器中,位图的灰度值与加载到液晶相控单元的驱动电压相对应,因此研究相位调制特性就是寻找相移与加载灰度之间的对应关系。实验采用泰曼格林干涉和偏振光干涉相结合的办法来对相位调制特性进行测量。

3.1 泰曼格林干涉测量条纹移动

泰曼格林干涉实验原理如图 1 所示。测试器件为美国 BNS 公司生产的型号为 HSP512-1550-PCIe 的液晶空间光调制器,电荷耦合器件(CCD)采用的是 Ophir-Spiricon 公司的光束质量分析仪。He-Ne 激光器的输出波长为 633 nm 的激光,经扩束镜后由起偏器变成线偏振光,然后被分光镜分成两路,一路作参考光经参考反射镜反射至 CCD,另一路经液晶空间光调制器(LC-SLM)反射,在通过检偏器,两路光发生干涉,用置于焦平面的 CCD 采集干涉条纹,实验装置如图 2 所示。

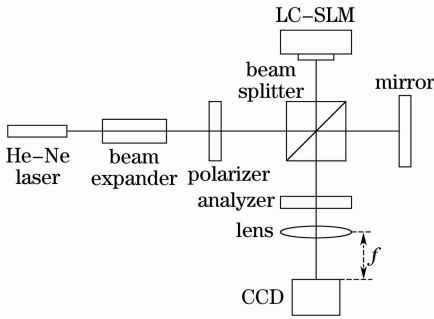


图 1 测量干涉条纹移动实验原理图

Fig.1 Experimental principle diagram for the interference fringes measurement

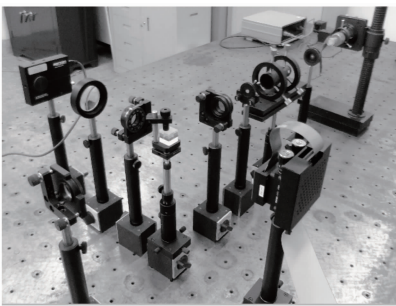


图 2 泰曼格林干涉测量装置图

Fig.2 Setup diagram measuring devices for Twyman-Green interferometer

根据条纹移动法的原理,如果给驱动器输入相同的灰度图,那么根据泰曼格林干涉原理会在远场得到均匀的竖条纹,加载不同的灰度图得到的一组干涉条纹相比较会发现条纹有移动^[13]。但是这种绝对移动量受环境影响过大,不便于直接获取数据。因此在实验中引入相对静止的参考条纹,如图 3 所

示,上半部灰度值始终为 0,下半部灰度值在 0~255 范围内递增。由于上下灰度值的差异,导致加载在 LC-SLM 上下工作面上的电压不同,因此会产生不同的相位延迟,使输出干涉条纹产生相对移动,通过 CCD 测量干涉条纹,理论上可得到类似于右图的干涉条纹^[14]。

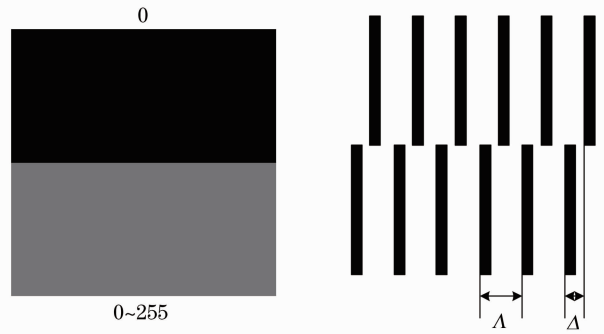


图 3 加载灰度图和理想条纹图样

Fig.3 Loading grayscale image and ideal fringes image

为了精确地获得干涉条纹的相对移动量,选择亮条纹的单像素中心线为测量基准。通过对 CCD 采集到的干涉条纹近似的图像形态进行处理。从原图中截取计算部分,选择合适的阈值进行二值化处理,然后通过开运算、骨骼化等手段,获得单像素宽度条纹。通过对单像素宽度干涉条纹坐标计算,可以得到条纹的周期宽度 Λ 和干涉条纹的相对移动量 Δ 。最后由不同灰度下相位延迟大小与条纹相对位移量的关系计算出相位延迟大小^[15]:

