

基于扭曲向列液晶空间光调制器的矢量光生成

席思星 王晓雷 黄帅 常胜江 林列

Generation of vector beams in terms of the partial light modulator of a twisted nematic liquid crystal

Xi Si-Xing Wang Xiao-Lei Huang Shuai Chang Sheng-Jiang Lin Lie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 114204 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.114204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光学全息中的任意矢量光的生成方法

Generation of arbitrary vector beam based on optical holography

物理学报.2015, 64(12): 124202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124202>

电光调制对外部光注入垂直腔表面发射激光器的偏振转换及其非线性动力学行为的操控性研究

Manipulation of the polarization switching and the nonlinear dynamic behaviors of the vertical-cavity surface-emitting laser subjected to optical injection by EO modulation

物理学报.2015, 64(11): 114203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114203>

离轴椭圆矢量光场传输中的光斑演变

Propagation evolution of the off-axis ellipse vector beam

物理学报.2015, 64(2): 024204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024204>

像素偏振片阵列制备及其在偏振图像增强中的应用

Fabrication of pixelated polarizer array and its application in polarization enhancement

物理学报.2014, 63(18): 184204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.184204>

光源参数及大气湍流对电磁光束传输偏振特性的影响

Effect of source parameters on polarization characteristics of electromagnetic beam propagating in atmospheric turbulence

物理学报.2014, 63(10): 104201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104201>

基于扭曲向列液晶空间光调制器的矢量光生成*

席思星 王晓雷[†] 黄帅 常胜江 林列

(南开大学现代光学所, 教育部光学信息科学与技术重点实验室, 天津 300071)

(2014年6月18日收到; 2014年11月1日收到修改稿)

基于扭曲向列型液晶空间光调制器的旋光特性, 根据空间光调制器所加电压和加载相位与旋光角度的对应关系, 设计了可以生成多种涡旋矢量光的通用光路. 利用该原理和光路系统, 在实验上生成了多种携带轴对称相位的矢量光以及图案般复杂的矢量光, 观察和检测了它们的偏振特性, 获得了较好的实验结果. 并且模拟了具有涡旋相位的矢量光的紧聚焦场, 分析了它们的紧聚焦特性. 由于这种生成矢量光的方法光路装置简单、操作容易, 产生矢量光的过程中几乎不损失能量, 并且不存在聚焦过程, 因此在如强激光矢量光束与物质相互作用、激光加速等方面具有重要的应用潜力.

关键词: 偏振, 液晶, 旋光性**PACS:** 42.25.Ja, 42.70.Df, 33.55.Ad**DOI:** 10.7498/aps.64.114204

1 引言

近年来, 具有空间变化偏振分布的矢量光成为人们的研究热点, 因为它在很多方面具有潜在的应用价值, 例如高分辨率成像^[1]、表面等离子体^[2]、纳米操纵^[3]、激光加工^[4]、遥感和奇点光学^[5]等. 人们也提出了很多的生成空间偏振分布矢量光的方法. 其中可以分为静态生产法和动态生成法. 在静态方法中, 一些是将偏振选择的计算全息图加载在双折射材料^[6]、单轴晶体^[7]、亚波长金属光栅^[8]、旋转格兰偏振棱镜^[9]等, 将均匀偏振的光束转变为一个空间偏振非均匀分布的矢量光. 这类方法具有一个共同缺点, 就是没有通用的和动态的光学元件和结构, 即不能动态的生成不同的矢量光; 或者说一种实验光路或结构只能对应一种矢量光, 而且不能生成复杂多样的矢量光场. 另外一类是基于各种类型的干涉仪, 如马赫-泽德干涉仪^[10]、光学元件干涉仪^[11]、萨尼亚克干涉仪^[12]和五棱镜干涉仪^[13]等, 以及最近被提出的通过把两个正交偏振

模式的光束合成为不同空间偏振分布的光束的矢量光生成方法^[14]. 尽管这些生成矢量光束的方法能够动态地生成多种矢量光, 但是它们的缺点是光学元件和结构复杂并且激光利用效率很低.

