

## 空间光调制器振幅和相位调制特性的实验研究

闫赛<sup>1</sup>, 武秀<sup>1</sup>, 王春云<sup>1</sup>, 秦宏利<sup>1</sup>, 元晋鹏<sup>1,2</sup>, 汪丽蓉<sup>1,2†</sup>

(1. 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学激光光谱研究所,  
物理电子工程学院, 山西 太原 030006; 2. 极端光学协同创新中心, 山西大学, 太原 030006)

**摘要:** 本文实验研究了德国 Holoeye Photonics AG 公司生产的反射型电寻址液晶空间光调制器 LC-R1080 的振幅和相位调制特性。在传统的振幅调制测量方法中引入最佳起偏角的测定, 利用直接测量法获得了该空间光调制器精确的振幅调制特性曲线。采用双缝干涉法对空间光调制器的相位调制特性进行了测量, 有效地克服了泰曼-格林干涉等方法受环境因素影响较大的缺点。通过改变加载到空间光调制器图像的灰度值, 获取其相位延迟与灰度值的非线性关系。这些研究对基于液晶空间光调制器的光信息处理、自适应光学等研究奠定了良好的实验基础。

**关键词:** 空间光调制器; 振幅特性; 相位特性

**中图分类号:** O431

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-6654(2018)01-0107-06

### 0 引言

液晶空间光调制器 (Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LCSLM) 以液晶阵列作为构成单元, 是一种利用液晶的电控双折射效应将信息加载于光学数据场的光电器件, 能对光波的振幅、相位、偏振等特性的一维或二维分布进行空间和时间的变换和调制<sup>[1]</sup>。因其衍射效率高、响应速度快、空间分辨高、可实时控制等优点, 是光镊技术<sup>[2]</sup>、飞秒脉冲整形<sup>[3]</sup>、激光显示<sup>[4]</sup>等前沿研究中的关键设备。目前, 许多生产空间光调制器的厂商未提供系统的相位和振幅调制特性参数, 有些厂家提供的预设参数与实际情况不完全匹配, 此外液晶分子的调制特性存在较强的波长依赖性, 因此需要精确地评价空间光调制器的相关性能, 校正厂家预设的某些特性参数, 以达到实验研究的特殊需求。

对于液晶空间光调制器, 一般是通过测量不同调制电压下调制幅度的大小来研究振幅调制特性。通常用于测量实时调制光信号的有电荷耦合元件 (Charge-coupled Device, CCD), 光电二极管, 光强功率计等手段。文献 5 中<sup>[5]</sup>使用 CCD 对透射型液晶空间光调制器的振幅调制特性进行了研究。文献 6 中<sup>[6]</sup>使用光强功率计方法对透射型液晶空间光调制器的振幅调制特性进行了研究。然而, CCD 接收光强时会有自动调节功能, 引入不可估量的误差, 且探测波长范围受限。光强功率计灵敏度较高, 因环境因素影响导致测量误差较大。因此, 我们采用光电二极管对光信号进行测量, 在保证测量灵敏度的同时可以有效解决环境因素的影响, 克服探测范围较小的局限。

对于液晶空间光调制器相位调制特性的研究, 常用的测量方法有衍射法和干涉法。衍射法受机械振动和空气

收稿日期: 2017-11-08; 接受日期: 2017-11-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2017YFA0304203); 国家自然科学基金 (批准号: 61378049; 61575116; 61705122; 61728502; 91736209; 11434007); 教育部长江学者和创新团队发展计划 (批准号: IRT13076); 山西省应用基础研究计划 (批准号: 201701D221004); 山西省青年三晋学者项目; 山西省高等学校大学生创新创业训练计划项目; 山西省“1331 工程”重点学科建设计划经费