$$\delta = 2\pi(\Delta/\Lambda). \quad (8)$$

3.2 偏振光干涉测量干涉光强

偏振光干涉法测量实验装置类似于条纹移动法,如图 4 所示。区别在于不需要参考镜,对于干涉光强的测量采用的是上海微系统所制作的短波红外 InGaAs 探测器。对要求调节起偏器使入射光的偏振方向与液晶光轴方向夹角为 45°,检偏器与起偏

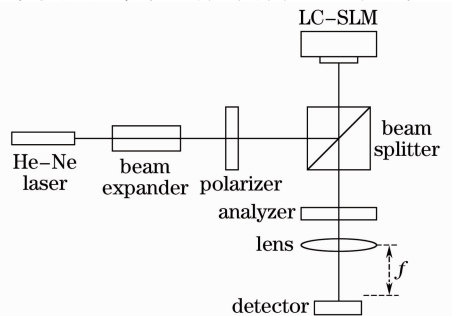


图 4 测量偏振光干涉光强实验装置图

Fig.4 Experimental principle diagram for the light intensity of polarized light interference measurement

器的偏振方向垂直或者平行。被液晶光学相控阵反射回来的 o 光和 e 光两个偏振分量,二者偏振方向相互垂直,经检偏器时,o 光和 e 光的出射分量发生偏振干涉。此时液晶光相控阵处于强度与相位共同调制状态,并且强度调制最大。

将等灰度值的 8 bit 位图输入到驱动器,使液晶整个工作面处于同一电压下,测量各个像素反射的激光即可获得相同的相位延迟。在透镜焦平面用探测器接收干涉光强,用示波器读出直流数据。

在 0~255 范围内从小到大依次改变灰度值,可获得强度随灰度值的变化。起偏器与检偏器平行和垂直时不同灰度条件下的相位延迟分别为^[16]

$$\delta_{//}(x,y) = \pm \arccos \left[\frac{2I(x,y) - I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right], \quad (9)$$

$$\delta_{\perp}(x,y) = \pm \arcsin \left[\frac{2I(x,y) - I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right]. \quad (10)$$

由于此结果是在正余弦周期内的值,即在 0~2π 范围,而波长为 633 nm 的激光被设计波段在 1550 nm 的液晶光学相控阵调制范围大于 2π,因此最终结果

需要相位展开。

4 实验结果

在实验中,将输入驱动器的灰度图上半部分灰度始终设置为 0,下半部分设置在 0~255 依次递增。图 5(a)为 CCD 相机采集到的干涉条纹截取图,上半部分为参考条纹,下半部分为移动条纹,可以看出上下条纹有移动,只是由于液晶的黏性和加载电场的边缘效应,分界线处没有明显区分,是连续的。为了能准确测量干涉条纹的移动量,选择亮条纹的中心线作为测量基准,这就需要对 CCD 采集到的干涉条纹进行处理。图 5(b)~(e)分别为中值滤波、二值化、腐蚀骨骼化和膨胀后二次骨骼化的结果,骨骼化的结果是得到单像素线用以计算条纹间距和平均条纹移动量。由于上下部分分界处的分断不明显,因此在计算中将其直接剔除,图 5(f)为剔除后的结果,上半部分为固定的参考条纹,下半部分为相对移动条纹,由此可计算出干涉条纹的平均间距和相对移动量,进而获得相位延迟。

