

采用共光路干涉法测量液晶空间光调制器的 相位调制特性

苗悦 白福忠 刘珍 田朝平 梅秀庄

内蒙古工业大学机械学院, 内蒙古 呼和浩特 010051

摘要 提出一种基于液晶偏振分光的共光路干涉测量方法来测量液晶空间光调制器(LCSLM)的相位调制特性。线偏振入射光束被LCSLM分为两束正交线偏振光,然后沿相同方向传播至渥拉斯顿棱镜(WP);经WP出射的两光束产生横向剪切,同时,WP也将会在两光束之间引入倾斜调制,从而当它们再经过检偏器后产生载频干涉条纹。用傅里叶变换法计算两帧干涉条纹之间的相对相移量。给出了透射式LCSLM相位调制特性的实验测量结果。该方法对振动、空气扰动不敏感,能够测量得到LCSLM的整体相位调制特性,结果更加精确、科学。

关键词 测量;液晶空间光调制器(LCSLM);相位调制特性;共光路干涉仪;傅里叶变换法

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.021204

A Common-Path Interferometry Applied to Measure Phase Modulation Characteristics of Liquid Crystal Spatial Light Modulator

Miao Yue Bai Fuzhong Liu Zhen Tian Chaoping Mei Xiuzhuang

School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot, Inner Mongolia 010051, China

Abstract A common-path interferometry is proposed to measure the phase of liquid crystal spatial light modulator (LCSLM), which is based on the principle of liquid-crystal polarization splitted light. The linearly polarized input beam is divided into two orthogonal polarized beams by LCSLM, and then propagates to the Wollaston prism (WP) along the same direction. Two beams transmitted from the WP generate lateral shearing and a tilt modulation is introduced into the two beams, and hence a carrier-frequency interferogram is obtained after passing analyzer polarizer. The relative phase-shift between two frames of fringes is calculated accurately by using the Fourier-transform algorithm. A phase modulation experiment to the transmissive LCSLM is given. The proposed method is less sensitive to vibrations and air turbulence. Furthermore, it can measure the whole phase modulation characteristics of LCSLM, and the measuring result is more precise and scientific.

Key words measurement; liquid crystal spatial light modulator (LCSLM); phase modulation characteristics; common-path interferometry; Fourier-transform method

OCIS codes 230.3720; 070.6120; 120.3180; 060.5060

1 引言

液晶空间光调制器(LCSLM)是一种可编程的新型光学元件,是现代光信息处理的关键器件,具有质量小、功耗低、响应速度快、空间分辨高、可实时控制的优点,越来越受到国内外学者的普遍重视^[1-2]。由于不同器件具有不同的调制特性,在它们被使用前一般都需要对其振幅和相位调制特性进行测量。对于振幅调制特性,可以通过测量LCSLM的光强调制特性得到。而目前,对LCSLM相位调制特性的测量方法主要是双缝干涉法^[3-5]、马赫-曾德尔干涉法^[6-9],以及泰曼-格林干涉法^[10-12]。双缝法是通过测量空间光调制器(SLM)上局部位置的相位调制特性来作为整体相位调制特性,忽略了器件局部差异可能带来的影响,而后两者均属于分振幅双光路干涉,对实验装置的稳定性要求很高,因此有一定的局限性。任秀云等^[13]提出了应用共路横

收稿日期: 2015-05-29; 收到修改稿日期: 2015-07-01; 网络出版日期: 2015-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(61108038)、教育部“春晖计划”(Z2011069)、内蒙古自治区自然科学基金(2015MS0616)

作者简介: 苗悦(1989—),女,硕士研究生,主要从事液晶相关特性测试方面的研究。E-mail: miao.d@qq.com

导师简介: 白福忠(1979—),男,博士,教授,主要从事光学测试等方面的研究。E-mail: fzbaim@163.com(通信联系人)

