

基于液晶空间光调制器的偏振选择特性研究

陈捷 梁健 韩冰 冯少彤 聂守平 朱竹青

(南京师范大学 江苏省光电技术重点实验室 江苏 南京 210097)

[摘要] 提出一种利用液晶空间光调制器实现二维光场偏振态编码与偏振态选择的方法,其基本思想是通过控制液晶空间光调制器上加载的灰度值改变出射光波的偏振态.对液晶空间光调制器改变光波偏振态的能力进行了研究.利用在空间光调制器不同区域上加载不同灰度对入射光波进行偏振态编码,在输出端实现了以偏振态作为条件进行选择输出.实验结果表明,该方法通过灰度编码能够产生包含两个偏振方向正交的出射光场,并且所组成的偏振选择衍射系统能够实现对衍射光场的偏振态选择.

[关键词] 偏振选择 空间光调制器 偏振选择衍射系统

[中图分类号] O438 [文献标志码] A [文章编号] 1672-4292(2012)04-0033-06

Study on Polarization-Selection Based on Liquid-Crystal Spatial Light Modulator

Chen Jie, Liang Jian, Han Bing, Feng Shaotong, Nie Shouping, Zhu Zhuqing

(Key Laboratory for Opto-Electronic Technology of Jiangsu Province, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract: A method to achieve 2-D polarization-encoding in the light field and polarization-selection based on liquid-crystal spatial light modulator(LCSLM) is proposed. The basic idea is to change the polarization state of output light wave with the gray-level working on LCSLM. The capability of changing the polarization distribution of a light field based on LCSLM is studied in this paper. We encode the polarization state of incident beam with different gray levels working on LCSLM's different areas so different output informations with different polarization states could be obtained. The experimental results show that the method can generate a light field obtained two orthogonal polarization directions based on gray-level encoding and the polarization-selective diffraction system can realize polarization-selection of the diffractive field.

Key words: polarization-selection, spatial light modulator, polarization-selective diffraction system

偏振态是光的一项重要属性,它描述了光在空间传播过程中的振动状态.偏振选择是指通过对光束的偏振态进行调制,使光束在不同的空间区域上具有不同的偏振状态,最终将偏振态作为选择条件提取出光束中对应空间位置的信息.这一技术目前正广泛应用于产生矢量光束^[1]、偏振成像^[2]、偏振复用^[3]、双折射透镜^[4]、一维与二维偏振全息^[5]以及基于偏振的光学加密^[6,7]上.实现偏振选择的传统方法是使用偏振选择相位光栅这一光学元件,该元件可利用特殊的二维结构薄膜^[8]方法实现,但是该方法需要用到高分率的光刻技术,同时不具有动态调整的能力.可编程的液晶空间光调制器则能提供一个能够实现动态控制偏振选择目的的简易途径^[9,10].

本文研究了液晶的偏振特性^[11],在特定的情况下^[12],扭曲向列式液晶能够在一束光中产生两个正交偏振态的二维空间分布,通过使用偏振片选择偏振方向,能够在输出面得到原光束中该方向对应的空间区域的信息,实现了偏振选择的目的.此外,利用两部液晶空间光调制器构成了一个能够动态控制衍射输出的偏振选择衍射系统,这一系统可克服传统偏振选择衍射光栅元件制作工艺复杂的缺点.

1 偏振选择原理

液晶空间光调制器由许多液晶晶胞组成,这些晶胞在空间上呈一维或二维分布,每个晶胞独立接受电

收稿日期:2012-09-01.

基金项目:江苏省高校自然科学基金(09KJA140002).

通讯联系人:聂守平,教授,研究方向:光电混合模式识别、数字全息技术、数字图像处理等. E-mail: nieshouping@njnu.edu.cn

信号的控制.当加以电压之后,液晶晶胞受到电场的作用而被极化,改变了其原来的空间排列,最终改变液晶的双折射率发生.当所加电压发生变化时,液晶的寻常光折射率 n_o 保持不变,非寻常光折射率 $n_e(U)$ 则为加载电压 U 的函数.因此由液晶各向异性导致的相位差 Γ 与加载电压 U 具有如下关系:

$$\Gamma = \frac{2\pi(n_e(U) - n_o)d}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 d 为液晶层厚度, λ 为波长.式(1)表明,可通过控制加载电压 U 来控制相位差 Γ 的值.而可编程的空间光调制器的加载电压可通过输入图像的灰度值来进行控制.因此,相位差 Γ 可以看作一个与灰度等级有关的函数.

