

# Mask 相位法校准液晶空间光调制器的相位调制特性

孔宁宁<sup>1,2,3</sup> 李 抄<sup>1,2,3</sup> 夏明亮<sup>1,2,3</sup> 李大禹<sup>1</sup> 齐 岳<sup>1,2,3</sup> 宣 丽<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163  
<sup>2</sup>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  
<sup>3</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 提出 Mask 相位法校准出厂标定波长在 532 nm 的液晶空间光调制器(LG-SLM)在 561 nm 处的相位调制特性曲线。首先基于傅里叶光学模拟计算得出棋盘型二维相位光栅相位对比度与零级衍射光斑光强之间的对应关系,然后搭建实验光路测量计算机所发灰度图所对应的零级衍射光斑光强值。根据前面两组结果最后得到相位延迟量与计算机灰度级之间的关系曲线,从而得到 LG-SLM 在 561 nm 处的相位调制特性曲线。用 4 的离焦对光斑进行调制,校准之后光斑光强分布与理论计算值之间的偏差为 45.7,比较准之前的偏差 110.4 减少了 64.7;用 10 的倾斜对光斑进行调制,校准之后零级衍射光斑和二级衍射光斑的强度分别是校准前的 32.3%和 64.1%。实验结果表明,使用 Mask 相位法对 LG-SLM 的相位调制特性曲线进行校准之后, LG-SLM 的调制效果有了明显的改进。

**关键词** 衍射;液晶空间光调制器;傅里叶光学;相位调制;Mask 相位法

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/ACS201131.0305002

## Calibration of Phase Modulation Properties of Liquid-Crystal Spatial-Light Modulator by Mask-Phase Method

Kong Ningning<sup>1,2,3</sup> Li Chao<sup>1,2,3</sup> Xia Mingliang<sup>1,2,3</sup> Li Dayu<sup>1</sup> Qi Yue<sup>1,2,3</sup> Xuan Li<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China  
<sup>2</sup>State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>3</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A Mask-phase method is proposed to calibrate the modulation property of liquid-crystal-spatial light modulator (LG-SLM) at 561 nm, which is calibrated at 532 nm as ex-factory. Firstly, the relation between the phase contrast of the checkerboard phase grating and the intensity of zero-order diffraction spots is simulated based on Fourier optics. Then the optical path is set up to measure the relation between the gray level and the intensity of zero-order diffraction spots. At last the relation between the gray level and the phase retardation is obtained according to the simulation and experimental results. And the phase-modulation characteristic curve of the LG-SLM at 561 nm is also acquired. After calibration, a spot is modulated by 4 defocus. In this condition, the intensity distribution deviating from the theoretical value is 45.7, and is reduced by 64.7 compared with 110.4, which is the intensity distribution before calibration. When the spot is modulated by 10 tilt, the intensities of zero-order and second-order after calibration are reduced to 32.3% and 64.1% respectively, compared to the intensity distribution before calibration. Experimental result indicates that the modulation result of LG-SLM has a great improvement after calibration by the Mask phase method.

**Key words** diffraction; liquid-crystal spatial-light modulator; Fourier optics; phase modulation; Mask-phase method

**OCIS codes** 050.1950; 070.0070; 120.5060

收稿日期: 2010-08-11; 收到修改稿日期: 2010-09-19

基金项目: 国家 863 计划(2007AA703417)和国家自然科学基金重点项目(60736042)资助课题。

作者简介: 孔宁宁(1985),男,博士研究生,主要从事液晶自适应光学等方面的研究。E-mail: njjxp@163.com

导师简介: 宣丽(1957),女,博士,研究员,主要从事液晶光学、液晶自适应光学工程和液晶器件物理等方面的研究。

E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn

## 1 引言

相位型液晶空间光调制器(LG-SLM)是一种可编程的光信息处理器件,可以在可变电信号的驱动下对光波相位进行连续调制<sup>[1]</sup>。因此在二元光学<sup>[2]</sup>、光互联<sup>[3]</sup>、全息光学<sup>[4]</sup>和自适应光学<sup>[5-7]</sup>等领域中均有广泛应用。LG-SLM在出厂时一般都会在某一个波长下对相位调制特性进行标定,一般情况下不同的光学系统使用的光源波长不一定相同,由于液晶分子的折射率及  $n$  值会随着波长不同而变化,所以随着光波长的不同, LG-SLM 的相位调制特性也会发生相应的改变。因此当 LG-SLM 作为相位调制器件应用于光学系统中时,要在使用之前对 LG-SLM 的相位调制特性重新进行校准。