目前飞秒矢量光束与物质相互作用的研究已经被人们所重视^[15-18], 其中生成飞秒矢量光束过程中的能量损失以及聚焦所可能引起的空气电离问题都将对实验结果产生影响, 因此建立一套结构简单、能量损失小、避免聚焦的矢量光束生成系统非常关键. 为此, 本文利用扭曲型向列液晶空间光调制器(SLMs)的扭曲效应, 通过将与前表面的分子指向矢方向一致的线偏振光转化为具有空间偏振分布光束的方法, 仅依赖一个空间光调制器便直接产生携带轴对称相位的矢量光, 观测了他们的偏振特性. 并且模拟了具有涡旋相位的矢量光的紧聚焦场, 分析了这种矢量光的聚焦特性. 这种方法的装置简便、操作容易, 几乎没有能量损失, 并且不需要聚焦, 所以在诸多领域, 譬如飞秒矢量光与物质相互作用的研究中具有重要的应用潜力.

* 国家自然科学基金(批准号: 61275133)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wangxiaolei@nankai.edu.cn

2 向列型液晶SLM调制出射光偏振态的理论解释

2.1 扭曲向列型液晶的旋光性

空间光调制器在各种现代电光实验中有着不可替代的作用, 而空间光调制器的构成基本上为一薄层适当的液晶放置在二块导电层的玻璃板之间. 我们选择的空间光调制器应用扭曲向列型

液晶, 向列型液晶分子成棒状, 分子长轴大体相互平行, 但不成层状. 长轴的方向也是光轴方向. 有外加电场时, 若分子长轴沿电场方向平行排列, 则是正介电各向异性液晶; 若分子长轴垂直于电场方向, 则是负介电各向异性液晶. 同时扭曲向列型液晶具有旋光性, 与所加的电压有关, 线偏振光的转动可以连续从 0° 到 90° . 而且它所需要的电压较其他电光效应低. 我们的空间光调制器的结构如图1所示. 其中(a)为透射式空间光调制器结构图; (b)反射式空间光调制器结构图.

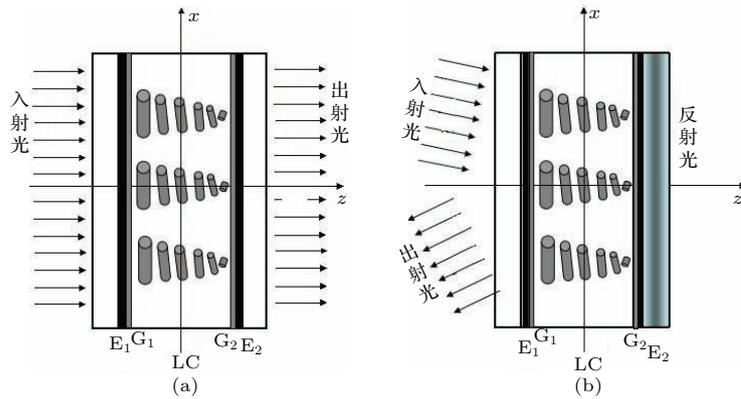


图1 (a) 透射式空间光调制器结构图; (b) 反射式空间光调制器结构图

Fig. 1. (a) Structure of transmission spatial light modulator; (b) structure of reflex spatial light modulator.

其中, G_1 和 G_2 是取向膜, E_1 和 E_2 为透明电极, LC为向列型液晶, 最外面是玻璃板. 向列型液晶的定向图式能受弱的磁场和电场影响. 采用定向排列技术在两块电极板的内表面放置取向膜, 使得加入的正介电各向异性液晶分子的长轴自动平行于电极板的定向方向. 其中两块电极板的定向方向互成 90° 放置, 内部的液晶分子的排列方向(长轴方向)将逐渐扭转, 使得从一个电极到另一个电极共扭转 90° , 当在SLM两个电极间加入一定电压时, 液晶分子旋转一定角度, 相应的出射光也旋转一定角度, 所以可以通过电压控制出射光的偏振态, 将入射的线偏光调制为空间偏振分布的矢量光.

2.2 SLM加载的灰度(电压)与出射光的偏振态关系测定

首先测定了SLM加载的灰度(电压)与出射光的偏振态的线性关系, 实验光路如图2所示. 光源为波长为532 nm的固体激光器, 通过旋转1/2波片来调制入射光的偏振态, 使得入射线偏光的偏振方向与SLM前表面的液晶分子长轴平行, 扩束后照

射SLM. 从SLM出射的光经过检偏器检偏, CCD用于观测出射光场的偏振分布.

