

空间光调制器对入射光场调制特性的实验研究

周 琦^{1,2}, 陆俊发^{1,2}, 印建平^{2*}

(1. 东华理工大学 理学院, 江西 抚州 344000, E-mail: qizhou@ecit.cn;

2. 华东师范大学 物理系 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

摘 要: 提出了实验上在特定光路条件下测量液晶空间光调制器的偏振调制特性的原理与方法, 探索了定标液晶空间光调制器对入射偏振光分别进行相位调制与振幅调制时调制特性的原理与实验方法, 实验测定了 LC-SLM 在特定光路条件下分别进行偏振调制、相位调制与振幅调制时的调制特性参数。

关 键 词: 空间光调制器; 调制特性; 相位调制

中图分类号: O436

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20132803.0349

Experimental Study of Modulation Characteristics of Spatial Light Modulator

ZHOU Qi^{1,2}, LU Jun-fa^{1,2}, YIN Jian-ping^{2*}

(1. Department of Physics, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China, E-mail: qizhou@ecit.cn;

2. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: The principles and methods for measuring polarization modulation characteristics of liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM) in special conditions of experiment are proposed. The calibration of phase and amplitude modulation characteristics for the polarized light incident LC-SLM is explored in theory and experiment. The corresponding modulation parameters are determined in experiment when the LC-SLM works on phase-only, amplitude-only or polarization-only mode under special light path setting, respectively.

Key words: spatial light modulator; modulation characteristics; phase modulation

1 引 言

随着液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulation, LC-SLM)分辨率的提高和响应速度加快,其使用的范围也更加宽广,如人们利用相位型 LC-SLM 来改变光轴方向的光强分布^[1],进行高精度的开环自适应光学研究^[2],沿激光波导的光束散光与椭圆率的单独控制研究^[3],制作相息图^[4]以及实现激光投影显示^[5]等;

在冷原子与冷分子的光学操控的研究中,人们也越来越多地提出利用 SLM 来产生操控冷原子或冷分子所需要的特殊光场的新方案,如 2011 年陆俊发^[6]等提出的实现冷原子或冷分子光学囚禁的组合三光学势阱方案,前不久顾宋博^[7]等提出的用液晶空间光调制器产生光阱阵列方案等。在实现这些方案时,人们首先必须了解在特定使用环境下 LC-SLM 对光波的调制特性,本文提出了确定特定使用环境下 LC-SLM 对不同偏振方向的

收稿日期: 2012-12-09; 修订日期: 2013-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 11274114);精密光谱科学与技术国家重点实验室基金

作者简介: 周琦(1979—),男,江西南昌人,博士,讲师,从事冷原子、分子光学的研究。

* 通信联系人, E-mail: jpyin@phy.ecnu.edu.cn

入射光波的响应参数,探索了 LC-SLM 对入射光波的振幅与相位进行调制时的特殊调制特性的方法,并研究了相应的实验过程,该 LC-SLM 调制特性的定标方法及相应实验过程可在光学囚禁与操控冷原子或冷分子、光波的波前整形等研究中得到应用。

2 入射偏振光偏振方向对调制特性的影响

2.1 理论分析

向列型液晶空间光调制器的液晶中所有分子都是长条结构,且同向平行排列,展现出双折射现象。当偏振光入射时,将分解为垂直于分子长轴方向的 o 光与平行于分子长轴方向的 e 光,其中 o 光为寻常光,液晶分子对该光的折射率不变。因此,LC-SLM 对其不具有调制作用,将按一般光线传播的规律传播。e 光为晶体中的非寻常光,将受到液晶空间光调制器的调制。当我们在液晶空间光调制器上加上如图 1(b)所示的相位呈锯齿状分布的灰度图时,则 LC-SLM 调制特性成为一维液晶闪耀光栅。当如图 1(a)中那样以入

射角 α (α 为入射光与 LC-SLM 法线方向之间的夹角)斜入射时,该光栅对入射光的等效光栅常数将变为 $d\cos\alpha$,衍射闪耀角度 θ 满足 $\sin\theta = \lambda/(d\cos\alpha) = x/f$,式中 f 为透镜的焦距, x 则是在焦平面上距光心的距离。这样在透镜的焦平面处,o 光和 e 光将分别聚焦在不同的空间位置,形成两个聚焦点,其中的 o 光聚焦点的位置在 $x=0$ 处,且不受 LC-SLM 调制函数的影响,光强仅由不同入射偏振光波的振动方向相对于分子长轴的夹角的变化决定;e 光焦点的位置将受到调制函数的控制,由闪耀角度表达式中的 x 决定,其光强也由不同入射偏振光波的振动方向相对于分子长轴的夹角的变化决定,当我们改变 LC-SLM 上光栅常数 d 时,e 光焦点的位置将随闪耀角度式中的 x 变化。当改变入射偏振光的偏振方向时,两个焦点的相对光强将按马吕斯定律发生变化,测量不同的振动方向的入射偏振光入射时两焦点的光强变化,即可得到 LC-SLM 相对于不同振动方向时的入射偏振光的偏振调制特性。