LG-SLM 的相位调制特性的测量方法已经得到很广泛的研究。传统的方法主要是干涉测量法。如双缝干涉测量法<sup>[8]</sup>,在 LG-SLM 上加载双缝图,在其中一条狭缝的一半加载一系列相位延迟量。另外一半不加载相位延迟。这样就可以看成是两组狭缝,通过测量两组狭缝干涉条纹之间的偏移量计算相位调制量,得到相位调制特性,这种方法的缺点是只能对狭缝处的相位调制特性进行测量,无法得到整个 LG-SLM 面上的相位调制特性。径向剪切干涉法<sup>[9]</sup>, LG-SLM 的一半相位延迟量 0,另外一半相位延迟量为可变值,通过径向剪切干涉原理测量两个部分的干涉条纹的偏移量来确定 LG-SLM 的相位调制特性。这种方法是一种共光路干涉法,所以对震动和环境要求较低,但是这种方法光路调整比较复杂,而且后期数据处理量很大。数字相移干涉仪<sup>[10,11]</sup>,一般采用 zygo 干涉仪进行测量。同径向剪切干涉法一样, LG-SLM 的一半相位延迟量为 0,另外一半相位延迟量为可变值,通过测量经过 LG-SLM 反射的光与 zygo 干涉仪参考平面形成的干涉条纹来测量 LG-SLM 的相位调制特性。这种方法光路简单,并且由于 zygo 干涉仪自身具有强大的数据处理能力,所以数据处理方便,精确度高。但是 zygo 干涉仪的光源是确定的,所以只能对某一特定波长处的相位调制特性进行测量。而且 zygo 干涉仪价格昂贵,对实验环境的要求也很高。提出了一种无需外加干涉测量装置,将 LG-SLM 作为二维相位衍射光栅来对它的相位调制特性进行测量标定的方法。这种方法对实验环境的要求比传统的干涉测量法降低了很多,且可以随意的确定光源的波长,实验设备简便易操作,降低仪器成本的同时可十分方便地对 LG-SLM 的相位调制特性进行测量和校准。

## 2 液晶空间光调制器的相位调制原理

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  $n_o$ 。根据液晶连续弹性体理论,液晶分子的自由能可表示为<sup>[12]</sup>

$$F = \frac{1}{2} \int_V \{ K_{11} (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + K_{22} [\mathbf{n} \cdot (\nabla \times \mathbf{n})]^2 + K_{33} [\nabla \cdot (\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n})]^2 - \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} \} dv, \quad (1)$$

式中  $K_{11}, K_{22}, K_{33}$  分别是液晶分子的展曲弹性常数、扭曲弹性常数和弯曲弹性常数,  $\mathbf{n}$  是液晶分子的指向矢,  $\mathbf{D}$  和  $\mathbf{E}$  分别是电位移矢量和电场强度。

相位型液晶空间光调制器的液晶盒为摩擦取向(强锚定)且液晶分子平行排列<sup>[13]</sup>,由此液晶分子自由能公式可写为<sup>[14]</sup>

$$F = \frac{1}{2} \int_0^d \left( K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta \right) \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 dz - \int_0^d \frac{D_z^2}{2 \epsilon_0 (\cos^2 \theta + \epsilon \sin^2 \theta)} dz, \quad (2)$$

式中  $\epsilon_0$  是真空介电常数,  $\epsilon, //$  分别是垂直和平行方向的介电常数,  $D_z$  是  $z$  方向的电位移矢量,  $d$  为液晶层厚度,  $\theta$  是液晶分子的倾角。

将(2)式的积分方程变成微分方程为

$$\left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 = \frac{K_{11} (1 + K \sin^2 \theta)}{G - \frac{D_z^2}{\epsilon_0 (1 + \sin^2 \theta)}}, \quad (3)$$

式中  $K = \frac{K_{33} - K_{11}}{K_{11}}, // = \frac{// - \epsilon_0}{\epsilon_0}$ ,

$G = \frac{D_z^2}{\epsilon_0 (1 + r \sin^2 \theta)}$ ,  $\theta_m$  是液晶分子的最大倾角。结合液晶盒上下层边界条件解方程(3)就可以得到在一定电压下液晶分子倾角的分布。

由于液晶具有晶体的双折射特性,因此可根据晶体的折射率椭球公式得到液晶盒内非常光的折射率分布<sup>[15]</sup>为

$$n_{\text{eff}}(z) = \left( \frac{n_o n_e}{n_o^2 \cos^2 z + n_e^2 \sin^2 z} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

式中  $z$  是液晶分子倾角。进而可得到液晶屏产生的相位延迟为

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d [n_{\text{eff}}(z) - n_o] dz, \quad (5)$$

由(3)式可知,液晶分子在电场的作用下发生偏转,即不同的电场对应于不同的液晶分子倾角。根据(4)式,液晶分子倾角的变化引起液晶有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的变化,进而引起光束在液晶中相位延迟量的变