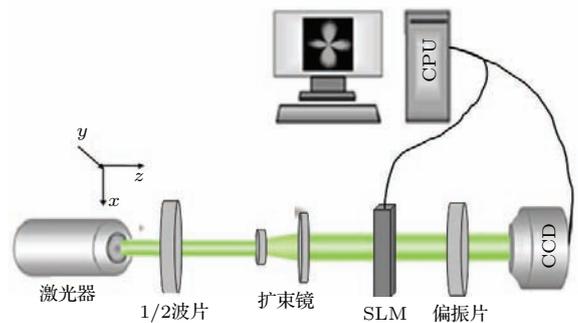


图2 基于扭曲向列液晶SLM的矢量光生成光路

Fig. 2. Generation setup of vector beams based on the TN-LC SLM.

实验中, 通过转动1/2波片, 使得入射到SLM的线偏振光偏振方向为竖直, 检偏器的透光方向为水平, 则此时CCD接收到光强度与加载灰度的线性关系如图3(a)所示. 随后, 我们转动1/2波片, 使得SLM的入射线偏光偏振方向为水平, 检偏器的透光方向为垂直, 则CCD接收到光强度与加载灰度的线性关系如图3(b)所示.

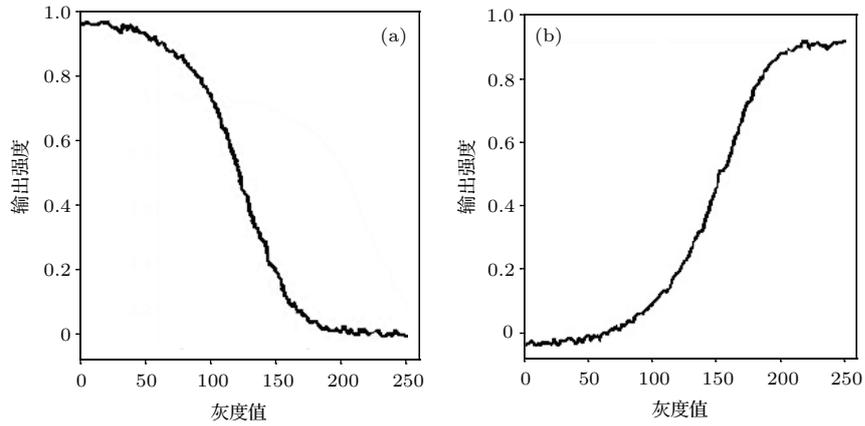


图3 SLM加载的灰度与CCD接收到的光强度的测量曲线 (a) 竖直线偏光入射; (b) 水平线偏光入射
 Fig. 3. Intensity measurements on the CCD with grey values increase loaded on the SLM: (a) vertical line polarized beam incident; (b) horizontal polarization beam incident.

可见实验中测得SLM加载的灰度(电压)与出射光的偏振态成线性关系. 通过对该关系曲线进行线性拟合, 发现该函数与正余弦函数基本符合. 可见, 通过SLM输入灰度(电压)控制出射光的偏振态, 可将入射的线偏光调制为空间偏振分布的矢量光.

3 涡旋矢量光的生成及其紧聚焦特性

我们生成矢量光束的光路如图2所示. 由于最基本的矢量光是径向矢量光和角向矢量光, 因此

这里也将生成的矢量光按角度 φ 和半径 ρ 分类. 我们通过控制SLM上加载的灰度图, 产生了多种矢量光束. 受限于SLM调制器和CCD的尺寸, 本文生成的矢量光为半径等于0.4 cm的圆形光斑. 在图4中, 第一列是生成相应矢量光时SLM上加载的灰度图, 其中, SLM上加载的灰度图灰度沿角度变化, 不过不是均匀变化, 而是与图3的线性函数相关, 即余弦变化, 在平面内变化了 m 个周期(一个周期为灰度从0到255), 同时又分为连续变化(不存在灰度跃变)和非连续变化(存在灰度从255到0

