

文章编号: 1007-2780(2012)06-0730-06

# 液晶波前校正器动态位相响应特性研究

芦永军<sup>1</sup>, 曹召良<sup>2</sup>, 曲艳玲<sup>1</sup>, 王海萍<sup>3</sup>

(1. 大连民族学院 光电子技术研究所, 大连 116600, E-mail: lyj@dlnu.edu.cn;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘 要:** 为了对畸变波前进行精确校正, 研究了液晶波前校正器在不同灰度级之间的动态位相响应特性, 准确确定其响应时间。首先给出液晶波前校正器的响应时间和位相变化的检测方案。然后检测了液晶波前校正器在 0 和 255 灰度级之间的上升和下降时间, 分别为 7 ms 和 11 ms。在保证校正精度的条件下, 对该位相曲线采取  $\lambda/10$  的误差截断, 使上升和下降时间分别减少到 4 ms 和 6.8 ms。最后, 研究了各灰度级依次上升到 255 和从 255 再依次回落到各灰度级的动态响应时间。结果表明, 各灰度级的上升时间在 2~5.2 ms 之间变化, 下降时间在 3.66~8.74 ms 之间变化, 且无论是上升还是下降, 150 和 255 灰度级之间转换速度最快, 在 255 灰度级邻近的灰度响应速度最慢, 且响应时间长于 0 和 255 灰度之间的响应时间。因此, 在波前校正中, 须以 255 灰度邻近的灰度级中最长的响应时间作为液晶波前校正器的响应时间, 以确保波前校正精度。

**关 键 词:** 液晶波前校正器; 位相; 响应时间; 动态

中图分类号: TH74; O753<sup>+</sup>.2

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20122706.0730

## Dynamic Phase Response of Liquid Crystal Wavefront Corrector

LU Yong-jun<sup>1</sup>, CAO Zhao-liang<sup>2</sup>, QU Yan-ling<sup>1</sup>, WANG Hai-ping<sup>3</sup>

(1. Optoelectronic Institute, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China, E-mail: lyj@dlnu.edu.cn;

2. State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** To achieve the high accuracy correction of the distorted wavefront, dynamic phase response characteristic between different grey levels of liquid crystal wavefront correctors (LC WFCs) was investigated. First, a scheme was given to measure the response time and phase modulation of the LC WFC. Then, the fall and rise time of a LC WFC were measured between 0 and 255 grey levels. The results indicate the rise and fall time are 7 ms and 11 ms respectively. To assure the correction accuracy, the phase modulation curves were cut off with error of  $\lambda/10$  ( $\lambda=633$  nm) and then the rise and fall time were reduced to 4 ms and 6.8 ms respectively. At last, the dynamic response time, which is produced with every other grey levels go up to 255 grey level and the reverse process, was measured. The measured results show that the rise and fall time of the grey levels vary at the range of 2~5.2 ms and 3.7~8.7 ms respectively. Simultaneously, the switching time between the grey level of 150 and 255 is shortest for both of the rise and fall time, and the response time is longest for the

收稿日期: 2012-07-18; 修订日期: 2012-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60736042, No. 11174274)

作者简介: 芦永军(1976-), 男, 内蒙古乌海人, 博士, 副教授, 主要从事光学设计与光电检测研究。

grey levels which is adjacent to 255 grey level. Furthermore, the response time of the grey levels nearby 255 grey level is larger than the response time between 0 and 255 grey level. Therefore, to assure the accurate correction of the wavefront, the response time of the LC WFC should be selected with the longest switch time among the grey levels which is adjacent to 255 grey level.

**Key words:** liquid crystal wavefront corrector; phase; response time; dynamic

## 1 引言

液晶自适应光学技术由于具有高像素密度、价格低廉和加工容易等优势,已经被广泛研究<sup>[1-8]</sup>。其有上百万校正单元,可以解决变形镜校正单元数无法满足大口径望远镜的应用需求问题。但是液晶自适应光学技术也存在着能量效率低、校正速度慢的缺点<sup>[9-10]</sup>。其中,其校正速度主要受限于液晶波前校正器的响应速度。大口径望远镜上的自适应光学技术要求波前探测器、波前控制器和波前校正器都应具备千赫兹以上的校正频率,而液晶波前校正器的响应速度一般在100 Hz量级,为此有公司专门研制快速液晶波前校正器,其响应速度可达200 Hz以上<sup>[11]</sup>。即使如此,也还是不能满足应用需求。为此,关于液晶波前校正器的响应时间研究成为热点。