扭曲层列式液晶的琼斯矩阵 $M_{\text{SLM}}^{[13]}$ 可以表示为:

$$M_{\text{SLM}} = R(\phi) \begin{pmatrix} \cos X - i \frac{\Gamma \sin X}{2X} & \phi \frac{\sin X}{X} \\ -\phi \frac{\sin X}{X} & \cos X + i \frac{\Gamma \sin X}{2X} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$R(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中 ϕ 为扭曲层列式液晶的总扭转角度; X 为液晶的双折射参数,与相位差 $\Gamma^{[14]}$ 有关,具体值为 $X = \sqrt{\phi^2 + (\Gamma/2)^2}$;本文中使用的为 90° 扭转角的扭曲向列式液晶,即 $\phi = \frac{\pi}{2}$,因此可发现旋转矩阵 $R(\phi)$ 与电压 U 相互独立,即与灰度等级相互独立,则 M_{SLM} 参数可认为是只与灰度等级有关的函数.

利用空间光调制器进行光场调制分为相位调制和振幅调制.其中振幅调制的基本光路如图1所示.定义竖直方向为 0° ,起偏器P的起偏角为 α ,检偏器A的检偏角为 β ,入射到空间光调制器的光矢量为 V_1 ,经过空间光调制器的光波矢量为 V_2 ,最后从检偏器A出射的光波矢量为 V_3 .

V_1 与 V_2 、 V_2 与 V_3 分别满足如下关系:

$$V_2 = M_{\text{SLM}} V_1, \quad (4)$$

$$V_3 = M_A V_2, \quad (5)$$

$$M_A = \begin{pmatrix} \cos^2 \beta & \frac{1}{2} \sin 2\beta \\ \frac{1}{2} \sin 2\beta & \sin^2 \beta \end{pmatrix}, \quad (6)$$

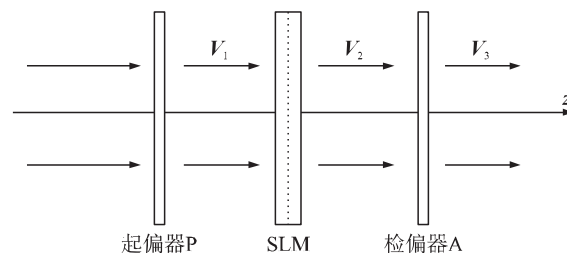


图1 空间光调制器振幅调制模式

Fig.1 The amplitude modulation mode of spatial light modulator

其中 M_{SLM} 和 M_A 分别为液晶空间光调制器和检偏器

所对应的琼斯矩阵.因此,一旦起偏器和检偏器角度 α 、 β 确定, V_2 与 V_3 的值都只与液晶空间光调制器的 M_{SLM} 这一参数有关.由于光波的偏振状态可以通过它的光矢量 V 的值来进行描述,而 M_{SLM} 是只与灰度等级有关的函数,因此液晶空间光调制器出射光的偏振态可通过灰度等级进行控制.