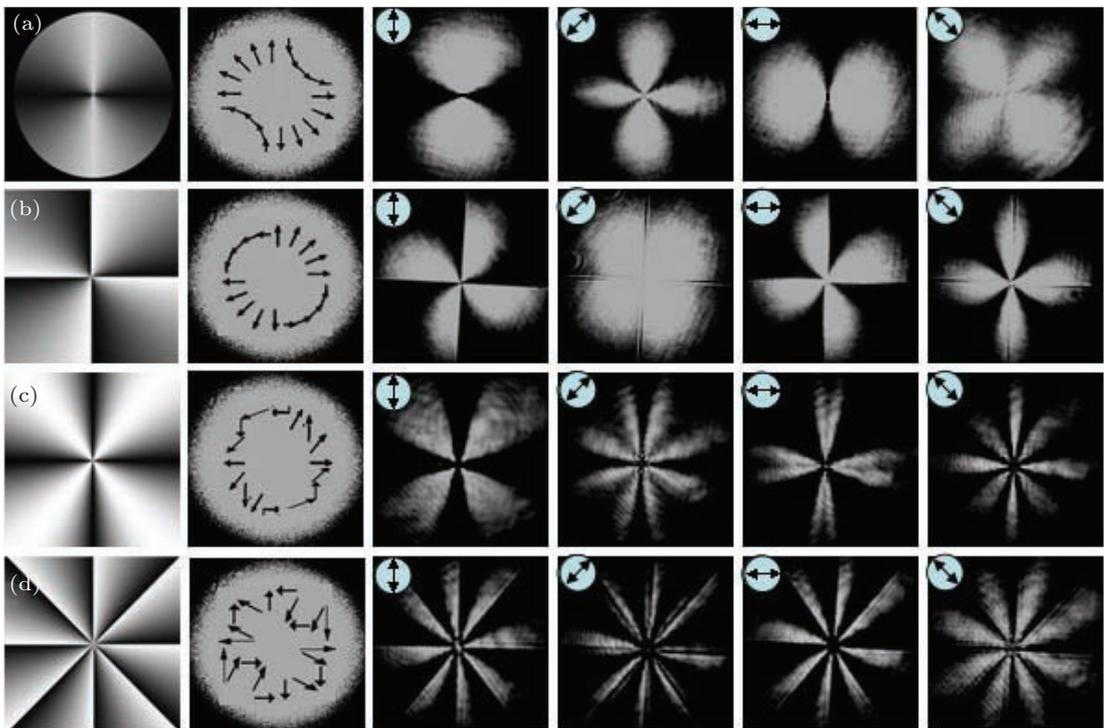


图4 偏振态随角度变化的矢量光及其偏振分布

Fig. 4. Generated vector beams with polarization changing with angle.

的跃变). 图4(a)是灰度连续变化 $m = 4$ 个周期, 而图4(b)是非连续变化 $m = 4$ 个周期. 第二列是生成的矢量光及其偏振分布, 第3, 4, 5, 6列是在检偏器的透光方向呈不同角度时 CCD 所接收到的光场分布. 图4(c)和(d)是SLM上加载了的灰度图, 在平面内变化了8个周期, 即 $m = 8$, 其中图4(c)是连续变化, 而图4(d)是非连续变化. 第二列是生成的矢量光及其偏振分布, 第3, 4, 5, 6列是检偏器的透光方向呈不同角度时 CCD 所接收到的光场分布. 所以可见, 如果整个平面内灰度随角度连续变化 m 个周期, 经过检偏器后的光场出现 $0.5m$ 或者 m 个瓣, 如果是非连续变化, 则出现 m

个瓣.

图4生成的矢量光加载了螺旋相位, 因为加载了特殊相位的矢量光的紧聚焦场会出现一些新的效应和现象 [19,20], 所以我们模拟了所生成的矢量光的紧聚焦场. 其中紧聚焦透镜的数值孔径 $NA = 1$, $f = 1$ mm. 我们分别计算了均匀相位径向光, 两周期涡旋相位矢量光(图4第1行)和四周期涡旋相位矢量光(图4第3行)的紧聚焦场, 模拟结果分别示于图5第一行、第二行和第三行. 其中第1列为沿半径 r 方向的径向分量; 第2列为沿着 z 方向的纵向分量; 第3列为沿 φ 方向的角向分量和第4列为总强度分布.