向剪切干涉法测量 LCSLM 的相位调制特性,该方法使零级和正一级衍射像横向剪切产生干涉,但由于零级像和正一级像光强度不同导致干涉条纹的对比度受到限制。李大海等^[14-15]采用环路径向剪切干涉法测 LCSLM 的相位调制特性,并利用迭代算法求解环向剪切条纹图;该方法存在的问题是台阶波前条纹图解释算法复杂,复原结果误差较大。随着数字波面相移技术的兴起,以及数字波面移相干涉仪的商品化,用其测试 LCSLM 的相位调制特性也是一种有效的方法,而且测量结果精度高,峰谷值误差可达 $\lambda/50$ ^[16-17],但其昂贵的费用限制了该方法的普遍应用。

本文提出了采用 LCSLM 分光的共光路横向剪切干涉法对大恒公司 GCI-770102 型的透射式 LCSLM 的相位调制特性进行测量的新方法,由于该干涉装置共光路,具有对环境振动及空气扰动不敏感的优势,容易实现整体相位特性的准确测量,测量装置简单且易于建立和调试,是一种较好的测量方法。

2 方法原理

2.1 LCSLM 相位调制

LCSLM 的相位调制是基于液晶电控双折射效应:当对液晶施加外部电场时,由于液晶介电常数和电导率的各向异性,使得非寻常光的折射率发生改变,而寻常光的折射率未发生改变。液晶的双折射效应导致通过液晶的偏振分量产生相位差,其相位差可简单表示为^[18]

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| d, \quad (1)$$

式中 d 代表液晶的厚度, n_o 和 n_e 分别表示寻常光(o光)和非寻常光(e光)的折射率, λ 表示入射光的波长。通过控制施加到每个液晶像素上的电压来改变其非寻常光的折射率,从而实现入射光空间相位调制的目的。

2.2 共光路干涉测量原理

测量 LCSLM 相位调制特性的共光路干涉系统如图 1 所示。光学结构主要包括三部分:液晶偏振分束,渥拉斯顿棱镜(WP)横向剪切并引入倾斜调制,记录载频干涉图。

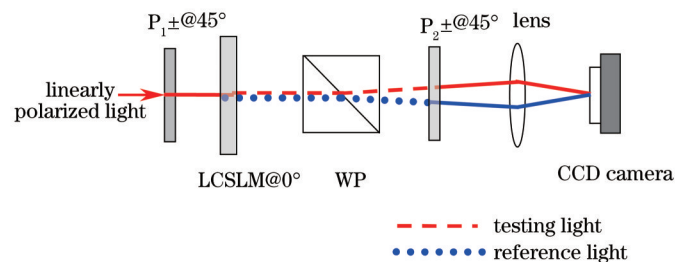


图1 共光路干涉测量系统

Fig.1 Common-path interferometer measuring system

2.2.1 液晶偏振分光

根据液晶双折射原理,要求入射光的振动方向与液晶的长轴方向相互平行,如果入射光的振动方向与液晶的长轴方向相互垂直时,LCSLM 将不会产生相位调制^[19]。根据文献[20]所提的液晶偏振分束原理,一束线偏振光(振动方向与液晶长轴方向的夹角为 $\pm 45^\circ$)垂直入射在 LCSLM 将被分为两束正交偏振光,并且两束光具有相等的能量。垂直于液晶长轴方向的光束不被影响而形成参考光(图 1 中点画线表示);而平行于液晶长轴方向的偏振分量将随着 LCSLM 驱动电压的变化而产生相移,从而形成测试光(图 1 中短划线表示)。

2.2.2 光学结构描述

入射线偏振光经过一个与 LCSLM 液晶长轴方向为 $\pm 45^\circ$ 的起偏器,垂直入射到 LCSLM 后被分为两束能量相等、正交偏振的线偏振光。这时,如果这两束光直接通过一个检偏器也可以产生干涉。但是,这种情况下得到的干涉图很难解算出对应的相移量。

为了能够便于应用傅里叶变换法计算各帧干涉条纹之间的相移量,需要在参考光与测试光之间引入载波,即倾斜调制,同时还不能破坏共光路的特性,在图 1 光路中这里使用 WP 来达到这一目的。

由 LCSLM 透射的正交偏振光通过 WP 后,分别将偏离光轴一个很小的角度向前传播;由于这一夹角 θ 的存在,相当于在两束光之间引入了载频调制。两束光再经过检偏器 P_2 后取得相同的偏振分量从而产生横向剪切干涉(只有两束光相互重叠的光瞳区域可以干涉)。