当起偏角 $\alpha=0$ 、检偏角 $\beta=\frac{\pi}{2}$ 时, $V_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, $I_{V_1}=1$, $M_A = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$,由式(5)可以得到 V_3 强度为:

$$I_{V_3} = 1 - \phi^2 \frac{\sin^2 X}{X^2}. \quad (7)$$

另外,当 $\alpha=0$ $\beta=\pi$ 时 $M_A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$,此时 V_3 的强度为:

$$I_{V_3} = \phi^2 \frac{\sin^2 X}{X^2}. \quad (8)$$

可见,两种情况下 V_3 的强度产生了亮暗翻转,如图2所示,其中(a)和(b)为两种情况下输出光场强度和空间光调制器灰度之间关系的理论值,(c)和(d)为两种情况下的实验测量值.可以看出,当空间光调制器上加载的灰度在 $[0, 50]$ 这一区间时,出射光的偏振态为垂直方向;当灰度在 $[200, 255]$ 这一区间时,出射光的偏振态变为水平方向;而在两者之间的区间里,出射光的光强与灰度等级呈线性变化.因此,可以利用

[0 50]与[200 255]这两个灰度区间作为两个偏振态正交的编码通道实现偏振选择的目的.

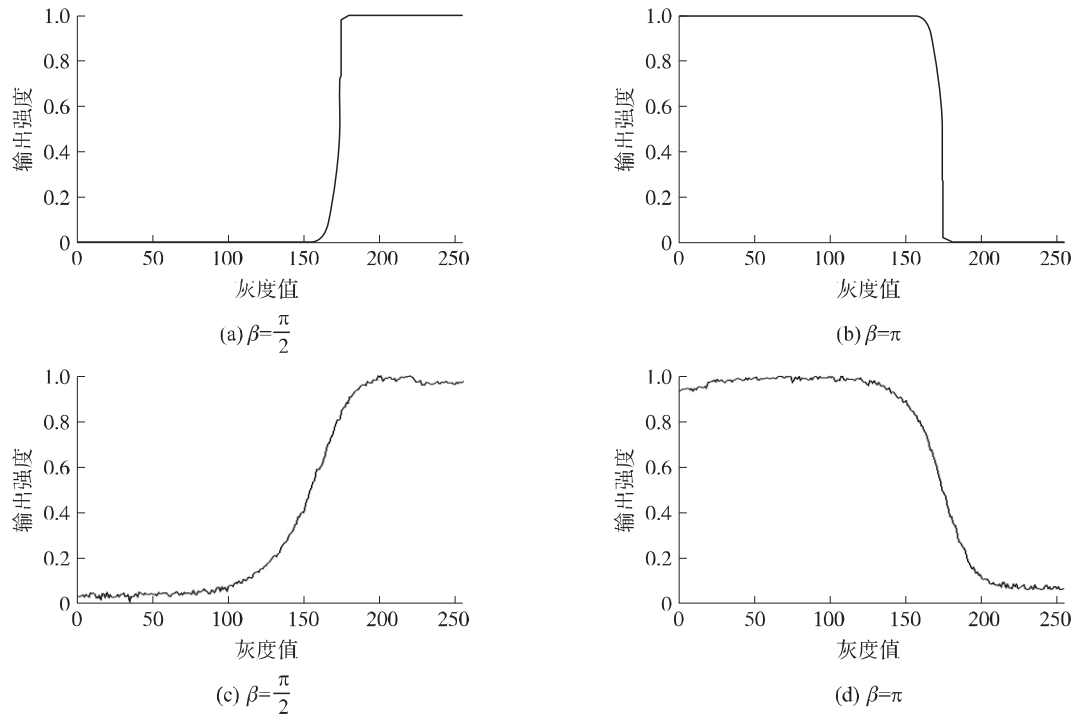


图2 灰度等级与 V_3 强度关系曲线

Fig.2 The curve of relation between gray-level and the intensity of V_3

偏振选择是为了按照需要利用偏振态对光波不同区域进行选择提取. 如图3所示, 将入射光场分为I、II、III、IV 4个区域, 其中I、IV区域是偏振方向为水平的线偏振光, II、III区域是偏振方向为垂直的线偏振光. 这样一束光在经过检偏器时, 改变检偏器的透光轴方向可以得到不同的输出结果, 从而实现偏振选择输出.

实验中, 在图1所示光路中的起偏器前放置一个如图4(a)所示的遮光模板, 将入射到空间光调制器上的光束分为9个区域, 且每个区域分别含有字母A~I的信息. 图4(b)为加载在液晶空间光调制器上的灰度分布, 它作为偏振态选择模板被分割为与(a)一一对应的9个区域, 其中B、D、F、H 4个区域灰度为255, A、C、E、G、I 5个区域灰度为0.