对于高像素密度的液晶波前校正器,一般采用相息图方法实现对波前校正<sup>[12]</sup>。其要求液晶波前校正器具备 $2\pi$ 位相调制量。因此,液晶波前校正器的响应时间一般取 $2\pi$ 位相调制量的时间。液晶波前校正器的响应时间取决于液晶分子在电场下的响应速度。对于平行排列的液晶波前校正器,当不施加电压时,液晶分子呈水平排列;当施加电压时,液晶分子随着电压的增大向垂直方向运动,直到完全垂直;当去掉电压后,液晶分子在弹性力的作用下,迅速转向水平状态。液晶分子从水平状态变为垂直状态所用的时间为上升时间,从垂直状态变为水平状态所用的时间为下降时间。一般情况下,液晶的下降时间大于上升时间,液晶波前校正器为了实现高精度校正,必须以液晶下降时到达 $2\pi$ 的时间作为液晶波前校正器的响应时间<sup>[13]</sup>。

在实际应用中,由于液晶波前校正器采用相息图方法进行校正,因此需要把 $2\pi$ 位相进行量化,把位相从 $0\sim 2\pi$ 分成若干份。在校正波前畸

变时,不同像素上施加不同的位相值,利用光的衍射从而形成一个连续的校正波面。因此,在实际校正过程中,液晶波前校正器的每个像素的位相变化不仅是从 $0$ 到 $2\pi$ ,还有大量的其他位相值之间的相互转换。这就要求液晶分子不仅能在垂直和水平之间转换,其还需要从某一中间态到达另一中间态,以校正波前畸变。在除了 $0$ 和 $2\pi$ 以外的其他位相值之间的变化时,该变化时间可能短于液晶波前校正器的响应时间也可能长于响应时间。如果中间位相值之间的变化时间长于液晶波前校正器的响应时间,则可导致校正精度急剧下降。因此,需要研究液晶波前校正器不同中间态之间的响应速度,以便正确确定液晶波前校正器的响应时间,而不是简单的以 $2\pi$ 的下降时间作为液晶波前校正器的响应时间。本文主要以实验为依据,研究了液晶波前校正器的中间态的响应特性,即动态响应特性。

## 2 液晶波前校正器的工作原理

向列相液晶分子呈长棒状,其极化率和折射率都具有各向异性,相当于单轴晶体,具有非寻常光折射率 $n_e$ 和寻常光折射率 $n_o$ 。在电场作用下液晶分子会发生偏转,且不同的电压对应不同的液晶分子倾角,根据折射率椭球方程可知,其也对应于不同的有效折射率 $n_e(\theta)$ 。当电压改变时,由于有效折射率的变化导致光的位相发生改变。位相调制量的大小取决于 $n_e$ 和 $n_o$ 之差 $\Delta n$ 。因此,对液晶施加不同的电压,可以产生不同的相位调制。整个液晶屏在某一点处的相位调制量可以表示为<sup>[14-15]</sup>:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d [n_e(z) - n_o] dz \quad (1)$$

式中 $d$ 为液晶层厚度, $z$ 沿液晶屏的法线方向。

由(1)式可以看出,当液晶层的厚度增大时,液晶波前校正器的校正量也增大。但是液晶层厚

度增加,会导致液晶的响应速度急剧下降。因此从响应速度的角度考虑,液晶层的厚度越小越好。但是一般的波前畸变都在几个微米左右,为了获得大畸变量校正,研究者采用了相息图的方法。其可以把大畸变位相压缩到一个波长以内,利用光的衍射来再现大的位相校正量。因此,为了校正大畸变,要求液晶波前校正器必须具备一个波长的校正量。

### 3 液晶波前校正器的动态响应特性

#### 3.1 响应时间测量光路

为了研究液晶波前校正器的动态响应特性,选取美国 BNS 公司的 P512 液晶空间光调制器,其是平行排列的反射式硅基液晶(LCOS)波前校正器,在波长 633 nm 处的调制量为  $2\pi$ ,像素数  $512 \times 512$ ,像素尺寸  $16 \mu\text{m}$ 。液晶波前校正器和液晶显示器类似,其电压控制是通过灰度来实现的。 $0 \sim 2\pi$  位相对应的灰度级范围为  $0 \sim 255$ 。因此,对于液晶波前校正器,通过改变灰度级,相当于改变了控制电压。