作者简介: 闫赛 (1997-), 男, 山西襄汾人, 本科生, E-mail: 839414873@qq.com

† 通信作者: 汪丽蓉, E-mail: wlr@sxu.edu.cn

湍流等环境因素影响较小,但相位测量的运算较为复杂,因而一般不采用衍射法<sup>[7][8]</sup>。干涉法主要包括剪切干涉法、双缝干涉法、功率计探测法和泰曼-格林干涉法。文献<sup>[9]</sup>中使用横向剪切干涉法对透射型液晶空间光调制器的相位调制特性进行了研究,所得的干涉条纹无法直接反映波面形状,需要进行复杂的数据分析<sup>[9]</sup>;功率计探测法实测中很难做到严格的平行光干涉,很容易出现各点光强不一致的问题,从而影响测量结果的精度<sup>[10]</sup>。泰曼-格林干涉法被广泛地应用于液晶空间光调制器的相位调制测量中,但是在实际测量中该方法存在不可避免的一些缺陷:对环境要求过高,干涉条纹的获得需要较为精细的光路调节,从 CCD 获得的干涉条纹的处理较为繁杂<sup>[11]</sup>。而双缝干涉法因光路调节便捷、测量过程受环境影响小、测量结果方便处理被认为是测量液晶空间光调制器的相位调制特性的一个较好选择<sup>[12]</sup>。

本文以德国 Holoeye Photonics AG 公司生产的反射型电寻址液晶空间光调制器 LC-R 1080 为研究对象。首先实验上对空间光调制器入射光的最佳偏振角进行了细致标定,在此基础上使用直接测量法对振幅调制特性进行了研究,得到了振幅调制特性曲线,并对结果进行了定性分析。分别使用改进的泰曼-格林干涉法和双缝干涉法对空间光调制器的相位调制特性进行了测量,获得了相位调制特性曲线,并对两者的结果进行了比较和分析。该研究对基于液晶空间光调制器的光学应用具有重要的意义。

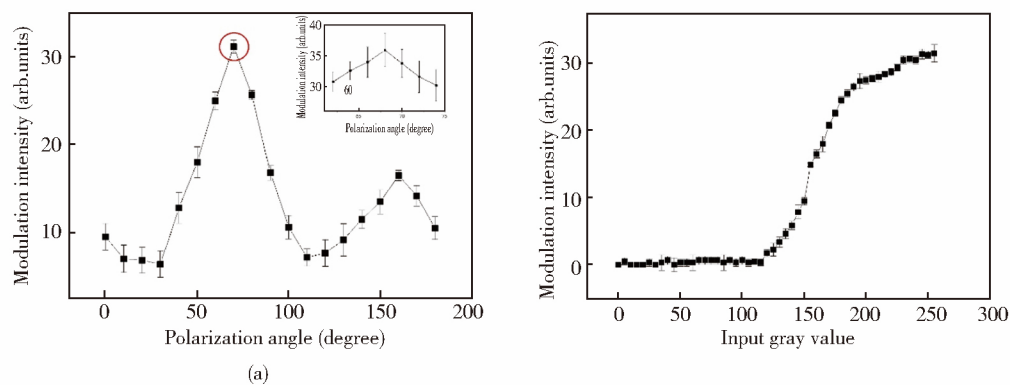


Fig. 1 (a) Modulation intensities for different polarization angles, the insert figure is detailed information about the area shown in red circle, (b) Spatial light modulator amplitude modulation characteristic curve, the data point is the average of three measurements, the error is the root mean square error of the three measurements, the solid line is the connection of experimental data

图 1 (a)不同入射偏振角度对应的调制强度,插图为红色圆圈所示区域的详细测量,(b)空间光调制器振幅调制特性曲线,数据点为三次测量的平均值,误差为三次测量的均方根误差,实线为实验数据点的连线

在一个确定的偏振激光入射下,液晶空间光调制器

## 1 实验测量及结果分析

实验中使用的反射型液晶空间光调制器是振幅和相位耦合调制。当入射光偏振方向与液晶分子中心截面长轴平行时,液晶对光束为纯相位调制;当入射光偏振方向与中心截面短轴一致时,液晶对光束无相位调制;当入射光偏振方向介于二者之间,液晶分子对光束既有相位调制又有振幅调制;当入射光偏振方向和长轴成 45 度角时,液晶对入射光的振幅调制最大<sup>[13]</sup>。

### 1.1 振幅调制特性研究

随着液晶分子的扭曲和液晶对传播光波的波导作用,入射激光的偏振方向将随着液晶分子的扭曲而旋转<sup>[14]</sup>。在实验中,通过调整光的偏振方向,可以使它处于振幅调制最大模式,即它的振幅调制随控制电压单调变化最大。因此,首先需要寻找合适的起偏角,使得入射光偏振方向和长轴成 45 度角,空间光调制器工作在振幅调制最大模式。