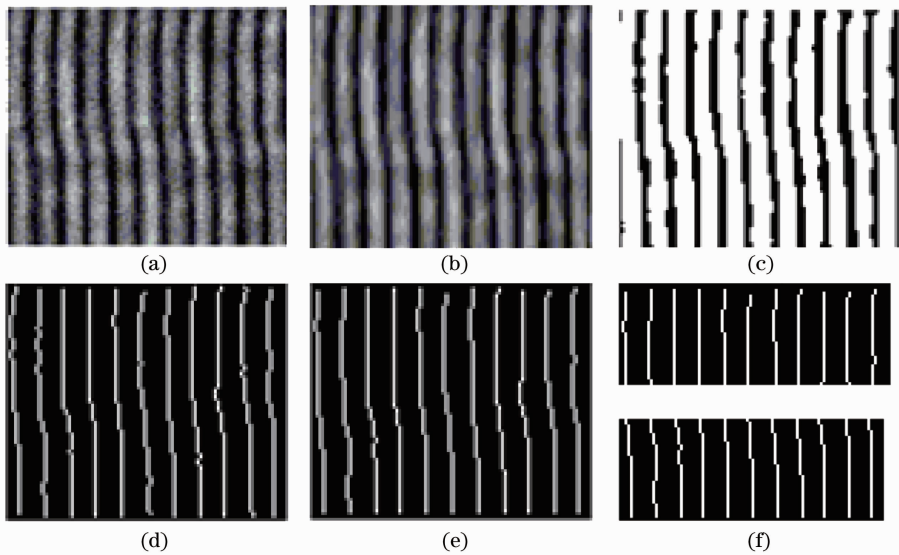


图 5 CCD 采集的干涉条纹及条纹细化结果

Fig. 5 Interference fringes collected from CCD and the results of fringes thinning

从采集到的干涉条纹图可以看出,当灰度从 0~255 增加的过程中,下半部分的干涉条纹一直向右移动。对干涉条纹进行预处理,计算每一组干涉条纹的相对移动量,结合条纹周期,求取平均值后再代入(8)式,可计算出每一组的相位延迟量,从而可得到图 6 所示的相位延迟与灰度的关系。由曲线趋势可以看出随着灰度级的增加,相位延迟逐步递增,这

一结果可以为偏振光干涉测量起到标定方向的作用。但由于受环境以及液晶均匀性的影响,最终结果的线性度较差。因此需要采用偏振光干涉法来进行进一步的测量。

利用偏振光干涉法测量时,起偏器和检偏器有相互平行和垂直两种情况,当相互垂直时两个偏振分量方向相反,导致出射光的光强出现衰减,探测器

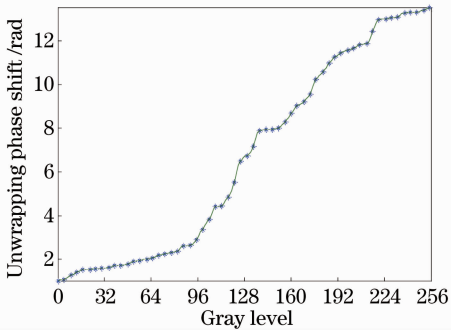


图 6 相位延迟与加载灰度图的关系

Fig. 6 Relation curve between the phase delay and the loading gray

测到的光强比相互平行时弱,因此在本实验中起偏器和检偏器相互平行,并且与液晶光轴成 45° 。测得的归一化光强曲线如图 7 所示。图 8 为光强的直接测量均方根误差(RMS),可以看出直接误差较小,最大仅为 10^{-14} 且正负对称,可认为系统误差无变化。

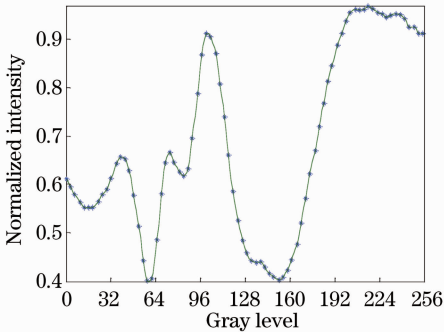


图 7 归一化光强与加载灰度的对应关系

Fig. 7 Relation between the normalized intensity and the loading gray

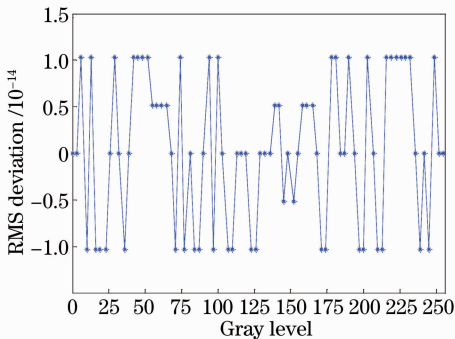


图 8 直接测量的 RMS

Fig. 8 RMS of direct measurement

根据直接测量的归一化光强,根据(9)式计算得到的相位延迟与加载灰度之间的关系如图 9 所示。由于相位延迟不是直接通过测量得到,而是通过函数关系间接所得,所以在此过程中存在函数传递误