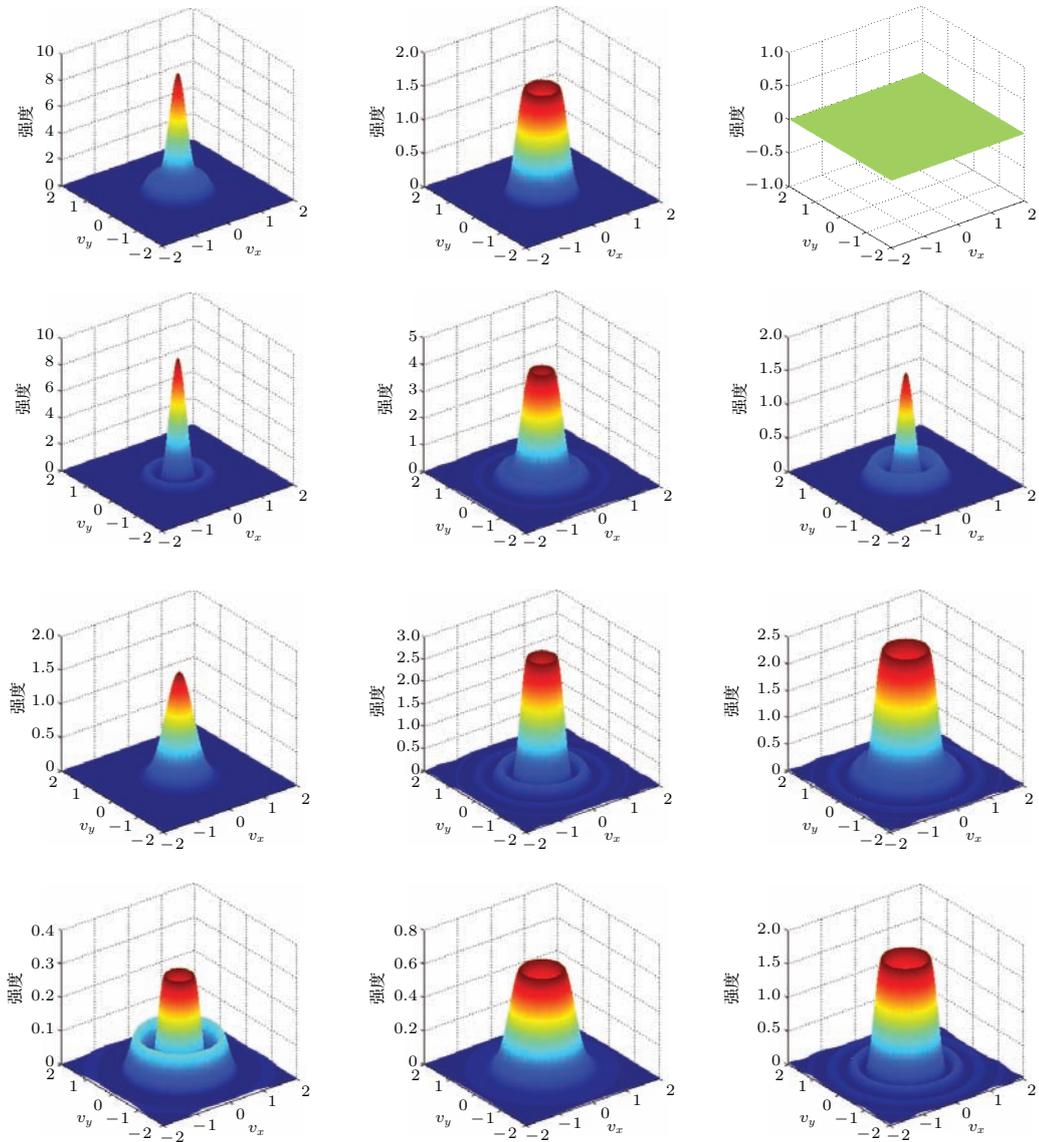


图5 涡旋矢量光的聚焦场能量分布图

Fig. 5. The focusing field intensity distribution of vector beams with phase vortices.

由图5可见,与均匀相位矢量光的聚焦场相比,涡旋相位矢量光的聚焦场能量分布不同.两周期涡旋矢量光的径向分量(图5第2行第1个),其中心为实心且周围出现环状光强分布;而对于四周期涡旋矢量光,其光强分布成为零光强的场中心和以其为圆点的环状分布,环状半径更大,且光强最大值变小.对于纵向分量(图5第2列),两周期涡旋矢量光光斑成中空分布状,四周期涡旋矢量光更为明显,且强度最大值更小.对于角向分量(图5第3列),两周期涡旋矢量光出现尖锐的实心光强分布,四周期涡旋矢量光变为中空环形分布,强度变

弱.总的强度分布也出现新的变化,都是中空环形分布,且存在外环.这些表明涡旋相位矢量光在激光聚焦加工和光镊等方面具有潜在的应用价值.

