

文章编号: 0253-2239(2010)05-1487-05

# 液晶空间光调制器相移特性测量与静态畸变补偿

白福忠<sup>1,2,3</sup> 饶长辉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

<sup>3</sup> 内蒙古工业大学机械学院, 内蒙古 呼和浩特 010051

**摘要** 为了研究反射式 256 pixel×256 pixel 纯相位液晶空间光调制器(LC-SLM)的性能,并最大程度地发挥其波前校正能力,建立了泰曼-格林(Twyman-Green)干涉仪与移相点衍射干涉仪分别对 SLM 的相移特性以及静态畸变进行测量,同时使用该空间光调制器对其自身的波前畸变进行补偿。实验结果表明,当应用一个正确的相位-灰度值映射并且增加静态畸变补偿后,这个空间光调制器的波前像差的峰谷(PV)值由 0.39λ 减小到 0.23λ,均方根(RMS)值由 0.08λ 减小到 0.03λ(λ=632.8 nm),远场点扩展函数的斯特雷尔比由 0.82 提高到 0.98。因此经畸变补偿后的液晶空间光调制器能够被更好地应用在动态衍射光学元件、波前产生和高分辨、高精度的波前校正中。

**关键词** 光学设计;液晶空间光调制器;相移特性;畸变测量;畸变补偿

**中图分类号** TN761 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103005.1487

## Phase Shift Characteristic Measurement and Static Distortion Compensation for Liquid Crystal Spatial Light Modulator

Bai Fuzhong<sup>1,2,3</sup> Rao Changhui<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup> School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot, Inner Mongolia 010051, China

**Abstract** To investigate the performance of a reflecting 256 pixel×256 pixels phase-only liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM) and to improve the ability of wavefront correction, the Twyman-Green interferometer and the phase-shift point-diffraction interferometer are set-up to measure the phase-shift characteristic and the static distortion of this SLM individually, and then use the SLM to compensate the distortion from itself. Experimental results show that the peak-to-valley (PV) value and the root mean square (RMS) values of the wavefront are reduced from 0.39 λ and 0.08 λ to 0.23 λ and 0.03 λ (λ = 632.8 nm) respectively after applying an appropriate mapping of phase to grayscale and adding static distortion compensation. In addition, the Strehl ratios of far-field point spread functions are increased from 0.82 to 0.98. Therefore, this SLM with compensation is an excellent candidate for applications, such as dynamic diffractive optical elements, wavefront generation, high-resolution and high-precision wavefront correction.

**Key words** optical design; liquid crystal spatial light modulator; phase-shift characteristic; distortion measurement; distortion compensation

## 1 引 言

波前校正不但是自适应光学与光束整形的关键技术,而且在视网膜成像、天文测量、激光通信和激

光加工等技术中也是不可缺少的<sup>[1]</sup>。国内外通常采用基于压电驱动、电致伸缩或磁致伸缩驱动的变形镜来实现波前校正。

**收稿日期**: 2009-06-10; **收到修改稿日期**: 2009-07-10

**作者简介**: 白福忠(1979—),男,博士研究生,主要从事波前探测和自适应光学技术等方面的研究。

E-mail: b\_fzh@yahoo.cn

**导师简介**: 饶长辉(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: chrhao@ioe.ac.cn

液晶空间光调制器(LC-SLM)能在可变的电驱动信号控制下改变空间光分布的相位、振幅(或强度)、偏振态等,是高分辨的动态衍射器件。纯相位液晶空间光调制器能对波前相位进行调制,且该器件具有成本低、无机械惯性、功耗小、高分辨率和相移单元可编程控制等特点。因此,液晶空间光调制器在一些场合可以代替变形镜进行波前校正<sup>[2~6]</sup>。