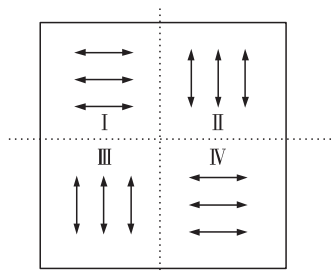
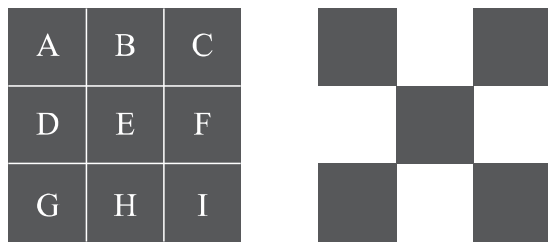


图3 偏振选择

Fig.3 Polarization-selection



(a) 输入信息

(b) 模板信息

图4 偏振选择信息

Fig.4 Information of polarization-selection

根据上述推导内容可知, 光束通过液晶空间光调制器的调制, 图4(a)中的A、C、E、G、I 5个区域被调制为垂直偏振方向的偏振光; B、D、F、H 4个区域则被调制为水平偏振方向的偏振光. 因此, 理论上当检偏角 $\beta = \frac{\pi}{2}$ 时, 水平方向的偏振光出射, 垂直方向的偏振光完全消光, 最后输出B、D、F、H 4个字母; 当 $\beta = \pi$ 时, 输出结果正好相反; 当 $\beta = \frac{\pi}{4}$ 时, 同时输出9个字母全部出射, 但光强只有输入光强的一半, 如图5所示.

利用图1所示光路进行实验, 得到的实验结果如图6所示. 实验采用 Holoeye 公司的 LC-2002 型透射

式 90° 扭曲层列式液晶空间光调制器, 其调制分辨率为 800×600 像素, 像素尺寸为 $32 \times 32 \mu\text{m}$, 光波波长为 532 nm . 对比图 5 与图 6 可以看出, 实验结果与理论结果相吻合, 表明利用空间光调制器灰度值可以改变输入光的偏振态.