为了说明该矢量光生成方法和已有技术的一致性,本文利用文献[14]的方法,即通过把两个正交偏振模式的光束合成为不同空间偏振分布的光束,生成了和图4(a)相同的矢量光,如图6中第2行所示.通过对比这两种方法生成的同一种矢量光,可见我们提出的方法和已有技术在生成结果上的一致性.由于我们的方法光路简单,所以在同样的实验条件下,我们的方法具有优势.

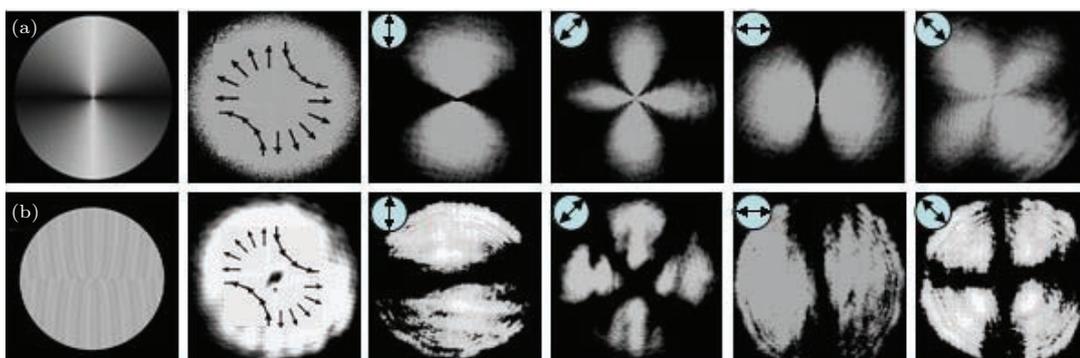


图6 本文方法与已有方法生成矢量光的对比

Fig. 6. Generation of vector beams in our method compared with existed method.

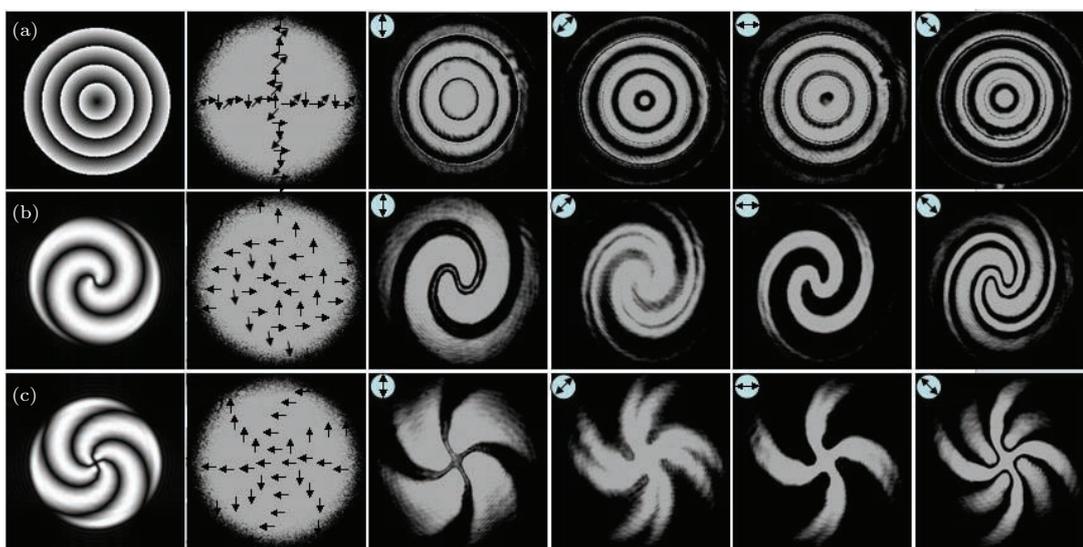


图7 偏振态随角度和半径变化的矢量光及其偏振分布

Fig. 7. Generated vector beams with polarization changing with angle and radius.

