

基于光学全息的任意矢量光的生成方法

席思星 王晓雷 黄帅 常胜江 林列

Generation of arbitrary vector beam based on optical holography

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

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 124202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.124202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于扭曲向列液晶空间光调制器的矢量光生成

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

物理学报.2015, 64(11): 114204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114204>

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>

# 基于光学全息的任意矢量光的生成方法\*

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10月7日收到; 2014年11月28日收到修改稿)

基于光学全息的角度复用特性, 根据空间光调制器对光场的相位和振幅调制原理, 通过加载产生任意矢量光所需要的相位分布, 设计了一种生成任意矢量光的方法. 该方法首先利用光学全息技术记录空间光调制器加载的相位, 从而制作一个全息光栅; 再现过程中, 两束具有相同入射角度的参考光照射全息光栅, 使得两束再现光相干叠加, 进而获得可调控的任意矢量光. 该方法能够避免复杂偏振态的出现, 并且具有生成光路简单、方便操作、生成矢量光的偏振纯度高等优势. 通过计算机模拟生成了任意矢量光, 获得了很好的效果.

**关键词:** 全息, 空间光调制器, 角度复用, 任意矢量光

**PACS:** 42.25.Ja, 42.40.Jv

**DOI:** 10.7498/aps.64.124202

## 1 引言

近年来, 相比于均匀偏振光束, 矢量光束引起了人们的广泛关注. 对于矢量光束而言, 其偏振态分布是空间变化的, 这种独特的偏振性使得矢量光场具有许多新颖性质, 在众多科学领域有着重要的学术价值和潜在的应用价值. 两种最典型的矢量光束是径向矢量光束和角向矢量光束, 径向偏振光和角向偏振光的偏振态分布与电磁场  $TM_{01}$  模和  $TE_{01}$  模电矢量分布一致. 1972年, 人们在实验上生成了径向偏振光和角向偏振光, 它们都具有独特的性能并被广泛应用<sup>[1]</sup>. 一个径向矢量光束通过紧聚焦可以在焦平面附近集中产生强大的纵向场; 另一方面, 一个角向矢量光束通过紧聚焦可以集中到一个空心暗点. 这些独特的性能可以被应用于高分辨率成像<sup>[2]</sup>、表面等离子体<sup>[3]</sup>、纳米操纵<sup>[4]</sup>、激光加工<sup>[5]</sup>、遥感<sup>[6]</sup>和奇点光学等<sup>[7]</sup>诸多领域, 并且也适用于粒子的光学捕获和操纵<sup>[8,9]</sup>.

根据是否需要增益介质, 可将生成矢量光的方法分为主动法和被动法. 主动法是通过设计激光器特殊的谐振腔, 直接输出相应的矢量分布激

光. 被动法则是通过在激光器谐振腔外, 采用一些光学元件或者光学方法设计特殊的光路, 将常规激光转化为矢量分布激光. 主动法可以获得很高的效率, 但是一旦设计好激光器谐振腔, 矢量光场的类型就已经确定. 而被动法具有很强的灵活性, 可以通过简单地替换一两个光学元件调节光路就可获得新的矢量光场. 特别地, 因为空间光调制器 (SLM) 可以灵活地设计任意空间相位或幅度调制所需的光学模式, 这使得被动生成法的灵活性更高. 例如文献<sup>[10]</sup>利用扭曲向列液晶空间光调制器 (TNLC-SLM) 和成像系统生成了矢量光; 文献<sup>[11]</sup>结合 SLM 和其他波片 (调节相位) 结构的方法生成了矢量光; Liu 等<sup>[12]</sup>将计算全息和干涉光路相结合生成了矢量光; 文献<sup>[13]</sup>基于新颖的光学器件生成了矢量光和目前应用广泛的基于  $4f$  滤波系统的生成任意矢量光束的方法<sup>[14-16]</sup>. 这些方法都忽略了液晶或材料本身对光束偏振态的改变 (如会出现椭圆偏振分布情况等). 本文直接利用光学全息技术拍摄全息光栅, 并结合全息中的角度复用技术设计了矢量光的生成系统. 该方法通过全息光栅再现生成矢量光的光路不需要 SLM, 避免了复杂偏振态的出现, 因此具有生成光路简单、方便操作、生成矢量

\* 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

光的偏振纯度高等优势. 与基于  $4f$  滤波系统的生成任意矢量光束的方法相比<sup>[15]</sup>, 该方法的激光能量利用效率明显提高.