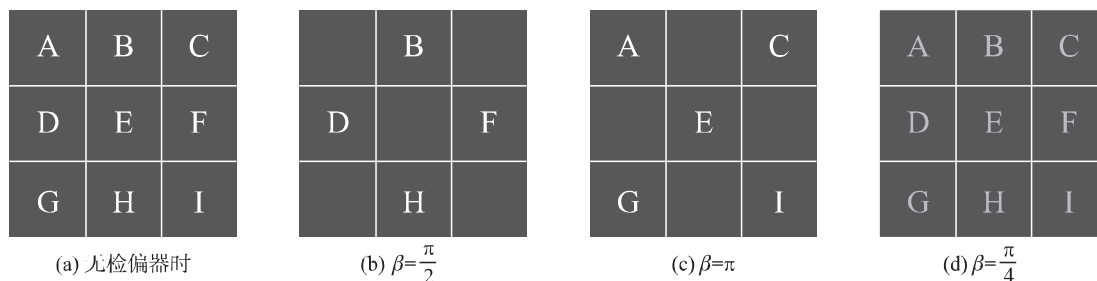


图 5 不同检偏器角度对应的理论输出图像

Fig. 5 Different theoretical output images based on different analyzer angles

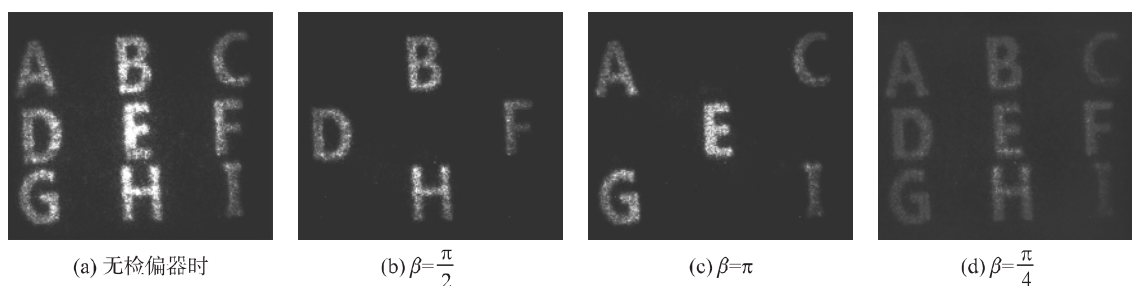


图 6 不同检偏器角度对应的实际输出图像

Fig. 6 Different practical output images based on different analyzer angles

2 偏振选择衍射实验

加载在液晶空间光调制器上的信息可以看作是复合光栅, 光通过调制后发生衍射. 本文利用两台 LC-2002 型空间光调制器构成如图 7 所示的偏振选择衍射系统^[15], 通过调整起偏器 A 的角度选择输出不同的衍射图案.

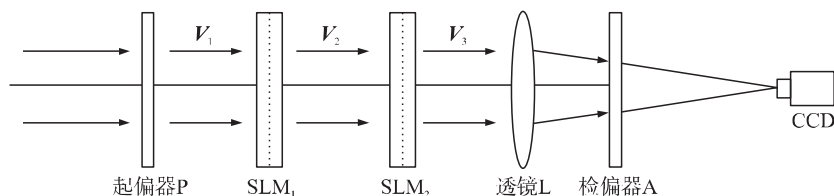


图 7 偏振选择衍射系统

Fig. 7 The polarization-selective diffraction system

此系统的目的是通过偏振选择相对应的衍射输出, 将 SLM_1 用作加载相位信息, SLM_2 用作加载偏振选择信息. 假设 SLM_1 被分为 4 个区域, 并分别载入 4 幅各不相同的相位图, 如图 8(a) 所示. 与之对应的 SLM_2 也被分为相同的 4 个区域, 并载入如图 8(b) 所示的灰度分布, 则当检偏角 $\beta = \frac{\pi}{2}$ 时将得到 SLM_1 中 I 区域所加载相位图的衍射图案. 以此类推, 通过改变 SLM_2 上的灰度分布, 可分别得到 II、III 和 IV 区域所加载相位图的衍射图样, 也可同时得到某 2 个或 3 个区域的衍射图像, 实现偏振选择衍射的目的.

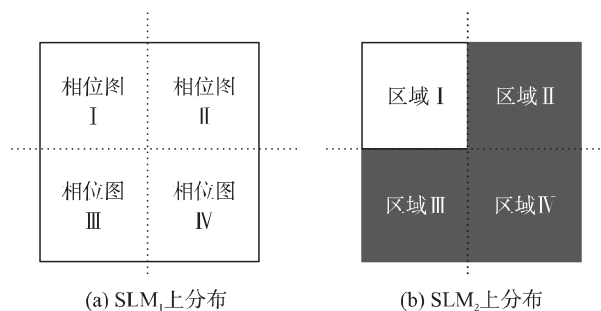


图 8 空间光调制器加载灰度分布

Fig. 8 The distribution of gray-level working on the SLMs

为了实验此偏振选择衍射系统的实际效果, 本文选择“南”、“京”、“师”、“范”4个汉字作为对象, 使用图7光路进行实验. 首先通过傅里叶迭代变换算法分别计算出图9中的4幅图的相位, 其中每一幅图的大小都为 320×200 . 计算结果如图10所示, 最后按照图8(a)中的顺序加载于 SLM_1 上.