化。因此,可以通过控制加在 LG-SLM 的电压来调制光束的相位。LG-SLM 的像素是可以单独控制的,每一个像素可以加载不同的电压,从而产生不同的相位调制量。为了方便控制,制造商将 LG-SLM 的驱动电压映射为计算机显示的灰度值,计算机输出的 0~255 的灰度信号与 LG-SLM 的驱动电路板中的电压值一一对应。由前面的讨论可知, LG-SLM 的相位调制量随着驱动电压的变化而变化,这样,计算机可以通过输出的灰度信号来控制 LG-SLM 的相位调制量。校准 LG-SLM 的相位调制特性就是重新建立计算机所发灰度信号与 LG-SLM 驱动电压之间的映射关系,即确定计算机灰度信号与相位调制量之间的对应关系。

根据以上讨论可知,当液晶层厚度  $d$ , 或者液晶材料折射率  $n_e$  发生改变时, LG-SLM 的相位调制特性也会发生改变。对于不同的 LG-SLM, 液晶盒厚度以及材料的  $n_e$  一般是不同的, 所以其相位调制特性也不同。即使对于同一个 LG-SLM, 由于液晶材料的色散, 对不同波长的光的相位调制特性也必然存在差异。所以在使用前对 LG-SLM 的相位调制特性进行校准是十分必要的。

### 3 测量原理

#### 3.1 棋盘型相位光栅衍射特性

根据傅里叶光学<sup>[16]</sup>可知: 当放在透镜前的二维相位光栅被相干光照明时, 透镜后焦面的光强度分布等于透镜前的相位光栅的傅里叶变换的平方。在 LG-SLM 上加载一个棋盘状的图形, 如图 1 所示, 其中白色的部分相位延迟量为 0, 黑色的部分相位延迟量为可变值。(实际上棋盘图并没有亮暗区别, 这里只是为了表示清楚用黑色表示有相位延迟的部分), 将 LG-SLM 放在透镜前, 被相干光照明, 此时

LG-SLM 相当于一个二维相位光栅, 这样在透镜后焦面处就得到了图 2 所示的衍射光斑的光强分布 (为了突出高级次衍射光斑, 将光强在对数尺度下显示)。

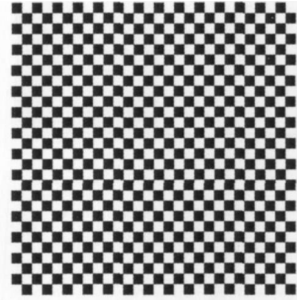


图 1 棋盘型相位光栅示意图

Fig. 1 Schematic of checkerboard phase grating

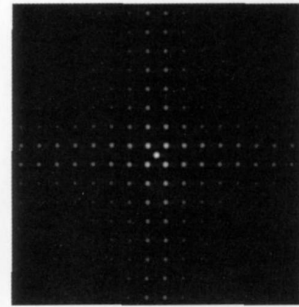


图 2 棋盘型相位光栅衍射光斑图

Fig. 2 Diffraction pattern of the checkerboard phase grating

改变棋盘型相位光栅的黑白方格的相位对比度 (相当于改变黑色格子的相位延迟量), 位于透镜后焦面的零级衍射光斑 (中心光点) 的光强也会随之发生改变。这样就可以通过测量透镜后的零级衍射光斑的光强得到 LG-SLM 上所加载的棋盘相位光栅的相位对比度。

一个单元棋盘格的相位可表示为

$$t_u(x, y) = \exp(i \phi) \left\{ \text{rect}\left[\frac{x+a/2}{a}\right] \text{rect}\left[\frac{y-b/2}{b}\right] + \text{rect}\left[\frac{x-a/2}{a}\right] \text{rect}\left[\frac{y+(b/2)}{b}\right] \right\} + \left\{ \text{rect}\left[\frac{x-a/2}{a}\right] \text{rect}\left[\frac{y-(b/2)}{b}\right] + \text{rect}\left[\frac{x+a/2}{a}\right] \text{rect}\left[\frac{y+(b/2)}{b}\right] \right\}, \quad (6)$$

如图 3 所示, 其中  $i$  为虚数单位;  $\phi$  为黑格的相位延迟量;  $a$  为棋盘格在  $x$  方向的长度;  $b$  为棋盘格在  $y$  方向的长度。

那么整个棋盘格相位光栅可以表示为

$$t_m(x, y) = t_u \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \delta(x - x_m) \delta(y - y_n), \quad (7)$$