图1所示的光学结构,所需光学元件极少,简单紧凑,形成了严格的共光路结构,因而对振动、温度扰动不敏感,干涉条纹稳定,对测量环境要求低。

2.3 琼斯矩阵分析

入射线偏振光的琼斯矢量表示为 $[\cos \theta \quad \pm \sin \theta]^T$,它经过起偏器 P_1 (振动方向与 x 轴方向成 $\pm 45^\circ$) 的琼斯矢量表示为 $\frac{\sqrt{2}}{2} [1 \quad \pm 1]^T$ 。

LCSLM 作为偏振分光元件,经过它出射的参考光,其振动方向垂直于液晶长轴方向,参考光的琼斯矩阵表示为

$$\mathbf{E}_r = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

测试光的振动方向平行于液晶长轴方向,其琼斯矩阵表示为

$$\mathbf{E}_m = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ \pm \exp(j\delta) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

通过 LCSLM 的测试光和参考光为正交偏振光,沿着相同的光路平行传播。经过 WP 后将会分开一个微小角度 θ ,即改变光的传播方向,而未改变光的偏振状态,因此通过 WP 的参考光与测试光琼斯矩阵与(2)式和(3)式的形式一样。

振动方向与 x 轴成 $\pm 45^\circ$ 的检偏器 P_2 的琼斯矩阵表示为 $\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \pm 1 \\ \pm 1 & 1 \end{bmatrix}$;于是通过 P_2 后的参考光与测试光的琼斯矩阵分别表示为

$$\mathbf{E}'_r = \frac{\sqrt{2}}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ \pm 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{E}'_m = \frac{\sqrt{2} \exp(j\delta)}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由(4)式和(5)式可知,两束光含有不同的相位、相等光强;因此,干涉条纹对比度最高,便于高精度计算;同时,也可以通过分析干涉条纹计算两束光之间的相位调制量。

3 相位特性测量实验与讨论

这里针对大恒公司 GCI-770102 型的透射式 LCSLM 进行相位调制特性测试。根据图1建立实验光路,入射光为 633 nm 的准直平面波;首先判断 LCSLM 液晶分子的长轴方向,并设为 0° ;然后调整偏振片 P_1 和 P_2 的振动方向分别与液晶分子长轴方向成 $\pm 45^\circ$ 。为 LCSLM 加载一帧灰度控制信号,调整其他光学元件产生最佳干涉条纹,并输入至计算机。

为 LCSLM 加载一系列 0~255 逐渐变化的灰度控制信号,CCD 探测器记录每一次驱动信号变化后的干涉条纹。图2为加载到液晶的灰度控制图与 CCD 探测器记录到的相应干涉条纹图。图2(a)与(c)所示图像的灰度值为均匀分布,由于使用共光路干涉实验系统,所以灰度图像不需要按照两部分分别加载,严格意义上来讲,所提方法完全克服了传统方法的局限性,通过所加载的灰度图可以测量得到 LCSLM 的整体相位调制特性,因而计算结果更加精确、科学。然而,对于传统方法,一般的做法是,上部分灰度值不变,下部分灰度值在 0~255 变化;这种干涉条纹的计算结果实际上是下部分液晶像元相对于上部分的相移,因而测量得到的相移特性具有测量不均匀性和测量结果局部性的缺陷。

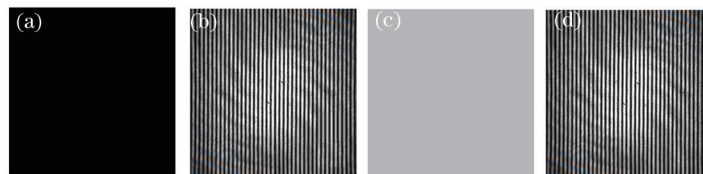


图2 加载到液晶的灰度控制图[(a)、(c)];记录到的干涉条纹图[(b)、(d)]

Fig.2 Gray scale images [(a) and (c)] and corresponding interference fringes [(b) and (d)]

假设采集到的第 k 帧干涉条纹可表示为

$$i_k(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y) + \delta_k], \quad (6)$$

式中 $a(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 分别背景和调制度, δ_k 为相移量, $\varphi(x, y)$ 表示波前畸变, f_0 表示在两束之间引入的空间载频。