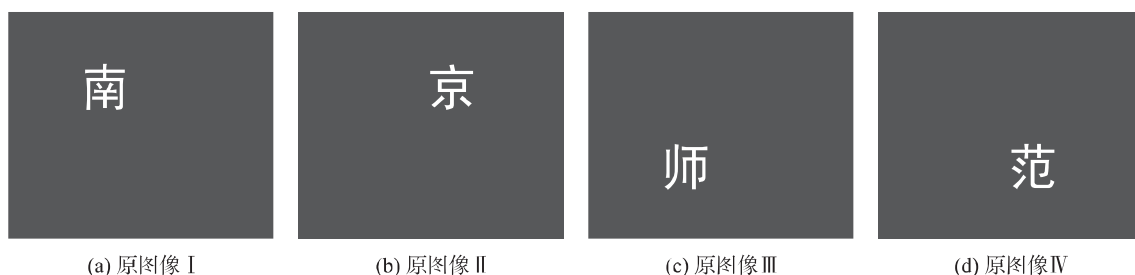


图9 原图像

Fig. 9 Original images

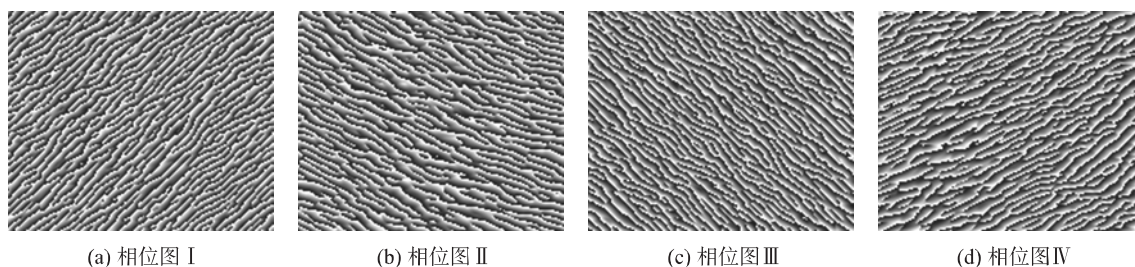


图10 相位图

Fig. 10 Phase diagrams

在 SLM_2 上加载如图11(a)所示的灰度分布, 经过 SLM_2 调制之后出射光束的Ⅱ、Ⅳ区域被调制为水平方向的偏振光; Ⅰ、Ⅲ区域被调制成为垂直方向的偏振光. 因此 $\beta = \pi$ 时, 在CCD处得到“南”与“师”两字的衍射图样. $\beta = \frac{\pi}{2}$ 时, 在CCD处得到“京”与“范”两字的衍射图样, 如图11(b)、(c)所示.

改变 SLM_2 上的灰度分布如图12(a), 此时不同检偏角对应的实验结果如图12(b)、(c)所示.