式中  $\otimes$  为卷积符号,  $m$  是  $n$  第  $(m, n)$  个棋盘单元的中心坐标。  $\delta$  为狄拉克函数。

在透镜前焦面的二维光栅相位分布如 (7) 式所示, 那么在透镜后的光强分布为 (7) 式的傅里叶变换的模平方,  $\mathcal{F}$  为傅里叶变换运算符:

$$I(x_f, y_f) = |\mathcal{F}\{t_m\}|^2, \quad (8)$$

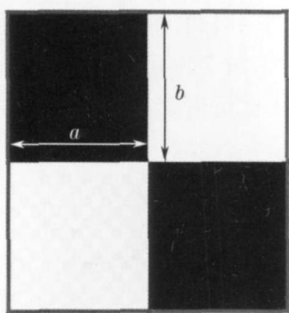


图 3 单元棋盘格示意图

Fig.3 Schematic of the checkerboard unit

根据(8)式模拟得到零级衍射光斑的光强与棋盘相位光栅的对比度之间的关系为

$$I = (1 + \cos \Delta\Psi) / 2, \quad (9)$$

式中  $I$  为零级衍射光斑归一化的强度。为棋盘相位光栅的相位对比度, 如图 4 所示。

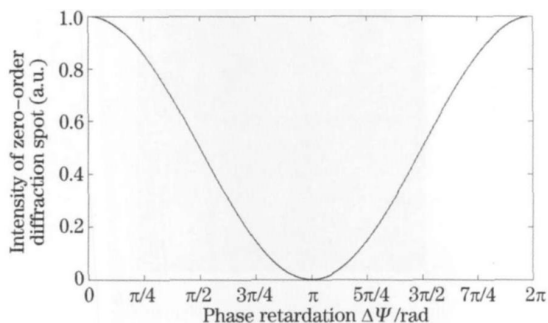


图 4 相位延迟量与零级衍射光斑光强的关系曲线

Fig.4 Relation between phase retardation and intensity of zero-order diffraction spot

由以上讨论可知, 通过测量透镜后焦面的零级衍射光斑的光强, 可以得到位于透镜前的棋盘型相位光栅的相位对比度。继而就能得到棋盘相位光栅黑色格子表示的相位延迟量。在映射到所加灰度图的灰度级, 就可以得到相位延迟量与计算机灰度级之间的对应关系, 也就求得 LG-SLM 的相位调制特性。由于这种方法是在 LG-SLM 上加载一个相位光栅, 通过相位光栅的衍射特性来确定相位调制特性, 因此我们称这个方法为 Mask 相位法。

### 3.2 Mask 相位法实验装置

Mask 相位法的实验装置如图 5 所示。所采用的 LG-SLM 是美国 BNS 公司的反射式 512 pixel 512 pixel 的纯相位液晶空间光调制器。出厂时的校准波长为 532 nm, 如果用于波长为 561 nm 的激光调制, 所以需要器件在波长 561 nm 处的相位调制特性进行校准。

波长为 561 nm 的激光耦合进光纤, 经光纤出

射由准直透镜(collimator)准直, 进入偏振分光棱镜(PBS), 被分成两束偏振方向互相垂直的线偏振光。其中透射光束的偏振方向与 LG-SLM 的液晶分子排列方向平行, 即透射光偏振方向与 LG-SLM 所调制光的偏振方向相同。透射光束经过分光棱镜(BS1)入射到 LG-SLM 上, 经过调制后反射出来, 再经过分光棱镜 BS1, BS2 和透镜 L1(焦距为  $f$ ) 聚焦在 CCD 上。由 PBS 反射的光束是为了消除由于激光的光强抖动带来测量误差而引入的参考光, 它经过反射镜(M1)反射后以小角度斜入射经过棱镜 BS2, 再通过 L1 聚焦在 CCD 上。

通过计算机给 LG-SLM 加载一个棋盘型的灰度图, 每个格子的大小为 18 pixel 18 pixel。其中白色方格的灰度级为 255(为了加快液晶分子的响应速度, 使用电压较高的部分), 黑色方格的灰度级为可变值。此时 LG-SLM 相当于一个可变的二维相位光栅。被激光照明之后在 CCD 中得到图 6 所示的图像。左边是棋盘相位光栅的衍射光斑, 右边是参考光斑。采集到图像之后, 用零级衍射光斑的光强除以参考光斑的光强, 将得到的结果作为测得的零级衍射光斑的相对光强值, 这样就消除了由于激光光强抖动带来的误差。