### 2 光学全息术制作全息光栅

利用光学全息技术, 用全息干板记录 SLM 上加载的相位, 制作矢量光生成需要的全息光栅. 全息光栅的制作光路如图 1 所示. 图 1 中, 激光器出射竖直线偏光, 半波片用于调整出射光的偏振方向. 激光束经过扩束镜扩束准直, 然后经过分束镜分束, 一束作为物光  $o(x, y)$  照射 SLM 加载相位  $\varphi(x, y)$ , 可以描述为

$$o(x, y) = o(x, y) e^{-i\varphi_0(x, y)}. \quad (1)$$

另一束作为参考光  $a(x, y) e^{i2\pi\alpha y}$  与物光在全息干板上相干叠加. 参考光与物光的夹角为  $\alpha$ , 为提高衍射光的效率和质量并保证相干条件,  $\alpha$  设计为较小的角度. 全息干版记录的光强分布为

$$I(x, y) = |a(x, y)|^2 + |o(x, y)|^2$$

$$\begin{aligned} &+ a(x, y) e^{-i\varphi_0(x, y)} o^*(x, y) e^{i2\pi\alpha y} \\ &+ a^*(x, y) e^{i\varphi_0(x, y)} \\ &\times o(x, y) e^{-i2\pi\alpha y}, \end{aligned} \quad (2)$$

其透过率函数可以描述为  $t(x, y) = t_b + \beta I$ , 其中  $\beta$  为大于 0 小于 1 的常数, 与全息干板的类型有关, 我们选择  $\beta$  尽量大的全息干板. 通过在 SLM 上加载灰度图像, 可使物光带有相应的相位分布, 而全息光栅则记录了物光包含的相位分布. 图 2 所示为 SLM 中输入的灰度图像和生成的全息光栅.

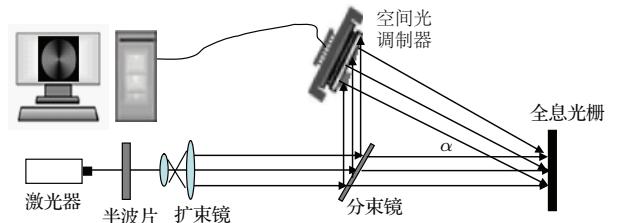


图 1 全息光栅的制作光路图

Fig. 1. The optical setup of the production of holographic grating.

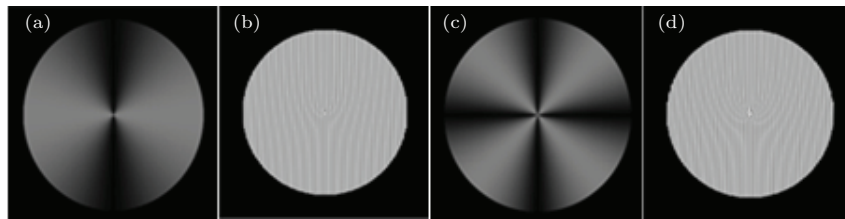


图 2 SLM 加载不同灰度图像及生成的全息光栅 (a)  $\varphi_0 = \varphi + \pi/2$  的灰度图; (b) 当 SLM 上加载 (a) 图时所生成的全息光栅; (c)  $\varphi_0 = 2\varphi + \pi/2$  的灰度图; (d) 当 SLM 上加载 (c) 图时所生成的全息光栅

Fig. 2. The gray images loaded on the spatial light modulator and the generated holographic grating: panel (a) is the gray image when  $\varphi_0 = \varphi + \pi/2$ ; panel (b) is the generated holographic grating from panel (a); panel (c) is the grayscale image when  $\varphi_0 = 2\varphi + \pi/2$ ; panel (d) is the generated holographic grating from panel (c).