实验中,外腔半导体激光器(DL100, Toptica)输出的 684.5 nm 的线偏振激光经扩束系统,从而使得入射光腰斑与空间光调制器匹配。然后通过一个二分之一偏振片,获得可调偏振的线偏光经由 LCSLM 进行振幅调制后,通过一个透镜将调制后激光汇聚,使用光阑进行空间滤波,最终使用光电二极管进行探测,并将得到的电信号记录分析。

加载灰度值为零和 255 的灰度图对应调制电压差为该偏

振角度的调制强度。以二分之一波片的 10 度为间隔,测量得到不同入射偏振光情况下空间光调制器的调制强度,如图 1(a)所示。图中点为三次测量的平均值,误差为三次测量的均方根误差,实线是实验数据点的连线。从图中可以看出,偏振角度在 60—80 度之间时振幅调制特性较佳,如图中红色圆圈所示。为了更加精细地确定偏振角度,以 2 度为间隔在目标区域内对液晶空间光调制器的调制特性进行测量,如图 1(a)插图所示,最佳偏振角度为 68 度。

实验中将偏振角度固定为 68 度,采用 5 灰度值为间隔的灰度图加载在 LCSLM 上,记录每个灰度值下的调制强度,如图 1(b)所示。图中点为三次测量的平均值,误差为三次测量的均方根误差,实线是实验测量点的连线。从调制特性曲线可以清晰地观测到液晶空间光调制器振幅调制的阈值效应,这与文献 9,文献 15 的测量结果类似<sup>[9,15]</sup>。该液晶空间光调制器的振幅调制阈值电压对应的灰度值在 115 附近。灰度值在 0—115 之间基本无振幅调制,这是由于空间光调制器的主要成分为液晶分子,存在 Fredericks 转变的原因<sup>[16]</sup>。

外电场达到某一强度时液晶分子产生取向变化,引发这一转变的临界电场为  $E_c$ :

$$E_c = \frac{\pi}{d} \sqrt{\frac{K_{ii}}{|\Delta\epsilon|}} \quad (1)$$

其中,  $K_{ii}$  是弹性常数,  $\Delta\epsilon$  为介电各向异性参数,为长轴方向的介电常数  $\epsilon_1$  和短轴方向的介电常数  $\epsilon_2$  之差。可以得到所需施加的外电压,即阈值电压  $V_c$ :

$$V_c = E_c d = \pi \sqrt{\frac{K_{ii}}{|\Delta\epsilon|}} \quad (2)$$

当沿光轴  $z$  方向施加电场且调制电压  $V_i$  超过阈值电压  $V_c$  时,液晶分子取向在电场的作用下产生相对  $x-y$  平面的倾斜,并对应与光轴  $z$  的夹角  $\theta$  改变。夹角  $\theta$  与调制电压  $V_i$  满足如下关系:

$$\theta = \begin{cases} 0, (V_i \leq V_c) \\ \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left[ \exp \left( -\frac{V_i V_c}{V_0} \right) \right], (V_i > V_c) \end{cases} \quad (3)$$

其中  $V_0$  为调制电压的额定电压,可见不同的电场使液晶分子偏转角度不同。当电场达到临界电场  $E_c$  时,液晶分子产生取向变化,进而表现为当调制电压达到阈值电压  $V_c$  时,空间光调制器产生调制。灰度值为 115—190 之间振幅调制随灰度值基本上呈线性变化,190—255 振幅调制变弱。因此,可利用 115—190 灰度变化区间对光强进行较大的调制。

## 1.2 相位调制特性研究

传统的泰曼—格林干涉法对环境要求过高,且干涉

条纹的获得需要较为精细的光路调节。本文使用改进的泰曼—格林干涉法对液晶空间光调制器的相位调制特性进行测量<sup>[17]</sup>。相对于传统的泰曼—格林干涉法引入了一组额外的透镜,这组透镜安装在二维调节架上,因此可以通过在镜面前动态地调整透镜的倾斜角度来精确地调整光程差,且可以方便地通过调节透镜的倾斜角度,在实际使用中干涉条纹的亮度和相对位置优化。