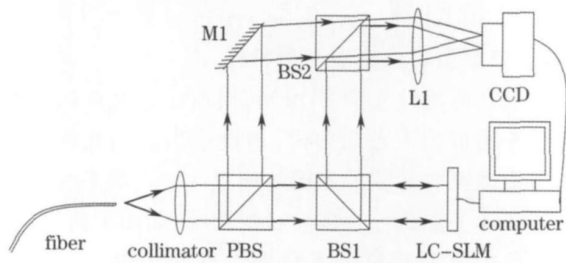


图 5 Mask 相位法实验装置光路图

Fig.5 Optical path of Mask-phase method

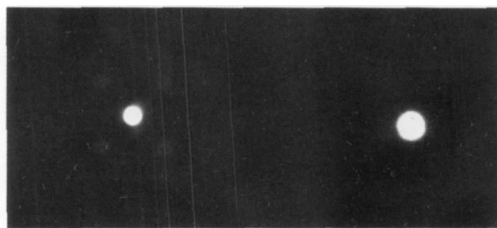


图 6 CCD 采集得到的衍射光斑与参考光斑图

Fig.6 Diffraction pattern and the reference spot on the CCD

CCD 相机的理论位置应在透镜 L1 的后焦面上, 此时 CCD 上的衍射光斑的光强分布为加载在 LG-SLM 上的棋盘相位光栅的傅里叶变换。在实际光路调整过程中, 前后移动 CCD 相机, 实时采集并

观察衍射光斑的变化,当相机前后偏离 L1 焦面时,光斑逐渐弥散,直径变大,最后将相机置于光斑能量最集中的位置。由于是通过人眼观察,这种调整相机位置的方式不可避免的存在误差,相机总会相对于 L1 的后焦面有一定的偏移量这样相机上的衍射光斑的光强分布就不再是棋盘型相位光栅严格的傅里叶变换了。下面分析相机定位误差对测量结果的影响。

根据菲涅耳衍射原理,模拟了当相机偏离 L1 焦面时衍射光斑的光强分布,如图 7 所示,图 7(a) 是当 CCD 相机位于透镜后焦面时衍射光斑的光强分布;(b) 和 (c) 分别为 CCD 相机偏离 L1 的焦面  $1\%f$  距离时衍射光斑的光强分布;(d) 和 (e) 分别为 CCD 相机相对于 L1 的焦面偏离了  $2\%f$  距离时衍射光斑的光强分布。从图中可以看出,当 CCD 相机偏离 L1 焦面  $2\%f$  距离时,衍射光斑明显变大,零级衍射光斑的半峰全宽(FWHM) 扩大了 125%,所以采用人眼观察相机采集的光斑聚焦状态来定相位机的方法,完全可以将相机的位置误差控制在  $2\%f$  距离以内。进一步我们利用数值模拟的方法,计算了当 CCD 相机偏离透镜后焦面  $2\%f$  距离

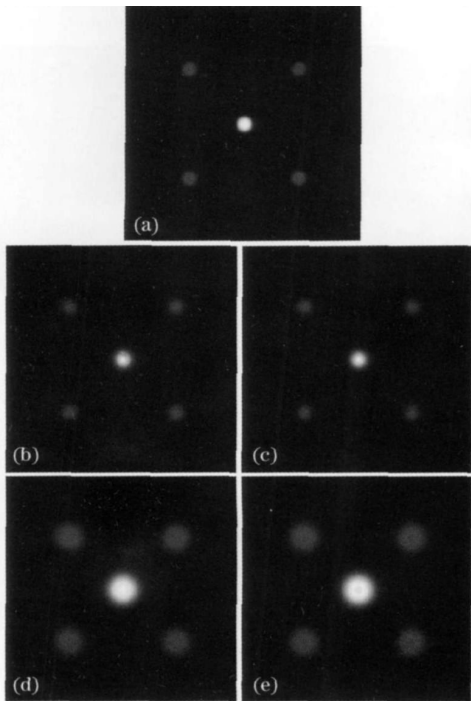


图 7 衍射光斑图。(a) 相机位于透镜后焦面,相机偏离透镜后焦面 (b) 1%, (c) - 1%, (d) 2%, (e) - 2%

Fig. 7 Diffraction spot. (a) CCD on the rear focal plane of L1, CCD deviates from the rear focal plane of L1 is (b) 1%, (c) - 1%, (d) 2%, (e) - 2%

时,零级衍射光斑的相对光强与相位延迟量的关系曲线。如图 8 所示,方块横线代表相机位于透镜后焦面时的相位延迟量与零级衍射光斑光强的关系曲线,五角星和圆形分别代表当相机偏离透镜后焦面  $2\%f$  距离时的相位延迟量与零级衍射光斑光强的关系曲线。可见当相机偏离透镜后焦面  $2\%f$  距离时,零级衍射光斑的相对光强与相机位置 0 偏差时完全重合,对实验结果没有影响。