不同空间光调制器有着明显相异的特性,因此在使用前都需要被单独测量。测量内容包括:1)准确测量 SLM 的相移特性,通过对 SLM 加载不同的驱动电压(灰度值),主要测量 SLM 产生的相移与对应灰度值的关系;2)SLM 的反射基板在整个孔径内总是包含一些静态畸变<sup>[7]</sup>,因此必须在使用前测量出这个畸变,并进一步为 SLM 施加相应的控制灰度图加以补偿。本文建立了泰曼-格林(Twyman-Green)干涉仪和移相点衍射干涉仪分别对液晶空间光调制器的相移特性和静态畸变进行测量,并进一步实现对畸变波前的高精度补偿。

## 2 液晶空间光调制器相移原理

光束在传播过程中由于光学系统误差或大气湍流扰动,会产生波前相位误差,即波前畸变,导致光束质量下降。校正波前畸变的方法通常是通过控制光学相移来补偿光程差:

$$L = z \times n, \quad (1)$$

式中  $L$  为光程差; $z$  为光路的几何长度; $n$  为介质的折射率。变形镜通过改变  $z$  来补偿波前误差,而液晶空间光调制器则通过改变  $n$  校正波前畸变。

由于液晶材料具有电控双折射效应,光入射到液晶层,被分为 e 光和 o 光,对应的折射率分别是  $n_e$  和  $n_o$ 。当给液晶层施加电压时,所有的液晶分子朝电场方向转过一个角度  $\theta$ , $\theta$  是所加电压  $V$  的函数:

$$\theta = \begin{cases} 0 & V \leq V_c \\ \frac{\pi}{2} - 2\arctan\left[\exp\left(-\frac{V-V_c}{V_0}\right)\right] & V > V_c \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $V_c$  为阈值电压,小于它就不会发生偏转, $V_0$  是某一中间值,当  $V > V_c$  时,偏转角  $\theta$  随着  $V$  的增加而增加,直到达到  $\theta$  的饱和值  $\pi/2$ 。随着分子取向的偏转,e 光的折射率  $n_e$  发生变化,有

$$n_e(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta + n_o^2 \cos^2 \theta}}, \quad (3)$$

式中  $n_e(\theta)$  是 e 光随电压变化的有效折射率。当垂直于液晶层表面施加电压时,保持入射光的偏振方

向平行于液晶的光轴,液晶空间光调制器能够对入射光产生纯相位调制:

$$\delta = 2\pi d[n_e(\theta) - n_o]/\lambda, \quad (4)$$

式中  $\delta$  为相位延迟,即相移, $d$  为液晶层的厚度, $\lambda$  为入射光的波长。由于向列相液晶平行排列,液晶分子不发生扭曲,因此垂直于液晶层表面外加电压时,液晶空间光调制器能够产生纯相位调制<sup>[2,8,9]</sup>。

## 3 相移特性测量

以一个  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  的反射式液晶空间光调制器作为测试对象,它有  $4.61 \text{ mm}^2$  的方形工作区域和 85% 的填充比。由于制造商将器件的驱动电压映射为计算机显示的灰度值,用户可以由计算机将灰度变化范围在  $0 \sim 255$  的 8 bit 位图加载到液晶空间光调制器的驱动器中。位图的灰度值与施加到像素单元的驱动电压相对应,因此相移特性测量就是确定相位延迟与输入灰度之间的对应关系。

泰曼-格林干涉仪的实验光路如图 1 所示,波长为  $632.8 \text{ nm}$  的激光束通过偏振片,经分束镜(BS)后一束作为参考光经引入倾斜调制的反射镜反射,与另一束经 SLM 反射后的目标光会聚到分束器,产生的干涉条纹由 CCD 采集。为保证 SLM 工作在纯相位调制状态,调整偏振片使入射线偏振光平行 SLM 的非寻常光轴入射。当给液晶空间光调制器加载如图 2(a)所示的阶梯灰度时,干涉条纹的上下部分将产生相对移动,相移量可以用相关法估计<sup>[10]</sup>。尤其当干涉图中条纹数较多时,相关法的测量精度较高,测量误差低于  $0.1\%$ <sup>[10]</sup>。两干涉条纹间的相关系数被表示为

$$c = \frac{\langle I_u I_d \rangle - \langle I_u \rangle \langle I_d \rangle}{(\langle I_u^2 \rangle - \langle I_u \rangle^2)^{1/2} (\langle I_d^2 \rangle - \langle I_d \rangle^2)^{1/2}}, \quad (5)$$