为了进行傅里叶分析, 直流分量和倾斜分量需要从余弦表达式中被分离出来, 于是可使用

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[j\varphi(x, y)], \quad (7)$$

式中 $j = \sqrt{-1}$, 将(6)式展开为

$$i_k(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(j\delta_k) \exp(j2\pi f_0 x) + c^*(x, y) \exp(-j\delta_k) \exp(-j2\pi f_0 x), \quad (8)$$

式中 * 表示复共轭。 $i_k(x, y)$ 的傅里叶变换为 $I_k(u, v)$, 可表示为

$$I_k(u, v) = A(u, v) + \exp(j\delta_k) C(u - f_0, v) + \exp(-j\delta_k) C^*(u + f_0, v), \quad (9)$$

式中 $A(u, v)$ 和 $C(u, v)$ 分别表示 $a(x, y)$ 和 $c(x, y)$ 的傅里叶变换, 均为低频分量。(7)式表示的调制度部分位于 ± 1 级频谱位置, 并且被载频 f_0 将它和零频位置的背景分量分离。

实际上, 对于所提的共光路干涉结构, 几乎没有任何环节引入波前畸变, 因而(6)式与(7)式中的 $\varphi(x, y)$ 可近似为平面波。这种情况下, 获得的干涉条纹接近于直条纹, 几乎没有弯曲。于是 ± 1 级频谱的旁瓣很窄, 稍大一些的载频即可将其和零频有效分离; 因此, 有关干涉条纹数目以及 WP 的夹角的要求实际上并不苛刻。

观察(9)式可以发现, ± 1 级频谱中的系数部分 $\exp(j\delta_k)$ 中包含了第 k 帧干涉图的绝对相移, 当使用合适的滤波器提取出其中的一级频谱后利用下面的过程来求解相移量。

$I_k(u, v)$ 中在 f_0 处的复振幅近似表示为^[21]

$$I_k(f_0, 0) = A(f_0, 0) + \exp(j\delta_k) C(0, 0) + \exp(-j\delta_k) C^*(2f_0, 0) = \exp(j\delta_k) C(0, 0). \quad (10)$$

对于第 1 帧干涉条纹图(加载灰度为 0)的绝对相移可被假设为 $\delta_1 = 0$ 。于是对第 k 帧与第 1 帧干涉图的傅里叶变换在 $+1$ 级频谱处的结果进行相除运算, 计算出相移 δ_k :

$$\delta_k = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[I_k(f_0, 0)/I_1(f_0, 0)]}{\text{Re}[I_k(f_0, 0)/I_1(f_0, 0)]} \right\}, \quad (11)$$

式中 Im 和 Re 分别表示计算复数的虚部和实部。

根据(11)式依次计算各帧条纹图像相对于第 1 帧条纹图像之间的相对相移, 得到如图 3 所示的相位特性曲线。由此可见, 该 LCSLM 的相位输出与灰度输入是非线性的, 能够取得约 1.3λ 的相位调制深度。选择其中能够实现 1λ 相位调制的、线性度较好的一段区间(120~210 灰度级范围), 将这段区间的数据进行多项式拟合。

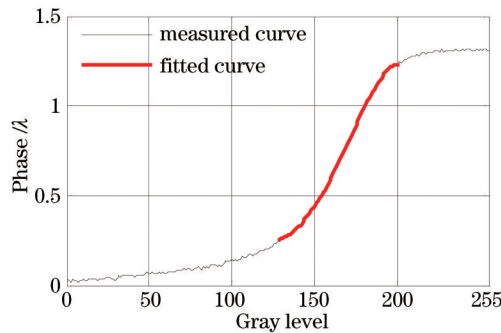


图3 相位调制特性测量曲线与拟合曲线

Fig.3 Phase modulation characteristic measured curve and fitted curve

对于这一款 LCSLM, 根据最小二乘原理拟合得到的最佳多项式, 其表达式为

$$G(\delta) = \text{round}(-0.58 \times 10^{-7} \delta^4 + 0.34 \times 10^{-4} \delta^3 - 0.72 \times 10^{-2} \delta^2 + 0.67\delta - 22.65), \quad (12)$$