实验中,把多张灰度图依次加载到空间光调制器上,每张灰度图由 2 个灰度等级组成,左半部分灰度固定为零,右半部分灰度值从零到 255,以 5 为间隔变化。一张灰度图中两种不同的灰度代表着不同的电压信号,因此会产生不同的相位调制,相位差可以通过干涉条纹的移动量进行测量。

采用 MATLAB 软件处理干涉条纹位错图,得到不同灰度值下的相位差。设  $L$  为干涉条纹的周期,  $\Delta x$  为干涉条纹相对初始位置的移动量,根据

$$\phi = 2\pi \frac{\Delta x}{L} \quad (4)$$

得到不同灰度值下的相位延迟量  $\phi$ 。图 4(a) 为实验测得的不同灰度值与相移量之间的关系曲线。图中点为三次测量的平均值,误差为三次测量的均方根误差,实线为实验结果的连线。

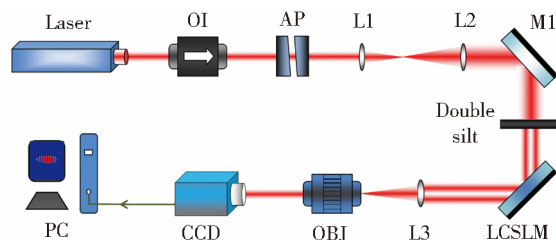


Fig. 2 The experimental setup for measuring phase modulation characteristic by double-slit interference method. OI: optical isolator, AP: anamorphic prism pairs, L: lens, M: mirror, HWP: half wave plate, LCSLM: liquid crystal spatial light modulator, OBJ: objective lens, CCD: charge-coupled device

图 2 双缝干涉法测量相位调制特性实验装置图。  
OI:隔离器,AP:整形棱镜对,L:透镜,M:反射镜,  
HWP:半波片,LCSLM:液晶空间  
光调制器,OBJ:物镜,CCD:电荷耦合元件

在测量中我们发现此方法能够测量波面整体相位,并且方便获得波面形状,但是该方法受外界环境影响较强,条纹抖动较大。因此,我们采用对环境要求较低的双缝干涉法测量相位调制特性曲线,实验装置如图 2 所示。激光经过隔离器、整形棱镜对、扩束系统获得较好的匹配光斑,经平面镜反射后通过二分之一波片获得线偏光,然

后经过双缝将光分成两束,两束光同时入射到空间光调制器上两个灰度不同的区域,获得的不同相位延迟的两

束激光干涉,经显微物镜放大被 CCD 成像记录。

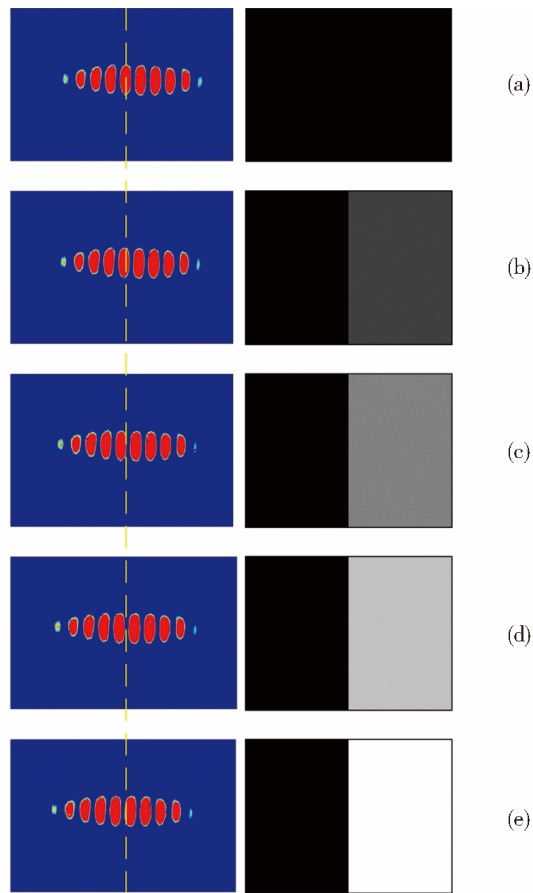


Fig. 3 Interference fringes with different gray levels, (a)–(e) experimental results and images loaded into the spatial light modulator for grayscale of 0, 65, 130, 195, 255