式中  $\langle \rangle$  表示整个测量区域内取平均, $I_u$  和  $I_d$  分别表示干涉图中上下部分的干涉强度。相移可通过对相关系数求反余弦得到,即

$$\delta = \arccos c. \quad (6)$$

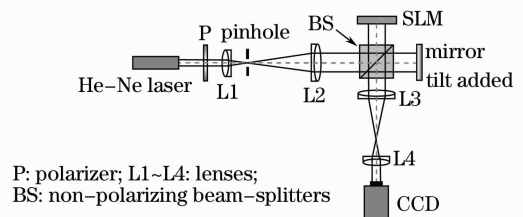


图 1 泰曼-格林干涉仪光路图

Fig. 1 Optical layout of Twyman-Green interferometer

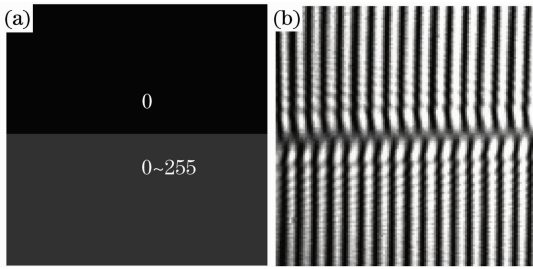


图 2 灰度图与对应的干涉条纹

Fig. 2 Grayscale images onto SLM and the corresponding interference fringes

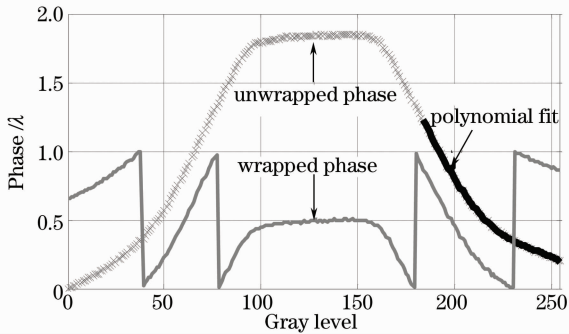


图 3 相移特性曲线

Fig. 3 Phase shift characteristic curve

图 3 是实验测量得到的 SLM 相移特性曲线, 对包裹相位 (wrapped phase) 经相位展开后可得到解包的相位 (unwrapped phase), 可以看出该空间光调制器能达到的最大相位调制约为  $1.8\lambda$ , 并且相移量随灰度值呈非线性变化。为了校正曲线的非线性并进一步获得客户查值表 (look-up table), 一般常用的方法有 Gamma 校正技术<sup>[11]</sup> 和反插值法<sup>[12]</sup>。实际上, 可以采用一种更为简便有效的处理方法。在图 3 中找到灰度范围为 185~255 对应  $0\sim 1\lambda$  的相位调制, 且给出 71 个灰度级。根据最小二乘原理对这段灰度范围以及对应的相移值进行多项式拟合, 对于我们的 SLM, 最佳的拟合多项式为

$$G(\delta) = \text{round}[116.05\delta^4 - 336.55\delta^3 + 363.11\delta^2 - 212.44\delta + 254.53], \quad (7)$$