液晶波前校正器响应时间的测量光路如图 1 所示,激光器发出 633 nm 的光经偏振片后变为线偏振光并入射到液晶波前校正器上,然后被液晶波前校正器反射并经过第二个偏振片后,被透镜聚焦到光电探测器上。光电探测器把光信号转换为电信号并输出给示波器。根据示波器输出的电光响应曲线可以计算出液晶波前校正器的响应时间。为了使液晶波前校正器输出的光强随施加的电压变化,把第一个偏振片的透光轴相对液晶排列方向成  $45^\circ$  角放置,以使液晶波前校正器中产生的 e 光与 o 光等强度;然后把第二个偏振片与第一个偏振片透光轴正交放置,以使液晶波前校正器中产生的 e 光与 o 光的位相延迟为  $2\pi$  和  $0$  时为最暗态,位相延迟为  $\pi$  时为最亮态。

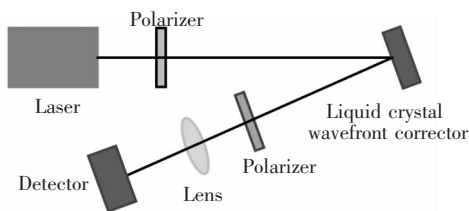


图 1 液晶波前校正器响应时间的测量光路

Fig. 1 Optical layout for measuring the response time of liquid crystal wavefront corrector

#### 3.2 液晶波前校正器的上升和下降时间

实验中首先测量了液晶波前校正器位相变化  $2\pi$  时的上升和下降时间。具体测量方法是:给液晶波前校正器交替发送灰度级为 0 和 255 的黑白图片,相当于液晶分子在高压和低压之间转换。由于液晶波前校正器的调制量为一个波长,因此其位相就在  $0$  和  $2\pi$  之间相互转换。 $0$  和 255 灰度级分别对应低电压和高电压,当从 0 变化到 255 时,测得的时间就是液晶的上升时间,当从 255 变化到 0 灰度级时,测得的时间就是液晶的下降时间。当光电探测器探测到光强信号后,把光信号转换为电信号并发送给示波器。示波器测量到电压信号显示并输出到计算机。由于测量到的光强变化是 e 光和 o 光的干涉曲线,因此满足干涉光强分布公式:

$$I = 4I_1 \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2} \quad (2)$$

式中  $I$  是平均光强,  $I_1$  是 o 光和 e 光各自的光强,  $\Delta\varphi$  是位相变化量。对光强进行归一化后,可以得到位相求解公式:

$$\Delta\varphi = 2\arccos \sqrt{I'} \quad (3)$$

$I'$  是归一化光强。位相变化除以  $2\pi$ , 就可以获得调制量的变化曲线。已知在 0 灰度级时 e 光与 o 光的位相延迟为  $2\pi$ , 即为暗态, 此时光电探测器探测不到光信号。当液晶波前校正器的灰度从 0 变化到 255 时, 由于位相是从  $2\pi$  到  $\pi$  再到 0 变化, 对应的光强变化也应该是由暗到亮再到暗; 类似的, 当灰度从 255 变化到 0 时, 其亮度响应曲线的逆过程仍然是由暗到亮再到暗。因此, 根据测量的电光响应曲线, 便可以计算出液晶波前校正器的位相变化, 进而得到响应时间。图 2 是液晶波前校正器的上升响应曲线。由图可以看出, 液晶波前校正器的调制量变化  $1\lambda$  所需上升响应时间为 7 ms。此外, 从图中也可以看出液晶在刚施加电压时响应较快, 但是到末端时响应缓慢, 即液晶的响应拖尾现象严重影响了液晶波前校正器的响应速度。计算结果显示, 对于最后  $0.1\lambda$  的调制量, 响应时间需要 3 ms。如果能够对末端进行截断, 则可以显著提高液晶波前校正器的响应速度。在实际波前校正中, 保持波前畸变的 PV 值等于或小于  $\lambda/10$  就能获得清晰成像, 即  $\lambda/10$  的波前误差是允许的。因此可以对图中的位相调制量进行  $\lambda/10$  截断, 即忽略小于该调制量的响应。图中虚