### 3 利用全息光栅产生任意矢量光束

利用与全息光栅生成光路相同的激光与扩束

系统, 引入沃拉斯顿棱镜产生同角度的两束参考光, 分别经过两个反射镜后以相同的入射角度照射全息光栅, 其中两束参考光与水平方向的夹角都为  $\alpha$ . 图 3 方框 1 中两束参考光照射全息光栅, 再现的

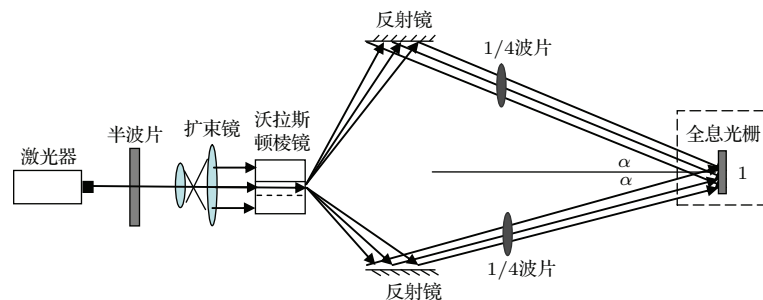


图 3 全息光栅再现光路图

Fig. 3. The optical setup of the representation of the holographic grating.

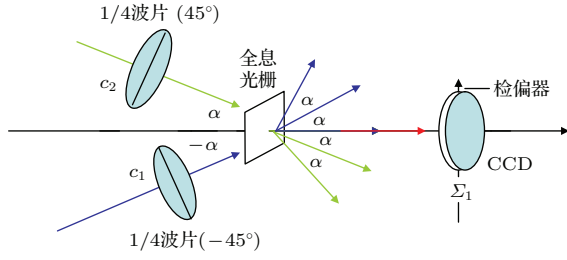


图4 全息光栅再现合束生成矢量光的示意图

Fig. 4. The diagram of combining the diffraction beams of the holographic grating into the vector beam.

衍射光相干叠加的过程如图4所示。

图4中的两束参考光中分别置一个1/4波片,分别与垂直方向成正负45°放置,可以将两束参考光调制为左旋偏振光 $c_1$ 和右旋偏振光 $c_2$ :

$$c_2(x, y) = c_2 e^{i2\pi\alpha y} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$c_1(x, y) = c_1 e^{-i2\pi\alpha y} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}. \quad (4)$$

原参考光( $c_1$ )照射全息光栅再现如下式:

$$\begin{aligned} c_1(x, y)t(x, y) &= c_1(x, y) \times (t_b + \beta I) \\ &= u_{11} + u_{12} + u_{13} + u_{14}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} u_{11} &= t_b c_1 e^{-i2\pi\alpha y} + \beta c_1 |\mathbf{a}(x, y)|^2, \\ u_{12} &= \beta c_1 e^{-i2\pi\alpha y} |\mathbf{o}(x, y)|^2, \\ u_{14} &= \beta c_1 a^*(x, y) e^{i\varphi(x, y)} o(x, y) e^{-i4\pi\alpha y}, \\ u_{13} &= \beta c_1 a(x, y) e^{-i\varphi(x, y)} o^*(x, y). \end{aligned}$$

从(5)式可见,参考光 $c_1$ 的再现光为三束,并且它们的偏振态都为左旋偏振,它们的方向角度分别为0,  $\alpha$ ,  $2\alpha$ .同理,

$$\begin{aligned} c_2(x, y)t(x, y) &= c_2(x, y) \times (t_b + \beta I) \\ &= u_{21} + u_{22} + u_{23} + u_{24}, \end{aligned} \quad (6)$$

参考光 $c_2$ 的再现光为三束,并且他们的偏振态都为右旋偏振,它们的方向角度分别为0,  $-\alpha$ ,  $-2\alpha$ .

其中原方向的 $u_{13}$ 和 $u_{24}$ 相干叠加,

$$\begin{aligned} u_{13} + u_{24} &= \beta e^{-i\varphi_0(x, y)} o^*(x, y) \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \\ &+ \beta e^{i\varphi_0(x, y)} o(x, y) \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

进一步化简

$$\begin{aligned} u_{13} + u_{24} &= o^*(x, y) e^{-i\varphi_0(x, y)} (e_x + i e_y) \\ &+ o(x, y) e^{i\varphi_0(x, y)} (e_x - i e_y) \\ &= o(x, y) (\cos(\varphi_0) e_x + \sin(\varphi_0) e_y), \end{aligned} \quad (8)$$

这里 $o(x, y)$ 为实值,所以利用柱坐标系与直角坐标系的转换关系,

$$e_x = o(x, y) (\cos(\varphi) e_\rho + \sin(\varphi) e_\varphi), \quad (9)$$

$$e_y = o(x, y) (\sin(\varphi) e_\rho + \cos(\varphi) e_\varphi). \quad (10)$$

则原方向的出射光可表示为

$$f = o(x, y) [\cos(\varphi_0 - \varphi) e_\rho + \sin(\varphi_0 - \varphi) e_\varphi].$$

由于 $\varphi(x, y)$ 为加载到SLM上的任意灰度分布,所以 $f$ 可以调制为任意矢量光.假设 $\varphi_0 = \varphi$ ,则 $f = o(x, y) e_\rho$ 为径向矢量光;若 $\varphi_0 = \varphi + \pi/2$ ,则 $f = o(x, y) e_\varphi$ 为角向矢量光.