图3 不同灰度输入下的干涉条纹, (a)–(e)依次为灰度 0, 65, 130, 195, 255 时的灰度图和实验结果图

如图 3 右侧所示,将 5 张灰度图依次加载到空间光调制器上,每张灰度图由 2 个灰度等级组成,左半部分灰度值固定为零,右半部分灰度值分别为 0, 65, 130, 195, 255。将入射到灰度值为零区域的激光的相位延迟作为参考组,另一束激光的相位延迟作为测量组。这两束激光的干涉条纹如图 3 左侧所示,从图中我们可以清晰地看到干涉条纹的移动,条纹的移动量对应于相位调制特性的变化。用 MATLAB 软件得到图片中条纹相对于零灰度时的条纹的移动量  $\Delta x$ ,同时得到条纹间距  $L$ 。由公式(1)计算出相位调制量  $\phi$ 。使用双缝干涉法测量得到的不同灰度值下的相位调制曲线如图 4(b)所示。

对两种测量空间光调制器的相位调制特性的结果进行对比:泰曼-格林干涉方法测得相位最大调制量为  $1.17\pi$ ,双缝干涉法为  $1.10\pi$ ,两者的调制结果较为吻合。在灰度 110–190 之间相位调制较为明显且近似为线性变化,灰度值大于 200 调制基本稳定。但是,双缝干涉法

的数据误差明显较小,这使得我们可以获得了更加精确

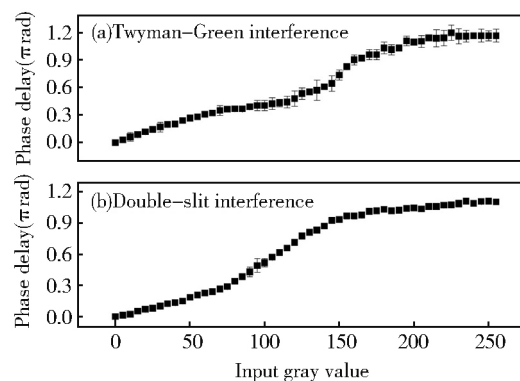


Fig. 4 The phase modulation characteristic curve of the spatial light modulator measured by the Twyman-Green interference method (a) and the double-slit interference method (b)

图4 泰曼-格林干涉法(a)和双缝干涉法(b)测量得到的空间光调制器相位调制特性曲线

的空间光调制器的相位调制特性。

## 2 结论

本文以德国 Holoeye Photonics AG 公司生产的反射型电寻址液晶空间光调制器 LC-R 1080 为研究对象。首先对空间光调制器入射光的最佳偏振进行测量,针对之前研究者在测定最佳起偏角只做一次光强透过率实验的弊端,使用了两次测量取差值的方法,得到更加准确的结果。在此基础上使用直接测量法对振幅调制特性进行了研究,得到了振幅调制特性曲线,并对结果进行了理论分析。振幅调制特性的测量使用了光电二极管探测器进行