图7是灰度半径变化或者随半径和角度同时变化的情况,分析过程与图4相同.其中图7(a)是SLM上加载的灰度图,其灰度沿半径变化,随半径从0到 ρ_0 变化了2个周期,第2列是光场及其偏振

分布,第3,4,5,6列是在检偏器的透光方向呈不同角度时CCD所接收到的光场分布,可以看到经过检偏器后光场出现4个亮的同心圆环.图7(b)和(c)是SLM上加载的灰度图,同时随半径和角度变

化, 其中图 7(b) 在平面内随角度和半径都变化了 2 个周期, 而图 7(c) 是 SLM 上加载的灰度图在平面内随半径变化 2 个周期, 随角度反向变化 4 个周期; 同理, 第 2 列是光场及其偏振分布, 第 3, 4, 5, 6 列是检偏器的透光方向呈不同角度时 CCD 所接收到的光场分布, 可见生成矢量光的偏振态随角度和半径都发生了复杂的变化, 但是实际规律也是半径和角度规律的叠加.

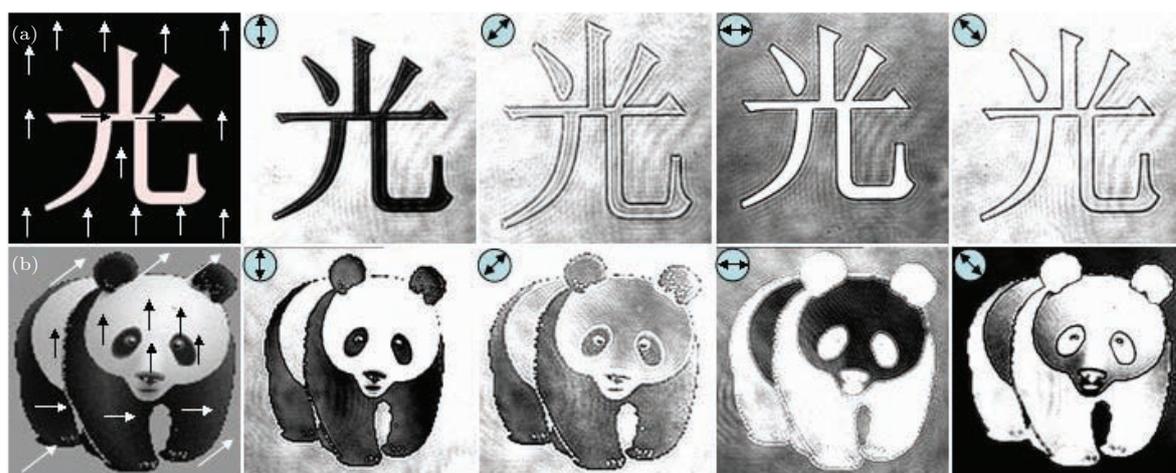


图 8 偏振随汉字和复杂图像变化的矢量光及其偏振分布

Fig. 8. Generation of vector beams with complex polarization like Chinese character and image.

总之, 通过利用扭曲向列型液晶 SLM 的旋光效应可生成多种空间偏振矢量光, 其中既可以生成当前应用广泛的多种偏振分布轴对称的矢量光, 并且也可以生成偏振分布随汉字或者更复杂的图像灰度变化的矢量光. 本文的实验结果很好地证实了这一点. 由于这种方法装置简单, 操作容易, 并且几乎没有能量损失, 不需要聚焦, 因此在强激光矢量光束微加工等方面有重要的应用前景.

4 结 论

本文通过扭曲型向列液晶空间光调制器 (SLMs) 直接产生各种复杂矢量光. 文章首先研究了空间光调制器的扭曲效应, 得到了 SLM 所加载电压和旋光角度的对应关系. 在此基础上设计了生成多种矢量光的通用光路, 在实验上获得了质量较好的多种轴对称的矢量光和一些复杂的矢量光. 该方法克服了传统方法中没有通用的和动态的光学元件与结构、以及激光利用效率低的缺点, 具有不存在能量损失、不需要聚焦等特点, 而且具有涡旋相位的矢量光的紧聚焦场出现新的能量分布, 因此

图 8 是灰度随汉字或者复杂图案变化的情况. 这里为了观察复杂矢量光的偏振分布, 所用光束较大, 覆盖了整个 CCD 靶面, 所以采集的图样如下图所示. 其中图 8(a) 是 SLM 加载的灰度图汉字“光”; 图 8(b) 是 SLM 加载的灰度图熊猫, 并且图中表明了它们生成矢量光的偏振方向. 第 2, 3, 4, 5 列是检偏器的透光方向呈不同角度时 CCD 所接收的光场分布.