线标出的时间对应从  $\lambda$  到  $\lambda/10$  位相变化的时间, 其响应时间为 4 ms。本文中所有关于响应时间都按照这个标准进行截断。

图 3 是灰度级从 255 变到 0 时液晶波前校正器的下降响应曲线。其位相调制量变化曲线同样根据亮度变化计算得到。测量结果显示其下降响应时间为 6.8 ms, 说明液晶的下降响应速度比上升响应速度慢。根据液晶器件的物理特性, 当施加电压时, 液晶受电场驱动响应速度较快, 而撤去电压时, 液晶依赖弹性畸变能(主要为弯曲弹性畸变能)而运动, 通常弹性畸变能比外加电能小, 所以液晶的下降响应时间长。由于每次驱动各个像

素上的电压是升高或是降低完全是随机的, 因此应该以液晶的下降时间作为液晶波前校正器的响应时间, 即对于测量的液晶波前校正器, 其响应时间应该是 6.8 ms, 而不是 4 ms。

### 3.3 液晶波前校正器的动态响应

由于液晶波前校正器一般采用相息图方法实现波前校正, 其需要对波前位相进行  $2\pi$  取模和量化, 量化后的波前灰度图包含了 0~255 的所有灰度级。因此, 在进行波前校正时, 如果初始状态为 255 灰度级, 除了灰度级从 255 变化到 0 以外, 还包含了从 255 到其他灰度级的变化。但是上述测量仅仅能够描述 255 和 0 灰度级之间切换时的响应时间, 255 和其他灰度级之间的响应时间则无法获得。由于液晶波前校正器校正的是整个波面, 因此要求在一定时间内所有的液晶分子都到达校正位置, 才能获得高精度校正。因此必须确切掌握中间灰度之间的变化情况, 确保液晶波前校正器在限定时间内实现波前的精确校正。为了获得其他灰度级的动态响应时间, 以 255 灰度级为固定点, 从 0 灰度级开始, 依次测量其他灰度变化至 255 的电光响应曲线。然后根据这些响应曲线分别计算其对应的上升响应时间。实际测量中, 采用每隔 40 个灰度测量一个点, 测量结果如图 4 所示。可以看出, 不同灰度级变化到 255 灰度级时, 液晶的响应时间呈非线性变化: 先逐渐下降然后又逐渐上升。在灰度级为 150 时, 即当灰度级从 150 变化到 255 时, 液晶分子的响应最快, 为 2 ms。灰度级越接近 255, 其响应越慢, 对于 254 灰度级, 从拟合曲线知, 其响应时间为 5.2 ms。

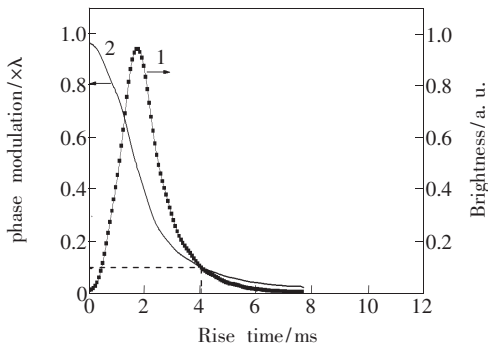


图 2 液晶波前校正器对于 633 nm 波长的上升响应时间: 曲线 1 为电光响应曲线, 曲线 2 为位相变化曲线, 虚线的交叉点为位相调制量的截断点。

Fig. 2 Rise time at the wavelength of 633 nm: curve 1 is the electro-optical curve, curve 2 represents the phase modulation, the cross point of two dashed lines is the cutoff position of the phase modulation.

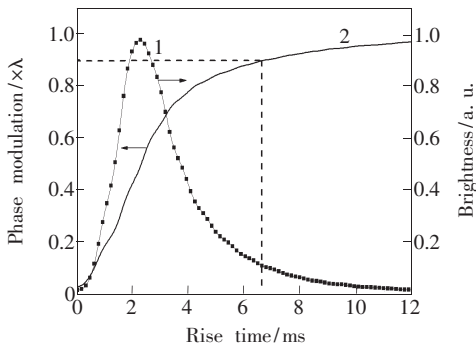


图 3 液晶波前校正器对于 633 nm 波长的下降响应时间: 曲线 1 为电光响应曲线, 曲线 2 为位相变化曲线, 虚线的交叉点为位相调制量的截断点。

Fig. 3 Fall time at the wavelength of 633 nm: curve 1 is the electro-optical curve, curve 2 represents the phase modulation, the cross point of two dashed lines is the cutoff position of the phase modulation.