2.2 实验结果

根据上述原理进行了实验研究,实验中使用了外腔式的 $0.6328\ \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器作为平面单色光源。实验装置如图 1(a)所示,激光器输出激光后经过一衰减器(NDF),对入射激光束起衰减作用,以使最后输出在 CCD 上的光强能被 CCD 接收与观测而不超出 CCD 的测量范围;光再经过一偏振片 P 改变入射偏振光的振动方向;为方便光路调节,用一反射镜改变光路方向;为保证 LC-SLM 上的激光能均匀照明,需要激光束的光斑较大,因此要对输入的激光束进行扩束。使用的激光的扩束系统采用 10 倍显微物镜聚焦,为保证光束质量,用 $50\ \mu\text{m}$ 孔径的小孔在显微物镜焦点处进行针孔滤波,再经共焦的焦距为 $500\ \text{mm}$ 的透镜,得到了大于 LC-SLM 孔径的激光束;光束扩束后经过一限制光束的小孔光阑(DH),其开口的通光直径为 $5\ \text{mm}$,照射到 LC-SLM;实验中使用的 LC-SLM 是由德国 Holoete 公司生产的 Holoete LC-R2500 型空间光调制器,属于反射式向列性 LCOS 模式,实际有效调制面积为 $19.5\ \text{mm}\times 14.6\ \text{mm}$,被分为 $1\ 024\times 768$ 个像素,每个像素的尺寸为 $19\ \mu\text{m}$,为电控调制;光经过 LC-SLM 调制后反射,经过焦距 $250\ \text{mm}$ 的透镜聚焦到 CCD 上记录观测。由于在实验中我们

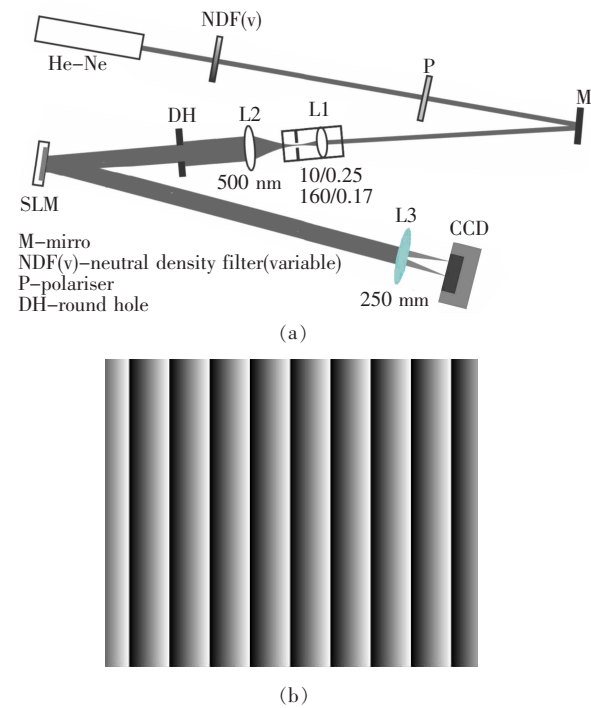


图 1 (a)不同振动方向偏振光入射时的调制特性实验用光路;(b)LC-SLM 上加的调制函数图示。
Fig. 1 (a) Optical scheme for measurement of polarization modulation characteristics; (b) Graphic presentation of modulation function shown in LC-SLM.