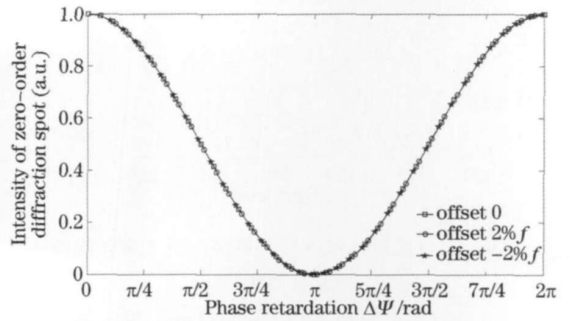


图 8 相位延迟量与零级衍射光斑光强的关系曲线  
Fig. 8 Relation between phase retardation and intensity of zero-order diffraction spot

#### 4 实验结果分析

通过测量可知,在 120~ 255 灰度级范围内, LG-SLM 可以实现 0~ 2 的相位调制。给 LG-SLM 发送棋盘相位光栅,从 120~ 255 逐级改变有相位延迟部分的灰度级,得到了灰度级与零级衍射光斑强度(相对)之间的关系,如图 9 所示。从图中可以看出,光强在灰度级高的部分会比灰度级低的部分要强一些,主要是由于在实际的器件中,不同相位延迟量的情况下反射率会略有不同,在灰度级高的部分,反射率较高造成的。

利用最小二乘法对测得的实验数据进行样条拟合,修正个别奇异值;考虑到理想条件下 V 字形两

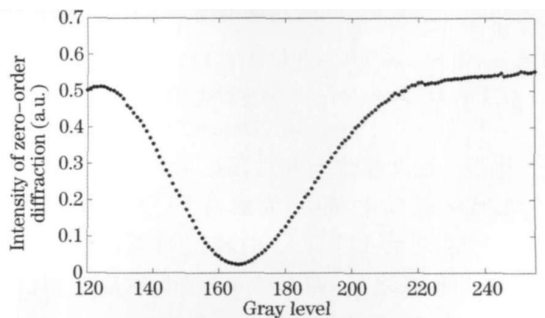


图 9 灰度级与零级衍射光斑光强的对应关系  
Fig. 9 Relation between gray level and the intensity of zero-order diffraction spot

侧光强最大值是一致的,而且相位校准主要利用零级衍射光强的相对变化关系,因此以最低点为界,对 V 字形两侧数据进行归一化处理,得到在灰度级 120~ 255 范围内零级衍射光斑光强与灰度级的关系曲线,如图 10 所示。

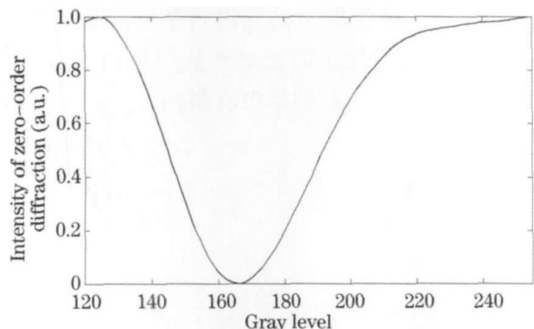


图 10 拟合之后的灰度级与零级衍射光斑光强的关系曲线

Fig. 10 Relation between gray level and the intensity of zero-order diffraction spot after fitted

根据图 10 找到每一个灰度级所对应的零级衍射光斑的光强值,再由 3.1 节得到的零级衍射光斑光强与棋盘相位光栅的相位对比度之间的关系式(9)式计算得到该光强值所对应的相位延迟量。将每一个灰度级对应的相位延迟量都计算出来就得到了计算机灰度级与 LG-SLM 相位延迟量之间的关系曲线,如图 11 所示。

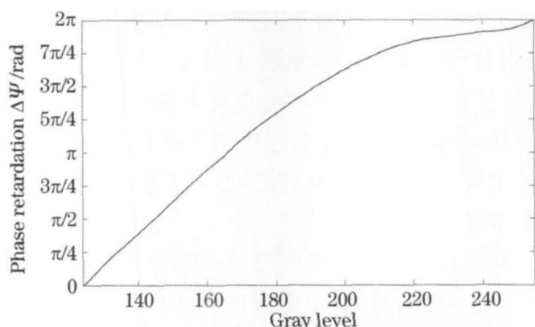


图 11 灰度级与相位延迟量的关系曲线

Fig. 11 Relation between gray level and the phase retardation

将得到的灰度级与相位延迟量的关系曲线输入 LG-SLM 的驱动电路中,完成对 LG-SLM 的校准。然后对校准之后 LG-SLM 的相位调制特性进行了检验,并与校准之前(即 532 nm 波长对应的相位调制特性曲线)的调制效果进行了对比。