在飞秒矢量光的微加工等方面具有非常重要的应用潜力.

参考文献

- [1] Liu T, Tan J, Liu J 2013 *Opt. Commun.* **294** 21
- [2] Song W T, Lin F, Fang Z Y, Zhu X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6921 (in Chinese) [宋文涛, 林峰, 方哲宇, 朱星 2010 物理学报 **59** 6921]
- [3] Donato M G, Vasi S, Sayed R, Jones P H, Bonaccorso F, Ferrari A C, Gucciardi P G, Maragò O M 2012 *Opt. Lett.* **37** 3381
- [4] Wang W T, Hu B, Wang M W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 060601 (in Chinese) [王文亭, 胡冰, 王明伟 2013 物理学报 **62** 060601]
- [5] Zhan Q W 2009 *Adv. Opt. Photonics.* **1** 1
- [6] Xu F, Ford J E, Fainman Y 1995 *Appl. Opt.* **34** 256
- [7] Ren H W, Lin Y H, Wu S T 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 051114
- [8] Desyatnikov A, Fadeyeva T A, Shvedov V G, Izdebskaya Y V, Volyar A V, Brasselet E, Neshev D N, Krolikowski W, Kivshar Y S 2010 *Opt. Express.* **18** 10848
- [9] Bomzon Z, Kleiner V, Hasman E 2001 *Opt. Lett.* **26** 33
- [10] Tidwell S C, Ford D H, Kimura W D 1990 *Appl. Opt.* **29** 2234

- [11] Toussaint K C, Park Jr S, Jureller J E, Scherer N F 2005 *Opt. Lett.* **30** 2846
- [12] Niziev V G, Chang R S, Nesterov A V 2006 *Appl. Opt.* **45** 8393
- [13] Han C Y, Chang R S, Chen H F 2013 *Opt. Rev.* **20** 189
- [14] Wang X L, Ding J P, Ni W J, Guo C S, Wang H T 2007 *Opt. Lett.* **32** 3549
- [15] Lou K, Qian S X, Wang X L, Wang H T 2012 *Opt. Express.* **20** 120
- [16] Sakabe S, Hashida M, Tokuta S, Namba S, Okamuro K 2009 *Phys. Rev. B* **79** 033409
- [17] Ganeev R A, Baba M, Ozaki T, Kuroda H 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 1077
- [18] Harzic R L, Sauer D D, Neumeier M, Epple M, Zimmermann H, Stracke F 2011 *Phys. Procedia.* **12** 29
- [19] Hao X, Kuang C F, Wang T T, Liu X 2010 *Opt. Lett.* **35** 3928
- [20] Rao L, Pu J, Chen Z, Pu Y 2009 *Opt. Laser Technol.* **41** 241

Generation of vector beams in terms of the partial light modulator of a twisted nematic liquid crystal*

Xi Si-Xing Wang Xiao-Lei[†] Huang Shuai Chang Sheng-Jiang Lin Lie

(Institute of Modern Optics, Key Laboratory of Optical Information Science and Technology, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300071, China)

(Received 18 June 2014; revised manuscript received 1 November 2014)

Abstract

We propose a vector beam generation method based on the spatial light modulator composed of twisted nematic liquid crystal. According to the relation between the rotation angle and the applied voltage on the spatial light modulator, a common optical system for generating a variety of vector beams is designed in experiments. By using this common optical system, a variety of vector beams in axisymmetric phases as well as the complex vector beams are generated, and their polarization characteristics are observed and measured experimentally, where a tight focusing field is obtained, and this may be applied in optical tweezers and lithography. In addition, the device structure is simple and easy to operate, its efficiency of producing vector beam is very high and the laser spectral characteristics are not changed in the proposed generation of vector beams. Therefore, the method we proposed can find important potential applications in strong laser of vector beams interacting with matter, and laser acceleration, etc.

Keywords: vector beams, liquid crystal, optical rotation

PACS: 42.25.Ja, 42.70.Df, 33.55.Ad

DOI: 10.7498/aps.64.114204

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61275133).

† Corresponding author. E-mail: wangxiaolei@nankai.edu.cn