使用的激光器是固定的,因此激光器输出的激光的偏振方向也是固定的,经过偏振片 P 后的光强随偏振方向的变化而变化,因此为了使实验测量得到的数据保持一致性,需要对测量到的光强数据进行入射光强度变化的修正。经过修正处理我们得到的两个焦点光强的变化情况如图 2 所示。图 2 中小方块代表的是左侧聚焦点的 o 光光强变化情况,圆点代表的是右侧经光栅调制的聚焦点 e 光光强变化情况。由于在实验测量过程中用时较长,激光器的输出光强有变化但不大,因此没有对激光器的输出光强进行测量并据此对最后结果进行修正,特别是图中两侧的数据由于实际测量到的入射光强已很弱,因此测量中的准确度稍低,但从结果中可以看到明显的与理论基本相符的结果。

在具体的光学囚禁与操控冷原子或冷分子的实验中,可以根据需要通过调节入射到 LC-SLM

上偏振光的偏振方向来调节两个焦点的光强配置以实现冷原子或冷分子操控的不同光强需要。

图 2 反映了通过调节偏振片 P(记数位置为 θ) 改变不同的入射光偏振态时,两聚焦点光强的变化情况。实验中,当偏振方向与垂直方向(即激光器输出的激光偏振方向)成 42° (偏振片记录位置 $\theta=332^\circ$) 角时两聚焦点的光强相同。随之我们即将 P 固定,然后再通过调节光栅周期 d ,改变两焦点位置的间距,图 3 反映了两焦点间距之间的变化情况,光学参数为 $\lambda=0.632\ 8\ \mu\text{m}$, $f=250\ \text{mm}$,入射角 $\alpha=30^\circ$,图中小方块是实验结果数据,圆点是理论计算的结果,两者在两焦点间距较大时趋于一致,但在间距较小时差别较大,其原因是在实验中我们发现,由于衍射影响,每个焦点的光斑有一定的大小,当两焦点间距小到与光斑本身大小相当时,实验中已很难测量两焦点的准确位置,从而计算出两焦点的间距,因此造成在两焦点间距较小时理论与实验结果的差异。

3 相位调制特性的实验研究

3.1 理论方法分析

LC-SLM 能对入射光场单独进行相位或振幅调制,但其对入射光场进行相位或振幅调制的特性与入射光场的入射方向等因素有关,需要在具体实验前期光路调节确定后,借助实验系统对其进行实际测定。首先调整入射光的偏振方向,使经 LC-SLM 后的出射光仅有 e 光成分,即全部入射光都会由 LC-SLM 调制,实验光路如图 4(a) 所示,入射光经扩束后照明有两孔(两孔孔径相同)透光的光屏 DH,相当于得到两平行光束分别照明在 LC-SLM 上的左右不同的区域,如图 4(b) 所示,再经一透镜汇聚在 CCD 上;我们在 LC-SLM 上左右两区域分别加不同的单值调制函数,保持左边的图灰度值为 0 不变(即此光波的相位值不变),而改变另一边的灰度值,则此光波在经 LC-SLM 反射时将产生附加光程,导致与左侧的反射光波间产生一相位差,左右两反射光波的相位差将随灰度值的改变而改变,汇聚在 CCD 上同一处的两光波将发生干涉,形成类似于干涉仪的双光束干涉条纹,当两光束的相位差发生变化时,干涉条纹将在平面内发生位移,通过对干涉条纹位置的分析,即可知道在我们对右边加的相应灰度值时对其中一个光波束产生的相位改变,从而得到

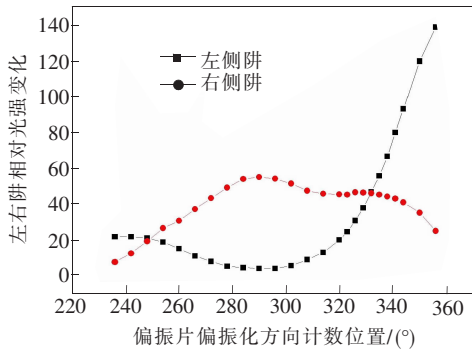


图 2 不同偏振方向入射光时两焦点光强变化

Fig. 2 Dependence of light intensity of two focus and polarization direction of incident light

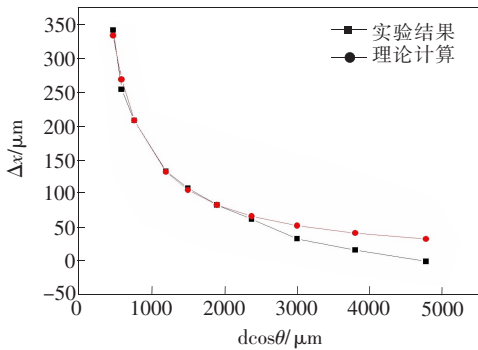


图 3 二焦点间距随有效光栅常数的变化关系以及理论与实验对比结果

Fig. 3 Dependence of spacing distance between two focus and equivalent grating constant, and the comparison result of theoretical and experimental data.