差。图 10 为不同灰度时的函数传递误差分布。

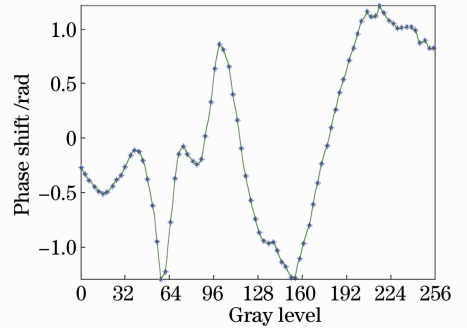


图 9 相位延迟与加载灰度的关系

Fig. 9 Relation between the phase delay and the loading gray

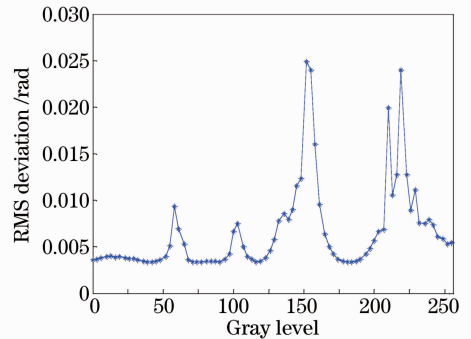


图 10 函数传递误差分布

Fig. 10 Distribution of the function transmission RMS

由图 6 所示的条纹移动法测量结果,可以知道相位延迟随着灰度的增加而单调递增。基于这一判断,对图 9 的折叠相位进行展开,可以得到如图 10 所示的相位调制曲线。从图 9 中可以看到,相位调制范围在 $-0.27 \sim 11.80$ rad 之间。由于液晶相控阵高精度控制要求在改变命令时,应尽量减少误差和提高响应速度,所以人们通常在相位调制特性曲线中选取线性度较好的部分作为工作区。在图 11 中 135~255 之间的相位延迟呈线性分布,因此这一区域为该液晶相控阵的工作区的最佳选择。图 12

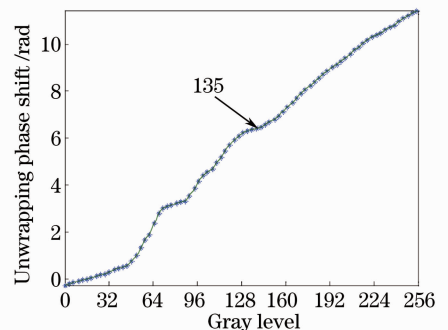


图 11 相位调制特性曲线

Fig. 11 Characteristics curve of phase modulation

是选取的工作区域的相位调制曲线以及误差分析结果,误差范围为 0.08~0.32 rad。由于是偏振干涉光强较弱,光源工作电压的稳定性对最终数据有着较大影响。

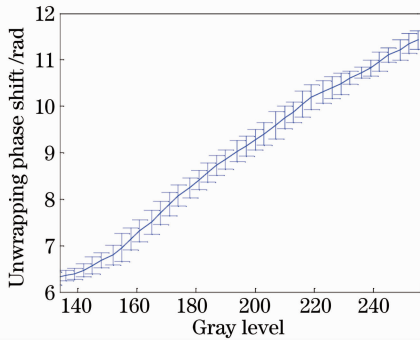


图 12 理想工作区相位调制曲线及误差

Fig. 12 Phase modulation curve in ideal workplace

5 结 论

采用泰曼格林干涉结合偏振光干涉法测量了液晶光学相控阵的相位调制特性,得到了相位延迟与加载灰度之间的查找曲线,该器件在波长 633 nm 的实际相位调制范围为 0~3.76 π ,在 135~255 的灰度之间,相位延迟与灰度的对应关系呈线性分布,可以在其中选取 2 π 的范围作为液晶相控阵的工作区。