式中 G 表示灰度值, δ 为相移量, $\text{round}()$ 为四舍五入后的取整运算。拟合曲线与计算数据之间的残余标准差等于 $9.5 \times 10^{-4} \lambda$ 。该曲线一经标定, 就可以得到一个灰度值与和相移量之间的对应关系, 从而可以通过改变灰度值来控制空间光调制器的空间位相分布。

这里另外建立了马赫-曾德尔干涉仪来测量同一款 LCSLM 的相位调制特性, 通过比较两种测量方法的

测量结果来进一步验证所提测量方法的可行性、有效性。因为马赫-曾德尔干涉仪属于非共路干涉仪,所以加载的控制灰度图中,上部分灰度值保持不变、下部分灰度值在0~255逐渐变化,然后同样采用傅里叶变换法计算上下两组干涉条纹之间的相对相移量,得到相位调制特性曲线。并且将两种方法的测量结果同时显示于图4,可见两条曲线的变化趋势非常接近,标准差等于 $5.3 \times 10^{-3} \lambda$ 。由此说明,所提方法是正确有效的。但仔细观察曲线的细微处可发现,与这里的测量结果相比,马赫-曾德尔干涉仪的测量结果在某些局部存在一定的波动。由此显示,所提方法得到的数据起伏性较小,拟合误差较小,是一种较好的LCSLM相位调制特性测量方法。

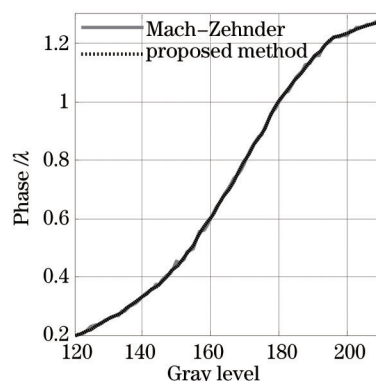


图4 马赫-曾德尔干涉法与所提方法的测量结果对比图

Fig.4 Comparison of measured results of Mach-Zehnder interferometry and the proposed method

4 结 论

本文提出一种新的测量LCSLM相位调制特性方法,根据液晶双折射原理产生正交偏振的参考光与测试光,利用WP产生横向剪切并在两正交偏振光束中引入倾斜调制,从而经检偏器后产生横向剪切载波干涉条纹。利用傅里叶变换法计算两帧干涉条纹之间的相移量。所提方法中,LCSLM既作为测试元件,也作为分光元件;经LCSLM分光后的参考光与测试光一直沿同一路径传播到达CCD探测器,从而形成严格的共路干涉测量。故干涉条纹稳定,不易受到环境振动、空气扰动的影响,对测量环境要求不高。同时,该方法能够测量得到LCSLM的整体相位调制特性。光学系统简单,所需元件很少,调整极为方便,是一种应用较好的测量方法。对测量原理、光学结构的琼斯矩阵进行了描述,同时用该方法测量了大恒公司GCI-770102型透射式LCSLM的相位调制特性,为该方法的实际应用提供了实验依据。

参 考 文 献

- 1 Xu Zhanbin, Ying Chaofu, Lin Peiqiu, *et al.*. Optimization of the phase modulated characters of phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. Journal of Zhejiang Normal University(Natural Sciences), 2009, 32(2): 164-168.
徐展斌,应朝福,林培秋,等. 纯相位液晶空间光调制器相位调制特性的优化[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2009, 32(2): 164-168.
- 2 Cai Dongmei, Xue Lixia, Ling Ning, *et al.*. Characteristics of phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(11): 19-23.
蔡冬梅,薛丽霞,凌 宁,等. 液晶空间光调制器相位调制特性研究[J]. 光电工程, 2007, 34(11): 19-23.
- 3 I J Cox, M L Miller. A review of watermarking and the importance of perceptual modelling[C]. SPIE, 1997, 3016: 92-99.
- 4 Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei, *et al.*. Optical modulation characteristics of liquid crystal television (LCTV) 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. 液晶电视(LCTV)的光学调制特性及其应用[J]. 中国激光, 2000, 27(8): 741-745.
- 5 Li Jie, Tang Feng, Wang Xiangzhao, *et al.*. System errors analysis of grating lateral shearing interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508006.
李 杰,唐 锋,王向朝,等. 光栅横向剪切干涉仪及其系统误差分析[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508006.
- 6 B E A Saleh, K Lu. Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator[J]. Opt Eng, 1990, 29(3): 240-246.