式中  $G$  为灰度值,  $\delta$  为以波长为单位的相移值,  $\text{round}[\cdot]$  表示四舍五入后取整。拟合曲线与测量值之间的残差的标准差为  $0.0059 \text{ rad}$ , 证明拟合结果具有很好的可靠性。为了使用此标定结果来驱动 SLM, 让 SLM 产生所需要的波前, 只需建立一个大小为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 、取值范围为  $[0, 1)\lambda$  的相位阵列  $\varphi(x, y)$ , 然后利用 (7) 式将其转换到一个相应的控制灰度图。当波前像差的相位超过  $2\pi$  时, 则使用相位包裹方法 (phase wrapping) 进行处理<sup>[13]</sup>,

$$\varphi_\lambda(x, y) = \{[\varphi_r(x, y)] \bmod 2\pi\} / (2\pi), \quad (8)$$

式中  $\varphi_r$  是以弧度为单位的相位,  $\varphi_\lambda$  是以波长为单位的相位,  $\bmod 2\pi$  表示以  $2\pi$  为单位取模。经 (8) 式处理后可以将超过  $2\pi$  的相位函数变换到  $0\sim 1\lambda$  范围内。通过使用拟合多项式得到的控制灰度图便可直接用来驱动 SLM, 而无需进行查值处理, 这样有利于提高控制的准确性并改善校正效率。

#### 4 静态畸变测量与补偿

即使高质量的 SLM 也不完全是平的。实验中使用的反射式液晶空间光调制器, 由于制造的问题, 它的反射硅基板有一些轻微的弯曲。这个静态畸变能被测量, 同时也能够通过 SLM 对其自身的畸变加以补偿。

通过建立移相点衍射干涉仪 (PDI) 来测量 SLM 的静态畸变, 测量与补偿光路如图 4 所示, 是一个改进的马赫-曾德尔干涉仪, 参考波前是通过对其中的一臂经空间滤波产生。同时, 为了产生一个高质量的参考波, 针孔直径必须小于无畸变光束通过该系统时产生的艾里斑的一半<sup>[14]</sup>。对于系统, 针孔直径为  $25 \mu\text{m}$ , 约等于  $0.73\lambda f/D$ ,  $f$  是聚焦透镜 L3 的焦距,  $\lambda$  是波长,  $D$  是入瞳直径。参考光与目标光通过

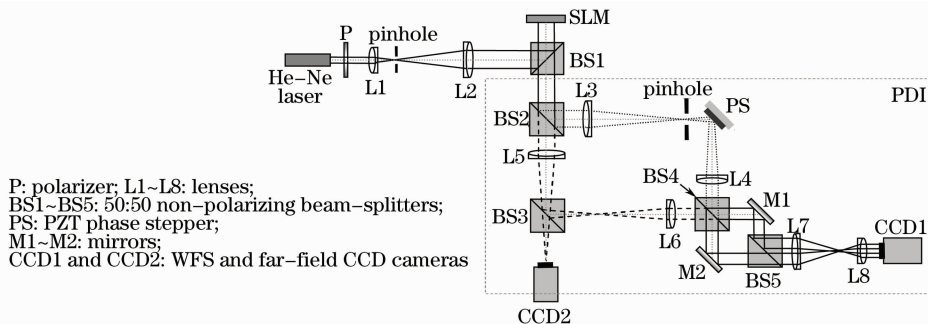


图 4 畸变测量与补偿实验光路

Fig. 4 Experimental setup for distortion measurement and compensation

分束镜 BS4 会合后可以同时产生两帧相位差为  $\pi$  的干涉图。因此,当压电陶瓷移相器 PS 引入 0 与  $\pi/2$  相移时,产生的四帧  $\pi/2$  相移步长的移相干涉图可由图像探测器 CCD1 经两次采集,结果显示于图 5 中。

标准四步移相算法能被用来重建波前相位分布,公式为<sup>[15]</sup>

$$\varphi(x, y) = \arctan\left[\frac{I_{3\pi/2} - I_{\pi/2}}{I_0 - I_\pi}\right], \quad (9)$$

式中  $(x, y)$  为坐标,  $\varphi$  为待测目标光相位分布。利用上式提取出的相位分布经相位展开并消除倾斜项后得到 SLM 的静态畸变波前,如图 6(a)所示,其 PV 与 RMS 值分别为  $0.39\lambda$  和  $0.08\lambda$ 。将其取反并通过(7)式转化为相应的控制灰度图[见图 7(a)]加