测量,在保证测量灵敏度的同时可以有效解决环境因素的影响,克服探测范围较小的局限。使用改进的泰曼—格林干涉法对空间光调制器的相位调制特性进行了测量。改进的方法克服了传统方法光路调节复杂,清晰的干涉条纹获得较为困难的缺陷。使用双缝干涉法对空间光调制器的相位调制特性进行了测量,相比于泰曼—格林干涉法,该方法的实验误差明显减小。该研究提供了精确测量 SLM 振幅和相位调制特性的方法,可以明确 SLM 可能的适用范围和限制因素,为 SLM 应用于飞秒脉冲整形、自适应光学等相关领域奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] Efron U. Spatial Light Modulator Technology: Materials, Devices, and Applications[M]. CRC Press, 1994.
- [2] Grier D G. A Revolution in Optical Manipulation[J]. *Nature*, 2003, **424**: 810-816. DOI: 10. 1038/nature01935.
- [3] Weiner A M. Femtosecond Pulse Shaping Using Spatial Light Modulators[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, **71**(5): 1929-1960. DOI: 10. 1063/1. 1150614.
- [4] Hayasakia Y, Sugimoto T, Takita A, Nishida N. Variable Holographic Femtosecond Laser Processing by Use of a Spatial Light Modulator[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(3): 031101. DOI: 10. 1063/1. 1992668.
- [5] Ge A M, Sui Z, Su J H. Research on Characteristics of Amplitude Modulation of a Reflective Liquid Crystal on Silicon Device [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2005, **32**(3): 0346-0350.
- [6] Liu J. The twist nematic Liquid Crystal Phase-only Spatial Light Modulator[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008: 38-45.
- [7] Xun X D, Cohn R W. Phase Calibration of Spatially Nonuniform Spatial Light Modulators[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(35): 6400-6406. DOI: 10. 1364/AO. 43006400.
- [8] Mendoza-Yero O, Mínguez-Vega G, Martínez-León L, Carbonell-Leal M, Fernández-Alonso M. Alonso, Doñate-Buendía C, Pérez-Vizcaino J, Lancis J. Diffraction-based Phase Calibration of Spatial Light Modulator with Binary Phase Fresnel Lenses[J]. *Journal of Display Technology*, 2016, **12**(10): 1027-1032.
- [9] Liu C N, Huang Z H, Xiao G H. Measuring the Modulation Property of Liquid Crystal Spatial Light Modulator[J]. *Physics Experiment*, 2009, **29**(7): 4-8.
- [10] Xu Z B. Study on properties of phase-only Liquid Crystal Spatial Light Modulator and Application on Diffractive Micro-elements[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2009: 15-16.
- [11] Dou R S, Giles M K. Phase Measurement and Compensation of a Wave Front Using a Twisted Nematic Liquid-crystal Television[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(19): 3647-3652. DOI: 10. 1364/AO. 35. 003647.
- [12] Agour M, Kolenovic E, Falldorf C, Kopylow C V. Suppression of Higher Diffraction Orders and Intensity Improvement of Optically Reconstructed Holograms from a Spatial Light Modulator[J]. *Journal Optics A: Pure Applied Optics*, 2009, **11**: 105405. stacks. iop. org/JOptA/11/105405.
- [13] Cai D M, Xue B X, Ling N. Research on Phase Modulation Characteristics of Liquid Crystal Spatial Optical Modulator [J]. *Optoelectronic Component*, 2007, **34**(11): 19-23.
- [14] Konforti N, Marom E, Wu S. — T. Phase-only Modulation with Twisted Nematic Liquid-crystal Spatial Light Modulators[J]. *Optical. Letter*, 1988, **13**(3): 251-253. DOI: 10. 1364/OL. 13. 000251.
- [15] Fu Y. Measurement of Major Parameters of the Liquid Crystal Spatial Light Modulator[D]. Wuhan: Huazhong

*University of Science and Technology*, 2011: 5-24.

- [16] Collings P J, Hird M. Introduction to Liquid Crystals: Chemistry and Physics. Taylor & Francis Ltd, 1997. ISBN 0-7484-0643-3.
- [17] Wu Y L, Nie J S, Shao L. Method to Measure the Phase Modulation Characteristics of Liquid Crystal Spatial Light Modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017.

## Experimental Study on Amplitude and Phase Modulation Characteristics of Spatial Light Modulator

YAN Sai<sup>1</sup>, WU Xiu<sup>1</sup>, WANG Chun-yun<sup>1</sup>, QIN Hong-li<sup>1</sup>,  
YUAN Jin-peng<sup>1,2</sup>, WANG Li-rong<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of  
Laser Spectroscopy, College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University,  
Taiyuan 030006, China; 2. Collaborative Innovation Center of Extreme  
Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** The modulation characteristics of reflective electro-addressable liquid crystal spatial light modulator (LC-R 1080, Holoeye Photonics AG) were studied. With the traditional amplitude modulation measurement method, We introduced the measurement of optimal polarization angle. The accurate amplitude modulation characteristic curve of the spatial light modulator was obtained with direct measurement method. The phase modulation characteristics of the spatial light modulator were studied by the double-slit interference method, which effectively overcome the defect of the Twyman-Green interference method, which was greatly influenced by its environment. By changing the gray value of the image loaded into the spatial light modulator, the nonlinear relationship between the phase delay and the gray value was obtained. This work has laid a good experimental foundation for investigation of optical information processing and adaptive optics based on liquid crystal spatial light modulator.

**Key words:** spatial light modulator; amplitude characteristic; phase characteristic