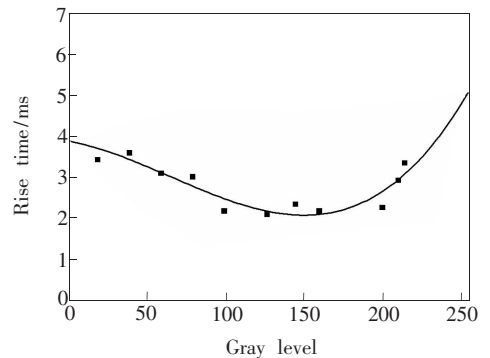


图 4 从不同灰度级变化到 255 灰度级的上升响应时间: ■ 为测量值, 实线为拟合曲线。

Fig. 4 Fall times that is produced by other grey levels changing to 255 grey level: ■ is the measured data, the line represents the fitted data.

这说明,液晶波前校正器的上升时间在 2~5.2 ms 之间变化。而前边测量的从 0 变化到 255 灰度级液晶波前校正器的上升时间为 4 ms。因而可以看出,灰度级差小时其响应时间有可能长于 0~255 的响应时间。

为了测量液晶波前校正器在下降过程中不同灰度级间的动态响应,以 255 灰度级为基准,依次从 255 回落到各灰度级,即测量相对于 255 灰度级的下降响应时间,测量结果如图 5 所示。可以看出其动态响应和上升过程中的动态响应变化趋势类似。中间灰度也在 150 灰度级时响应时间最快,为 3.66 ms;其最慢下降时间为从 255 变化到 254 灰度级,为 8.74 ms,该时间明显长于从 255 变化到 0 灰度级的 6.8 ms。因此,该液晶波前校正器的响应时间应为 8.74 ms,而不是 6.8 ms。在液晶波前校正器的实际使用中,为了获得精确校正,最少应该给予液晶波前校正器 8.74 ms 的响应时间。

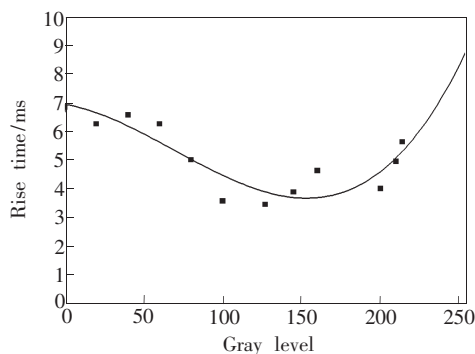


图 5 从 255 灰度级回落到不同灰度级的下降响应时间: ■ 为测量值,实线为拟合曲线。

Fig. 5 Fall times that is produced by 255 grey level changing to other grey levels: ■ is the measured data, the line represents the fitted data.

从以上结果可以看出,液晶波前校正器的不同灰度级的响应时间是不同的,且表现出两端灰度级响应较慢,中间灰度级响应较快。此外,总体来说,上升的响应速度很快,响应时间在 2~5.2 ms 之间变化;下降时间较慢,在 3.66~8.74 ms 之间变化。上升和下降的最慢响应时间在 255 附近的

灰度级,即在高压区的临近灰度之间。因此,从动态响应的测量结果看,液晶波前校正器应该以下降时间作为其响应时间。但是,不能以 255 变化到 0 灰度级时的下降时间作为响应时间,而是应以动态响应中的最长下降时间作为液晶波前校正器的响应时间,即高压区附近的邻近灰度之间的响应时间。因此,在实际应用中,为了获得波前畸变的精确校正,不能简单的以其下降时间为响应时间,而是需要知道液晶波前校正器的动态响应,以其中的最长响应时间为液晶波前校正器的响应时间。