参 考 文 献

- 1 P. F. McManamon, P. J. Bos, M. J. Escuti *et al.*. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems[C]. Proc. IEEE, 2009, **97**(6): 1078~1096
- 2 X. Xun, R. W. Cohn. Phase calibration of spatially nonuniform spatial light modulator [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43** (35): 6400~6406
- 3 Zhang Hongxin, Zhang Jian, Wu Liying. Phase modulation of liquid crystal spatial light modulator measured by a Twyman-Green interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35** (9): 1360~1363
张洪鑫, 张 健, 吴丽莹. 泰曼-格林干涉仪测量液晶空间光调制器的相位调制特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1360~1363
- 4 Zhao Xiaofeng, Li Dahai, Chen Zhenpei. Measuring phase modulation characteristics of liquid crystal spatial light modulators by using cyclic radial shearing interference [J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2002, **39** (4): 675~679

- 赵晓风, 李大海, 陈祯培. 利用径向剪切干涉法测量液晶空间光调制器的位相调制特性[J]. *四川大学学报*, 2002, **39** (4): 675~679
- 5 Li Dahai, Chen Huaixin, Chen Zhenpei. Utilizing LCTV's phase modulation characteristics to compensate distorted wavefront[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7): 614~618
李大海, 陈怀新, 陈祯培. 利用液晶电视的相位调制特性补偿畸变波前[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7): 614~618
- 6 Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei *et al.*. Optical modulation characteristics of liquid crystal television and its application in optics information processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **27**(8): 741~745
陈怀新, 隋 展, 陈祯培 等. 利用液晶电视的光学调制器特性及其应用[J]. *中国激光*, 2000, **27**(8): 741~745
- 7 R. Dou, M. K. Giles. Phase measurement and compensation of a wave front using a teisted nematic liquid crystal telexision[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(19): 3647~3651
- 8 C. Soutar, K. H. Lu. Determination of the physical properties of an arbitrary twisted-nematic liquid crystal cell [J]. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(8): 2704~2712
- 9 J. C. Doo, T. T. Samuel, J. T. Donner *et al.*. Characteristics of a 128 \times 128 liquid crystal spatial light modulator for wave-front generation[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(12): 969~971
- 10 H. Zhang, J. Zhang, L. Wu. Evaluation of phase-only liquid crystal spatial light modulator for phase modulation performance using a Twyman-Green interferometer[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2007, **18**(6): 1724~1728
- 11 M. Bashkansky, D. Park, F. K. Fatemi. Azimuthally and radially polarized light with a nematic SLM[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(1): 212~217
- 12 A. D. Jeffrey, T. Philbert, M. C. Don *et al.*. Transmission variations in liquid crystal spatial light modulators caused by interference and diffraction effects [J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(6): 1051~1057
- 13 Shi Shunxiang, Zhang Haixing, Liu Jinsong. Physical optics and applied optics[M]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology Press, 2000
石顺祥, 张海兴, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 电子科技大学出版社, 2000
- 14 Ge Aiming, Sui Zhan, Xu Ke. Characteristics of phase-only modulation using a reflective liquid crystal on silicon device[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(10): 2481~2485
葛爱明, 隋 展, 徐 克. 反射型 LCOS 器件纯相位调制特性的研究[J]. *物理学报*, 2003, **52**(10): 2481~2485
- 15 J. A. Davis, P. Tsai. Simple technique for determining the extraordinary axis direction for twisted-nematic liquid crystal spatial light modulators [J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38** (6): 929~932
- 16 H. Zhang, J. Zhang, L. Wu *et al.*. Measurement of phase modulator characteristics of liquid crystal spatial light modulator [C]. *SPIE*, 2006, **6150**: 61503W

栏目编辑: 胡 冰