在特定光路条件下的图像灰度与相位改变之间的对应关系(即相位调制特性)。注意在调整光路时一定要全光路元件共轴。

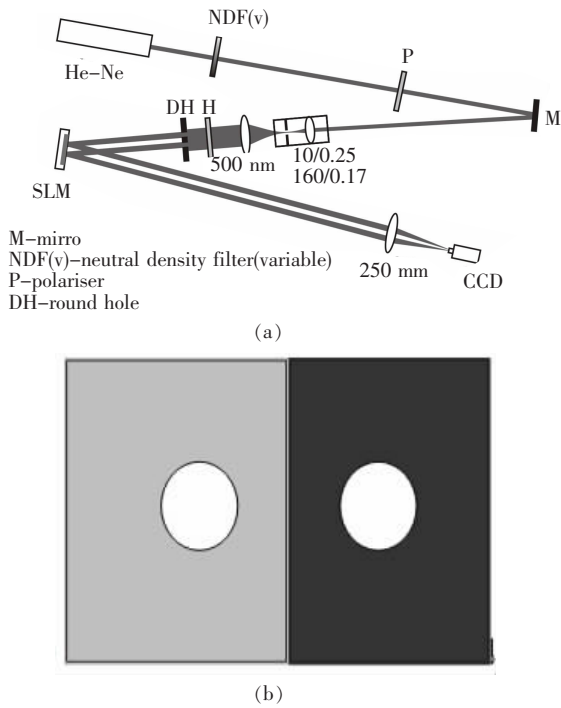


图 4 (a)研究 LC-SLM 的相位调制特性的实验用光路原理;(b)LC-SLM 上光照情况。

Fig. 4 (a) Optical scheme for measurement of phase modulation characteristics of LC-SLM; (b) Illumination in the screen of LC-SLM.

3.2 实验结果

首先用图 1(a)光路,加上图 1(b)的调制函数,当偏振片记数位置在 291° 时(此值仅在此次实验中成立)左侧聚集点光强消失,即全部 o 光消失,此时固定偏振片,将图 1(a)中的 DH 换成图 4(a)中的有双孔的 DH,调节 DH 位置,使双孔 DH 透过的光如图 4(b)照明 LC-SLM,再将在 LC-SLM 上加的二值调制函数的左侧的灰度值固定为 0,LC-SLM 另一边的灰度值可在 $0\sim 255$ 变化。事先选定一个中间值,此时再调整 CCD 的位置即可看到清晰的双光束干涉条纹;然后我们从 0 开始以 2 为步长逐步改变右侧的灰度值,在每一个灰度值时记录干涉条纹情况,所有实验数据记录完成后再进行数据处理。我们在每一个灰度值时记录的干涉条纹图中抽取相同位置的一条线上光强分布数据取平均值,得到此一灰度时的条纹的位置,再将每一个灰度值时得到的这条平均

干涉条纹位置线组合即可得到图 5 所示组合图像。在图 5 中可明显看到干涉条纹的位移情况,根据此位移情况,即可推算出调制图上的灰度值与相应调制相位之间的关系,如图 6 所示。根据实验得到的图 6 中的相应数据,即可设计具体实验中特殊需要的相位调制灰度图。需要注意的是此关系曲线也仅对当时的实验系统成立。

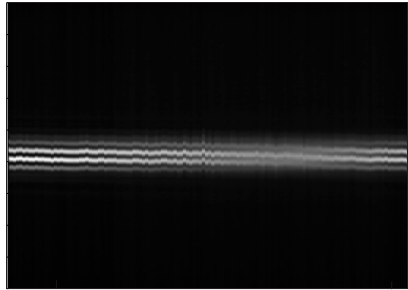


图 5 不同灰度值对应的干涉条纹位移情况
Fig. 5 Dynamic shifting process of interference fringes under different gray levels

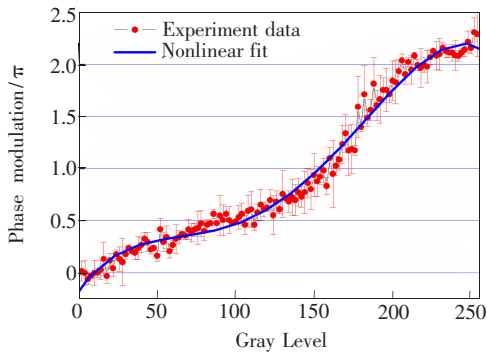


图 6 不同灰度值与调制相位之间的关系
Fig. 6 Dependence of phase modulation and gray levels

通过此相位调制特性曲线的测定,可以知道 LC-SLM 在特定使用环境下的调制特性,就能设计出符合理论要求的和符合该实际使用场景的光波波前调制图,对于光波的波前整形和特殊的光学操控冷原子、冷分子研究具有特殊的作用价值。