载到 SLM 以补偿该静态畸变。通过 PDI 测量补偿后的波前并显示于图 6(b),其 PV 和 RMS 值分别为  $0.23\lambda$  和  $0.03\lambda$ 。同时也发现,补偿前的干涉条纹有些弯曲,而图 7(b)所示的补偿后的干涉条纹明显变得更直。使用图 4 实验光路中 CCD2 可以记录到补偿前后的远场点扩散函数,如图 8 所示,CCD 数据位数为 8 bit,像素单元大小  $8.8 \mu\text{m}$ ,实验中系统的衍射极限  $2.44\lambda f/D$  约为 9.7 pixel。从图中可以看出,经补偿以后的远场光斑达到了衍射极限分辨率,而斯特雷尔比(Strehl ratio)由补偿前的 0.82 提高到 0.98,补偿后的 SLM 的面形质量可比较于商业的高质量的反光镜和分束镜。

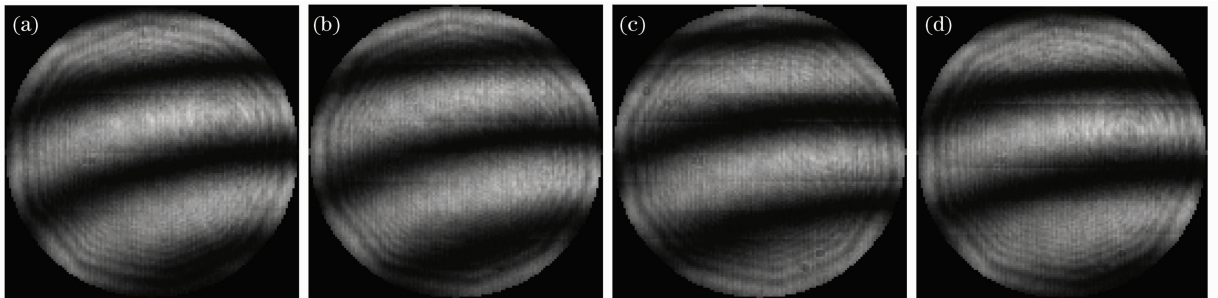


图 5 四帧  $\pi/2$  相移步长的移相干涉图

Fig. 5 Four frames phase-shifted interferograms with  $\pi/2$  phase step

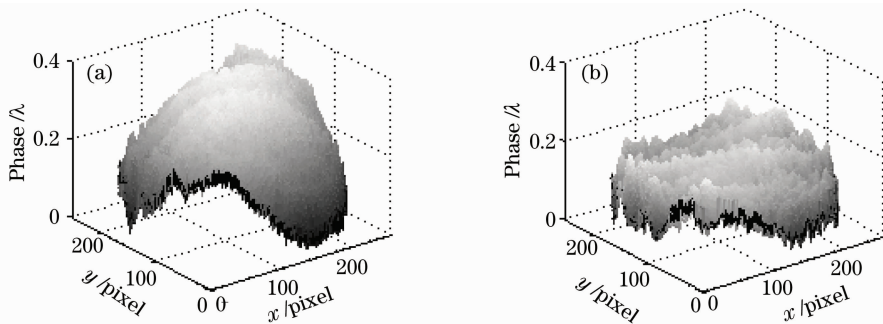


图 6 静态畸变补偿前后的相位分布

Fig. 6 Static distortion phase distributions (a) before and (b) after compensation

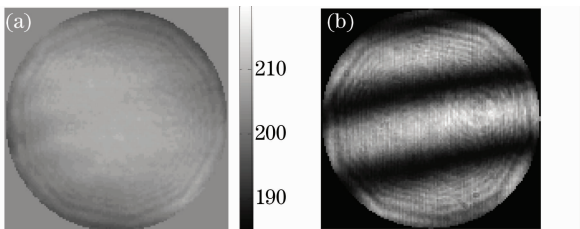


图 7 (a)控制灰度图和(b)静态畸变补偿后的干涉图  
Fig. 7 (a) Control grayscale image and (b) interferogram after the static distortion is compensated by SLM