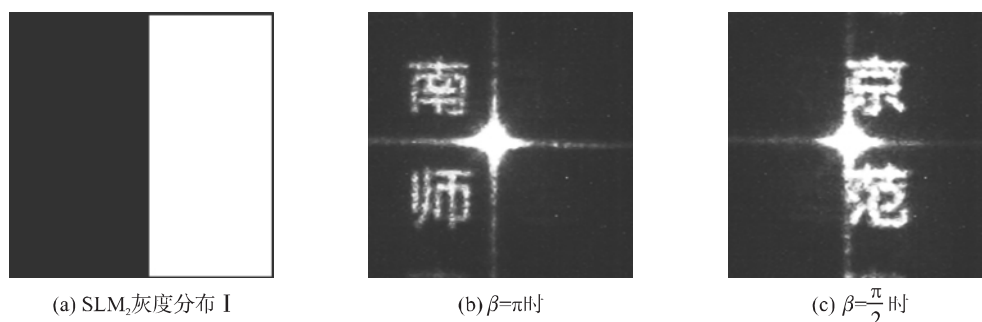


图11 偏振选择衍射输出结果 I

Fig. 11 The output I of the polarization-selective diffraction system

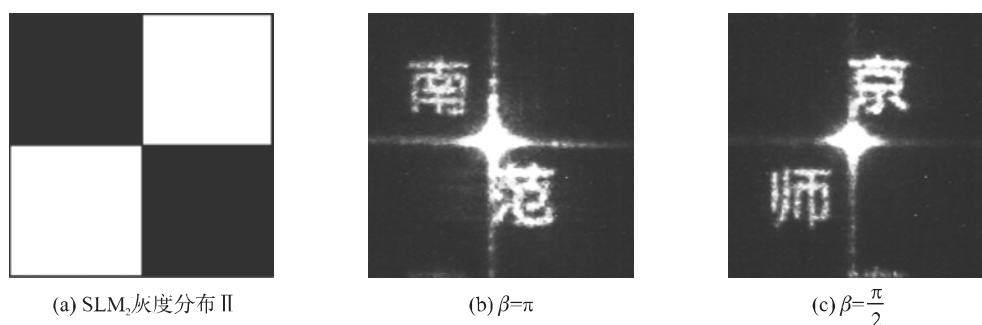


图12 偏振选择衍射输出结果 II

Fig. 12 The output II of the polarization-selective diffraction system

令检偏角 $\beta = \frac{\pi}{2}$ 保持不变, 实时改变 SLM₂ 区域上的灰度分布, 最终得到如图 13(a) ~ (c) 的衍射图样。

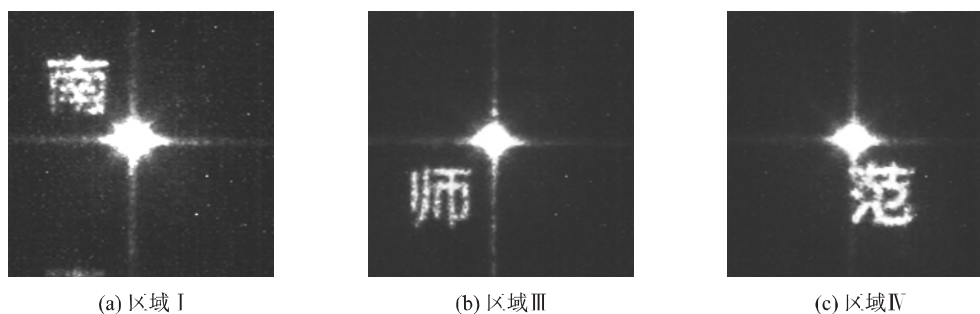


图 13 3 个区域单独选择衍射输出结果

Fig. 13 The polarization-selective diffraction outputs of three individual regions

实验结果表明, 本系统具有与理论一致的偏振选择衍射能力, 且由于液晶空间光调制器的实时可编程特性, 本系统加载相位信息和偏振选择信息都可以根据需要调整, 较之传统偏振衍射元件实现方式简单, 调整灵活。

3 结语

本文提出了一种使用空间光调制器进行二维偏振编码和偏振选择的方法。该方法的核心思想是利用液晶空间光调制器具有改变入射光波光场的能力, 通过研究液晶的偏振特性将液晶空间光调制器的灰度参数与其改变光波偏振态的能力相互联系。根据这一原理, 通过在液晶空间光调制器不同区域上加载不同的灰度分布以使输出光束具有相对应的偏振分布, 从而实现了以偏振角度作为选择条件, 得到光束中某一区域信息输出的功能, 最终在此基础上构造了一个偏振选择衍射系统。实验结果表明, 该方法有效地实现了偏振选择的目的, 同时构造的系统可靠地实现了偏振选择衍射输出的目的, 且此系统具有较传统方法实现简单、可以灵活调整加载相位和输出光束偏振态分布的特点。

[参考文献] (References)