图 12 是给 LG-SLM 加载的 4 个波长的离焦图,此时对光斑调制 4 个波长的离焦。图 13(a)是校准之前的调制效果,中心的亮斑是残余的光纤端

面影像。图 13(b)图是校准之后的调制效果。图 14 是光斑被调制之后的光强轮廓图。其中点虚线表示校准之前调制效果,实线表示校准之后的调制效果。横虚线表示理论计算的调制效果。以校准前后光斑光强值与理论值之间的偏离程度来判断调制效果的优劣。光强度的偏离程度可表示为

$$R = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - E_i)^2 \right]^{1/2}, \quad (10)$$

式中  $E_i$  是理论计算得到的调制后光斑在每个采样点的光强值,  $I_i$  是测得的实际光斑在每个采样点的光强值,  $N$  是采样点数。将校准前后 LG-SLM 调制的光斑强度分别代入(10)式计算得到:校准之前

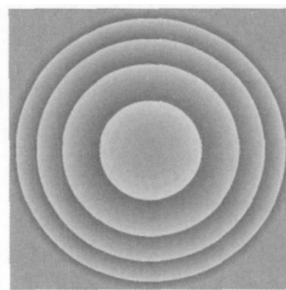


图 12 4 离焦灰度图

Fig. 12 Gray image of 4 defocus

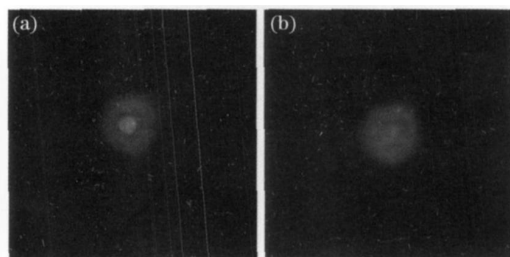


图 13 光斑经 4 离焦调制后的效果对比。

(a) 校准前, (b) 校准后

Fig. 13 Effect comparison after the spot modulated by 4 defocus. (a) before calibration, (b) after calibration

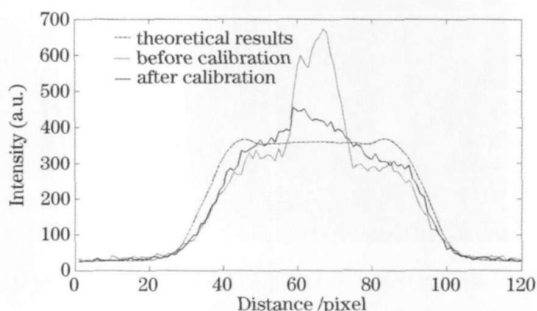


图 14 校准前后经 4 离焦调制后光斑轮廓图

Fig. 14 Profiles of spot modulated by 4 defocus before and after calibration

$R=110.4$ , 校准之后  $R=45.7$ 。由此可以很明显地看出, 在相位调制特性校准之后, 调制的光斑强度分布更接近于理论值, 调制效果有了明显的改善。

图 15 是给 LG-SLM 加载 10 个波长的倾斜图, 此时 LG-SLM 相当于一个闪耀光栅, 主要功能是将光能调制到一级衍射光斑处。图 16(a) 是校准之前的调制效果, 图 16(b) 是校准之后的调制效果, 图 17 是两个光斑的强度轮廓的对比(为了突出零级衍射光斑的和二级衍射光斑的强度对比, 将一级衍射光斑截断), 虚线是校准之前的调制效果, 实线是校准之后的调制效果, 在校准之前 1 级衍射光斑的强度占总光强的 89.8%, 校准之后 1 级衍射光斑光强占

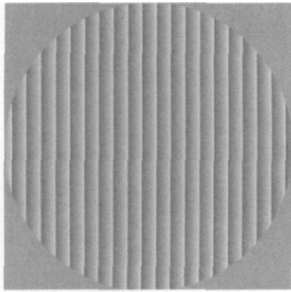


图 15 10 倾斜灰度图

Fig. 15 Gray image of 10 tilt

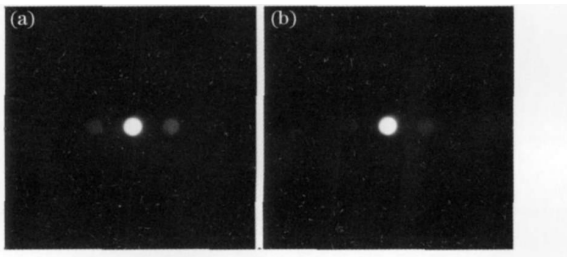


图 16 校准前后 10 倾斜调制的效果对比。

(a) 校准前, (b) 校准后

Fig. 16 Effect comparison after the spot modulated by 10 tilt. (a) before calibration, (b) after calibration