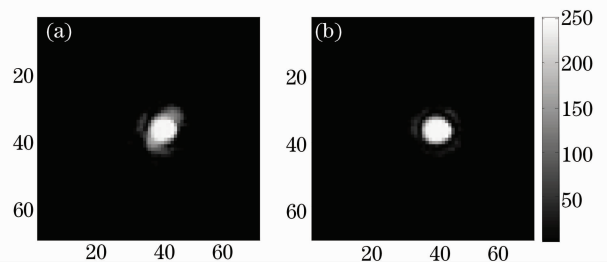


图 8 SLM 静态畸变补偿前后的点扩展函数,单位:像素  
Fig. 8 Far-field point spread functions (a) before and (b) after the static distortion is compensated by SLM, Unit: pixel ( $8.8 \mu\text{m}/\text{pixel}$ )

## 5 结 论

随着液晶空间光调制器性能的不不断提高,使得 SLM 的应用将变得更加普遍,更多的研究人员将需要对它进行简单准确地测量和控制。本文建立了泰曼-格林干涉仪和移相点衍射干涉仪分别对液晶空间光调制器的相移特性和静态畸变进行测量,同时利用 SLM 对其自身的静态畸变进行补偿。实验结果表明,通过准确的相移特性和静态畸变测量,经畸变补偿后的液晶空间光调制器能够提供极强的波前控制能力,这将允许其更好地应用在动态衍射光学元件、大气湍流模拟、波前校正和光束控制中。

**致谢** 感谢中国科学院光电技术研究所的姜文汉研究员对本文的修改。同时在本文的实验工作中,蔡冬梅博士给予作者很大的帮助,在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- Zhang Jian, Wu Liying, Liu Bohan. Liquid crystal spatial light modulator and real-time transform of interferential light wave front [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(1): 124~127  
张健, 吴丽莹, 刘伯晗. 液晶空间光调制器与相干光波前实时变换[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(1): 124~127
- 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. 利用液晶电视的位相调制特性补偿畸变波前[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7): 614~618
- R. Dou. Close-loop adaptive-optics system with a liquid-crystal television as a phase retarder[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(14): 1583~1585
- Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei *et al.*. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1107~1111  
陈怀新, 隋展, 陈祯培等. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1107~1111
- Liu Yongjun, Xuan Li, Hu Lifa *et al.*. Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure phase [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1682~1686  
刘永军, 宣丽, 胡立发等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1682~1686
- 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
- Jason D. Schmidt, Matthew E. Goda, Bradley D. Duncan. Aberration production using a high-resolution liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(13): 2423~2433
- 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
- S. T. Wu, U. Efron, L. D. Hess. Birefringence measurements of liquid crystals [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(21): 3911~3915
- Hedser van Brug. Phase-step calibration for phase-stepped interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(16): 3549~3555
- Cao Zhaoliang, Mu Quanquan, Hu Lifa *et al.*. Nonlinear phase modulation of liquid crystal wavefront corrector and closed loop correction [J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2008, **23**(2): 157~162  
曹召良, 穆全全, 胡立发等. 液晶波前校正器位相调制非线性及闭环校正研究[J]. *液晶与显示*, 2008, **23**(2): 157~162
- 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): 1360~1364  
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): 1360~1364
- Cai Dongmei, Ling Ning, Jiang Wenhan. The performance of phase-only liquid crystal spatial light modulator used for generating Zernike terms [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(2): 897~903  
蔡冬梅, 凌宁, 姜文汉. 纯相位液晶空间光调制器拟合泽尼克像差性能分析[J]. *物理学报*, 2008, **57**(2): 897~903
- R. N. Smartt, W. H. Steel. Theory and application of point-diffraction interferometer [J]. *Japanese J. Appl. Phys.*, 1975, **14**: 351~356
- Joanna Schmit, Katherine Creath. Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(19): 3610~3619