4 振幅调制

测定 LC-SLM 在不同灰度值时对光波振幅的调制情况,我们仍采用图 4 所示光路,与实验测定相位调制函数不同的是这里测量的是两个光斑光强的相对变化情况,从而得出 LC-SLM 在不同灰度值时对光波的振幅调制关系。实验方法是:固定左侧的灰度值(固定左侧的光强不变),改变右侧的灰度值,记录两焦点的光强分布情况,再以

2 为步长改变右侧图的灰度值,对每一个灰度值记录两个焦点的光强分布情况,待全部记录完成后对每一个灰度值时两焦点的光强值进行处理,即可得到如图 7 所示的在不同灰度值时的振幅调制关系。图中实心方块为对单个像素点取样的对比结果,空心圆点为对整个光斑强度积分后的比较结果。

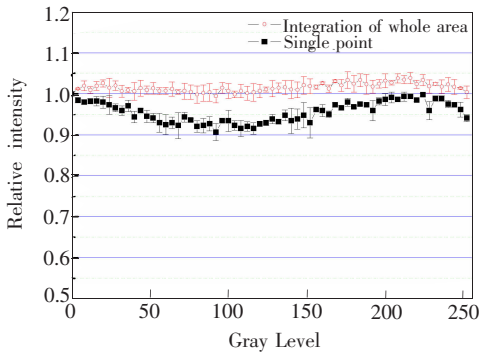


图 7 不同灰度值时 SLM 对光强的调制情况
Fig. 7 Dependence of intensity modulation and gray levels

5 结 论

液晶空间光调制器现已在更多的实时产生特

殊光场分布时得到应用,特别是产生特殊光阱操控冷原子或冷分子领域;为得到特殊需要的光场分布,可以先在理论上通过计算或分析产生特殊的空间光调制函数,而此特殊的调制函数在 LC-SLM 上实现时是以灰度值来体现出相位或振幅调制值,但由于同一 LC-SLM 在不同的使用条件下其灰度值与相位、振幅值之间的对应关系不同,即调制函数随使用条件变化,因此,在每一个实验光路确定后,首先要确定出灰度值与相位或振幅值之间的对应关系,即对 LC-SLM 调制函数进行定标。就如何对 LC-SLM 进行定标这一方面,国内尚未见报道,本文分别就 LC-SLM 对偏振、相位与振幅调制探讨了其调制函数的定标方法,并进行了实例研究,得到了在某特殊情况下的定标曲线,我们的定标方法可供同行人在具体使用 LC-SLM 的实验中,测定 LC-SLM 调制特性参数过程时使用。其中偏振调制可以得到两个光强可调的双光阱,亦可用于冷原子分子中双光阱囚禁与操控相关的实验研究;相位调制特性则直接与激光的波前调制的理想实现有关,只有有了针对特殊使用场景的调制函数,才可有效地得到理想的波前相位调制图。

参 考 文 献:

[1] Lopez-Coronado O, lemmi C, Davis J, *et al.* Light intensity profile control along the optical axis with complex pupils implemented onto a phase-only SLM [J]. *AIP Conf. Proc.*, 2007, 992: 152-157.
[2] Li C, Xia M, Mu Q, *et al.* High-precision open-loop adaptive optics system based on LC-SLM [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(13): 10774-10781.
[3] Cruz A, Ferrer A, Gawelda W. Independent control of beam astigmatism and ellipticity using a SLM for fs-laser waveguide writing [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(23): 20853-20859.
[4] 胡立发. 用平行列液晶空间光调制器制作相息图的研究 [J]. *液晶与显示*, 2005, 20(2): 93-98.
[5] 田志辉,刘伟奇,冯睿,等. 激光投影显示系统薄型化设计 [J]. *液晶与显示*, 2009, 24(6): 916-921.
[6] 陆俊发,周琦,纪宪明,等. 实现冷原子、冷分子光学囚禁的组合三光学势阱方案 [J]. *物理学报*, 2011, 60(6): 063701(1-9).
[7] 顾宋博,徐淑武,陆俊发,等. 用液晶空间光调制器产生光阱阵列 [J]. *物理学报*, 2012, 61(15): 153701(1-8).