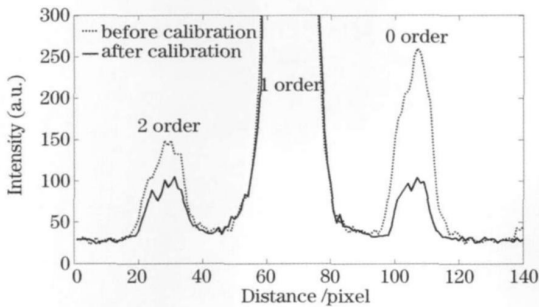


图 17 校准前后经 10 倾斜调制后光斑轮廓图

Fig. 17 Profiles of spot modulated by 10 tilt before and after calibration

总光强的 95.0%, 校准后第 0 级和第 2 级次的衍射光强分别减小到之前的 32.3% 和 64.1%。同样可以很明显地看出, 校准之后的光能比之前更加集中地分布在 1 级衍射光斑处, 调制效果更好。

## 5 结 论

LG-SLM 作为相位调制器件应用于光学系统中时, 由于液晶分子的折射率与  $n$  值会随着波长的不同而变化, 所以其相位调制特性要随着系统波长的变化进行修正。本文提出利用 Mask 相位法对出厂标定波长为 532 nm 的 LG-SLM 在 561 nm 处的相位调制特性进行了校准。该方法以傅里叶光学为理论基础, 首先计算得出棋盘型二维相位光栅相位对比度与零级衍射光斑光强之间的对应关系, 然后给 LG-SLM 发送一系列不同灰度级的棋盘图并测量所发灰度图对应的零级衍射光斑光强值。根据前面两组结果, 得到相位延迟量与计算机灰度级之间的对应关系, 从而得到 LG-SLM 在 561 nm 处的相位调制特性曲线。与前人提到的干涉测量法相比, 这种方法不仅降低了实验装置的成本和对实验环境的要求, 而且操作更加简单便捷。实验结果表明, 利用 Mask 相位法校准之后, 调制效果得到明显改进。因此 Mask 相位法对于校准 LG-SLM 在不同波长下的相位调制特性是一个简单有效的新方法。

## 参 考 文 献

- 1 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, 徐克瑞. 反射型 LCOS 器件纯相位调制特性研究[J]. *物理学报*, 2003, **52**(10): 2481~2485
- 2 Chen Huaixin, Wei Honggang, Chen Zhenpei *et al.*. A controllable array Fresnel zone plates using liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(5): 562~566
- 陈怀新, 魏宏刚, 陈祯培等. 采用液晶空间光调制器的可控性阵列菲涅耳波带片[J]. *光子学报*, 2001, **30**(5): 562~566
- 3 D. C. O'Brien, G. E. Faulkner, T. D. Wilkinson *et al.*. Design and analysis of an adaptive board-to-board dynamic holographic interconnect[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(16): 3297~3305
- 4 Ye Biqing, Kiyofumi Matsuda, Norihiro Fukuchi *et al.*. Vibration measurement of rough surfaces using a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 557~561
- 叶必卿, 松田清史, 福智央夫等. 在粗糙表面上用液晶空间光调制器进行振动测量[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 557~561
- 5 C. Li, M. L. Xia, Q. Mu *et al.*. High-precision open-loop adaptive optics system based on LG-SLM[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(13): 10774~10781
- 6 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
- 7 Cao Zhaoliang, Mu Quanquan, Hu Lifa *et al.*. Design on liquid crystal adaptive optical system for 600 mm telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1147~ 1150
- 曹召良, 穆全全, 胡立发 等. 600 mm 望远镜液晶自适应系统成像光路设计[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1147~ 1150
- 8 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
- 9 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): 675~ 679
- 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): 675~ 679
- 10 Z. L. Cao, L. Xuan, L. F. Hu *et al.*. Investigation of optical testing with a phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(4): 1059~ 1065
- 11 Wang Zhihua, Yu Xin. Measuring of the phase modulation of liquid crystal spatial light modulator and correcting of the wavefront[J]. *Opt. 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
- 12 R. N. Thurston, D. W. Berreman. Equilibrium and stability of liquid-crystal configurations in an electric field[J]. *J. Appl. Phys.*, 1981, **52**(1): 508~ 509
- 13 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
- 14 X. Wang, D. Wilson, R. Muller *et al.*. Liquid-crystal blazed-grating beam deflector[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(35): 6545~ 6555
- 15 T. S. Tuen. Polarization Optics of Liquid Crystal and Its Applications[D]. Hongkong: Hongkong University of Science and Technology, 2001. 26
- 16 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics[M]. Third Edition. Qing Kecheng *et al.*. Trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 88~ 97
- 约瑟夫 古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚 等译. 北京: 电子工业出版社, 2006. 88~ 97