- [1] Chen Hao, Hao Jingjing, Zhang Baifu, et al. Generation of vector beam with space-variant distribution of both polarization and phase[J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3 179-3 181.
- [2] Solomon J E. Polarization imaging[J]. Applied Optics, 1981, 20(9): 1 537-1 544.
- [3] Davis J A, Evans G H, Moreno I. Polarization-multiplexed diffractive optical elements with liquid-crystal displays[J]. Applied Optics, 2005, 44(19): 4 049-4 052.
- [4] Sanyal S, Bandyopadhyay P, Ghosh A. Vector wave imagery using a birefringent lens[J]. Optical Engineering, 1998, 37: 592-599.
- [5] 田勇, 潘旭, 王长顺, 等. 偶氮液晶聚合物薄膜的二维偏振全息记录[J]. 物理学报, 2009, 58(10): 6 979-6 984.
Tian Yong, Pan Xu, Wang Changshun, et al. Two-dimensional polarization holographic recordings in azobenzene liquid-crystalline polymer thin films[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(10): 6 979-6 984. (in Chinese)
- [6] Mogensen P C, Gluckstad J. A phase-based optical encryption system with polarisation encoding[J]. Optics Communication, 2000, 173: 177-183.
- [7] Alfalou A, Brosseau C. Dual encryption scheme of images using polarized light[J]. Optics Letters, 2010, 35(13): 2 185-2 187.
- [8] 厉以宇, 王媛媛, 陈浩, 等. 基于二维结构薄膜的偏振选择相位光栅的研究[J]. 物理学报, 2010, 59(7): 5 110-5 115.
Li Yiyu, Wang Yuanyuan, Chen Hao, et al. Polarization dependent phase grating based on two-dimensional structured thin films[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(7): 5 110-5 115. (in Chinese)
- [9] Vasnetsov M V, Pas'ko V A, Kasyanyuk D S. Observation of polarization conflict caused by geometrical phase in a twisted nematic liquid crystal cell[J]. Optics Letters, 2011, 36(11): 2 134-2 136.

(下转第 66 页)

- [6] 顾勋梅,宋国新,邵志清.一种改进的功能点分析方法[J].计算机工程,2007,33(22):12-14.
Gu Xunmei, Song Guoxin, Shao Zhiqing. Improved method function point analysis method[J]. Computer Engineering, 2007, 33(22): 12-14. (in Chinese)
- [7] Ochodek M, Nawrocki J. Enhancing use-case-based effort estimation with transaction types[J]. Foundations of Computing and Decision Sciences, 2010, 35(2): 91-106.
- [8] Ochodek M, Nawrocki J, Kwarciak K, et al. Simplifying effort estimation based on use case points[J]. Information and Software Technology, 2010, 53(3): 200-213.
- [9] 计春雷,闫顺成,宋国新.面向对象方法的 COSMIC-FFP 功能规模度量[J].计算机科学,2011,38(5):119-122.
Ji Chunlei, Yan Shuncheng, Song Guoxin. COSMIC-FFP function size measurement for object-oriented methods[J]. Computer Science, 2011, 38(5): 119-122. (in Chinese)
- [10] 宋巍,沈建雄,杨根兴,等.软件功能测试规模估算模型的研究及其应用[J].计算机工程,2011,37(7):47-49.
Song Wei, Shen Jianxiong, Yang Genxing, et al. Research on size estimation model for software function test and its application [J]. Computer Engineering, 2011, 37(7): 47-49. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]

(上接第 38 页)

- [10] Ignacio Moreno, Jeffrey A Davis, Travis M Hernandez, et al. Complete polarization control of light from a liquid crystal spatial light modulator[J]. Optics Express, 2012, 20(1): 364-376.
- [11] 李宇波,周强,吴树高,等.液晶型圆偏振调制器[J].光电子激光,2011,22(10):1483-1487.
Li Yubo, Zhou Qiang, Wu Shugao, et al. An optical circular-polarization modulator based liquid crystal[J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2011, 22(10): 1483-1487. (in Chinese)
- [12] 蒋骥,朱宏宇,程柯夫,等.扭曲向列液晶偏振性质的研究[J].实验室研究与探索,2011,30(7):47-49.
Jiang Ji, Zhu Hongyu, Cheng Kefu, et al. Researches on the polarization properties of twisted nematic liquid crystal[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2011, 30(7): 47-49. (in Chinese)
- [13] Yeh P, Gu C. Optics of Liquid Crystal Displays[M]. New York: Wiley, 1999.
- [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.
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. (in Chinese)
- [15] Guo Chengshan, Yue Shujuan, Wang Xilin, et al. Polarization-selective diffractive optical elements with a twisted-nematic liquid-crystal display[J]. Applied Optics, 2010, 49(7): 1069-1074.

[责任编辑: 严海琳]