## 4 结 论

研究了液晶波前校正器的动态位相响应特性,为其在自适应光学中的应用提供响应时间依据。首先根据液晶的各向异性特性设计了测量方法,即利用光强变化来计算液晶的响应时间和位相调制量。然后分别测量了液晶波前校正器的上升和下降时间,发现上升和下降曲线的尾部变化缓慢。为此,采用  $\lambda/10$  截断方案,缩短液晶波前校正器的上升和下降时间。最后,测量各灰度级依次上升到 255 和从 255 再依次回落到各灰度级的动态响应时间。测量结果表明,各灰度级的上升响应速度很快,响应时间在 2~5.2 ms 之间变化;下降时间较慢,在 3.66~8.74 ms 之间变化。同时发现,在上升和下降区间都是在 150 和 255 灰度级之间转换时响应速度最快。此外,在靠近 255 灰度级区域(高压区域)的灰度级的上升和下降时间都长于 0~255 的上升和下降时间。因此,在波前校正时,为了获得高精度校正,须以液晶波前校正器高压区域灰度级中最长的下降时间作为响应时间。

实验结果显示,为了对波前畸变进行完全校正,对液晶波前校正器各灰度级动态响应的测量非常必要。本文虽然仅测量了一个校正器的动态响应特性,但是由于向列相液晶的性质都非常类似,因此该液晶波前校正器的动态响应变化趋势可以推广到其他向列相液晶波前校正器,为液晶波前校正器的应用提供依据和方法。

## 参 考 文 献:

- [1] Love G. Wave-front correction and production of Zernike modes with a liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Appl.*

- Opt.*, 1997, 36(7):1517-1524.
- [2] Seratis S, Stockley J. Advances in liquid crystal based devices for wavefront control and beamsteering [J]. *Proc. SPIE*, 2005, 5894: 58940K-1-58940K-13.
- [3] Cao Z L, MU Q Q, HU L F, *et al.* An achromatic system for twisted alignment liquid crystal wavefront correct [J]. *Appl. Opt.*, 2008, 47(8):1020-1024.
- [4] HU L F, Xuan L, Liu Y J, *et al.* Phase-only liquid crystal spatial light modulator for wavefront correction with high precision [J]. *Opt. Express*, 2004, 12(26):6403-6409.
- [5] Restino S R, Dayton D, Browne S, *et al.* On the use of dual frequency nematic material for adaptive optics systems: first results of a closed-loop experiment [J]. *Opt. Express*, 2000, 6(1):2-6.
- [6] 陈浩, 宣丽, 胡立发, 等. 望远镜的紧凑型闭环液晶自适应光学系统设计 [J]. *液晶与显示*, 2010, 25(3):379-385.
- [7] 李鹏飞, 许金凯, 胡立发, 等. 人眼像差校正仪成像 CCD 随动控制的设计与实现 [J]. *液晶与显示*, 2010, 25(5): 733-737.
- [8] Fernando V M, Pablo A. Phasor averaging for wavefront correction with liquid crystal spatial light modulators [J]. *Optics Communications*, 1998, 152(4):233-238.
- [9] 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.
- [10] 李大禹, 胡立发, 穆全全, 等. CUDA 架构下的液晶自适应波面数值解析 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 848-854.
- [11] Cao Z L, Mu Q Q, Hu L F, *et al.* Correction of horizontal turbulence with nematic liquid crystal wavefront corrector [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(10):7006-7013.
- [12] Cao Z L, Xuan L, Hu L F, *et al.* Effects of the space-bandwidth product on the liquid-crystal kinoform [J]. *Opt. Express*, 2005, 13(14):5186-5191.
- [13] Cao Z L, Mu Q Q, Hu L F, *et al.* Improve the loop frequency of liquid crystal adaptive optics by concurrent control technique [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(6):946-950.
- [14] 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.
- [15] 姜宝光, 穆全全, 曹召良, 等. 液晶空间光调制器对真实人眼畸变波前的校正 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2651-2656.

## 《液晶与显示》关于作者署名的通告

针对目前论文署名比较随便, 论文作者要求增减合著者或改变排名顺序的情况时有发生, 本刊编辑部特提请文章作者注意: 论文署名是一件十分严肃的事情。在论文上署名的作者应为参与论文撰写或对论文所涉及的研究工作有贡献的人, 所有署名作者均应对文章内容负责。凡合著的文章, 投稿前应仔细斟酌, 考虑周全, 并征得所有合作者的同意, 同时应写明联系人。署名及排序在投稿后确实需要改变时, 应由联系人向编辑部出示有关合著者同意并签名(盖章)的函件。否则, 编辑部有权拒绝其要求。

《液晶与显示》编辑部