- 7 Moreno I, Davis J A, D'Nelly K G, *et al.*. Transmission and phase measurement for polarization eigenvectors in twisted-nematic liquid crystal spatial light modulators[J]. *Opt Eng*, 1998, 37(11): 3048-3052.
- 8 Yamauchi M, Marquez A, Davis J A, *et al.*. Interferometric phase measurements for polarization eigenvectors in twisted nematic liquid crystal spatial light modulators[J]. *Opt Commun*, 2000, 181(1): 1-6.
- 9 Wang Yijia, Zhang Chonglei, Wang Rong, *et al.*. Phase difference surface plasmon resonance sensor based on Mach-Zehnder configuration[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0714003.
王弋嘉, 张崇磊, 王 蓉, 等. 基于马赫-曾德尔结构的相差表面等离子体共振传感器[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0714003.
- 10 Dou R, Giles M K. Phase measurement and compensation of a wave front using a twisted nematic liquid crystal television [J]. *Appl Opt*, 1996, 35(19): 3647-3652.
- 11 Ge Aiming, Sui Zhan, Xu Keshu. 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, 徐克琦. 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.
- 12 Wang Zhihua, Yu Xin. Measuring of the phase modulation of liquid crystal spatial light modulator and correcting of the wavefront[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(2): 196-199.
王治华, 俞 信. 液晶空间光调制器相位调制测量及波前校正[J]. *光学技术*, 2005, 31(2): 196-199.
- 13 Ren Xiuyun, Cai Chunwei, Wang Zhu, *et al.*. The phase modulation properties measurement of LCSLM by common-path lateral shearing interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(5): 899-904.
任秀云, 蔡春伟, 王 翥, 等. 横向剪切干涉法共路测量LCSLM的相位调制特性[J]. *光子学报*, 2007, 36(5): 899-904.
- 14 Li Dahai, Tan Zefu, Chen Huaixin, *et al.*. Measuring LCTV's phase modulation characteristics based on cyclic radial shearing interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(8): 970-974.
李大海, 谭泽富, 陈怀新, 等. 采用环路径向剪切干涉法测量液晶电视的相位调制特性[J]. *光子学报*, 2002, 31(8): 970-974.
- 15 Zhao Xiaofeng, Li Dahai, Chen Zhenpei. Measuring phase modulation characteristics of liquid crystal spatial modulators by using cyclic radial shearing interference[J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2002, 39(4): 657-661.
赵晓凤, 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相位调制特性[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2002, 39(4): 657-661.
- 16 Dai H T, Xu K S, Liu Y J, *et al.*. Characteristics of LCoS phase-only spatial light modulator and its applications[J]. *Opt Commun*, 2004, 238(4-6): 269-276.
- 17 Zhang Yan, Wu Liying, Zhang Jian. Phase modulation characteristics of electrically addressed spatial light modulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 316-318.
张 艳, 吴丽莹, 张 健. 电寻址空间光调制器相位调制特性的研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(3): 316-318.
- 18 Li Kewu, Wang Zhibin, Zhang Rui, *et al.*. Study of birefringence dispersion based on liquid crystal variable retarder[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0108001.
李克武, 王志斌, 张 瑞, 等. 液晶可变延迟器的双折射色散研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0108001.
- 19 Jae-Hong Park, Chang-Jae Yu, Jinyool Kim, *et al.*. Concept of a liquid-crystal polarization beamsplitter based on binary phase gratings[J]. *Appl Phys Lett*, 2003, 83(10): 1918-1920.
- 20 Ignacio Moreno, Jeffrey A Davis, Felix A Klein, *et al.*. Polarization-splitting common-path interferometer based on a zero-twist liquid crystal display[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(11): 1797-1801.
- 21 K A Goldberg, J Bokor. Fourier-transform method of phase-shift determination[J]. *Appl Opt*, 2001, 40(17): 2886-2894.

栏目编辑: 何卓铭