为了验证该实验光路的可行性,我们对沃拉斯顿棱镜进行了实验测量,分束后获得了角度完全相等的两束光,而且没有带来明显的相位差.因此,只要后面的光路设置合理,便可以保证到达全息光栅上同一点的两光束不存在相位差.而且在全息光栅再现光路中,可以让激光先通过沃拉斯顿棱镜再进行扩束准直,所以沃拉斯顿棱镜不会限制生成矢量光的尺寸.总之,本文生成的矢量光的尺寸存在较大的灵活性.

## 4 角度相关的矢量光生成与分析

令SLM加载的灰度分布随角度变化,与相位角 $\varphi$ 的关系为 $\varphi_0 = m\varphi + \delta$ .当 $\delta = 0$ ,  $m = 1$ 时,图5第一行所示分别为SLM加载的图像、生成的全息光栅、全息光栅再现生成的矢量光及其偏振态分布和经过水平检偏器后的光场分布.图5中第二、第三、第四行分别为 $m = 2, 3, 4$ 的情况( $\delta$ 均等于零).图5表明,该方法可生成偏振态分布与角度相关的矢量光,经过检偏器后的光场出现 $2m$ 个消光线,矢量光具有很好的效果.本文中全息光栅再现产生矢量光是一个衍射的过程,衍射距离太长会增加圆孔衍射的影响.为了说明生成矢量光的应用价值,本文选取的衍射距离为0.3 m,尽管此时圆孔衍射的效果比较明显,但是生成矢量光的偏振分布很好,因此仍然具有较好的应用价值.

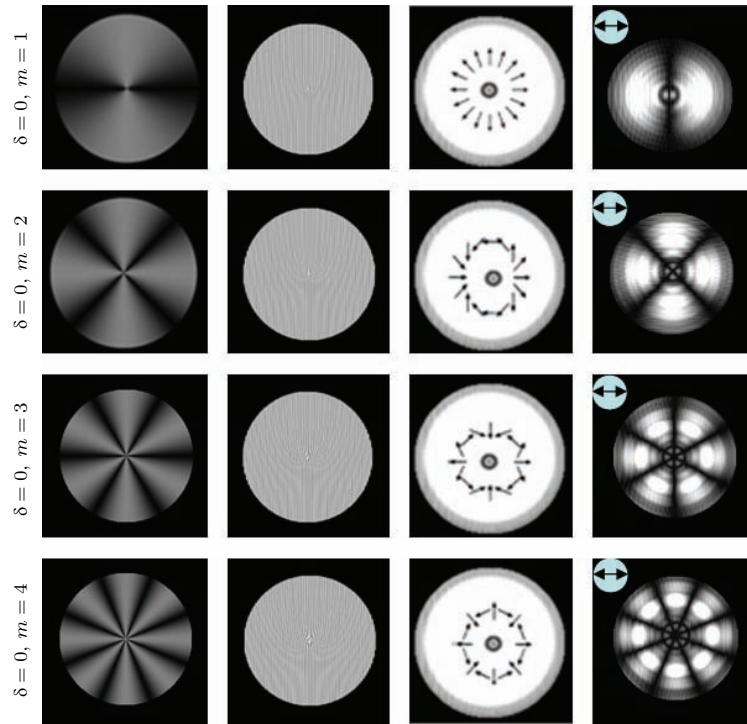


图5 第一列为SLM上加载的灰度图像; 第二列为生成的全息光栅; 第三列为生成矢量光的偏振态分布; 第四列为矢量光经过水平检偏器后的光场分布图. 第一、第二、第三、第四行分别对应  $m = 1, 2, 3, 4$

Fig. 5. The first column is the loaded gray image. The second column is the generated holographic grating. The third column is the vector beams and the polarization distribution. The fourth column is the optical distribution after horizontal detector. Lines 1, 2, 3, 4 represent the station of  $m = 1, 2, 3, 4$ , respectively.

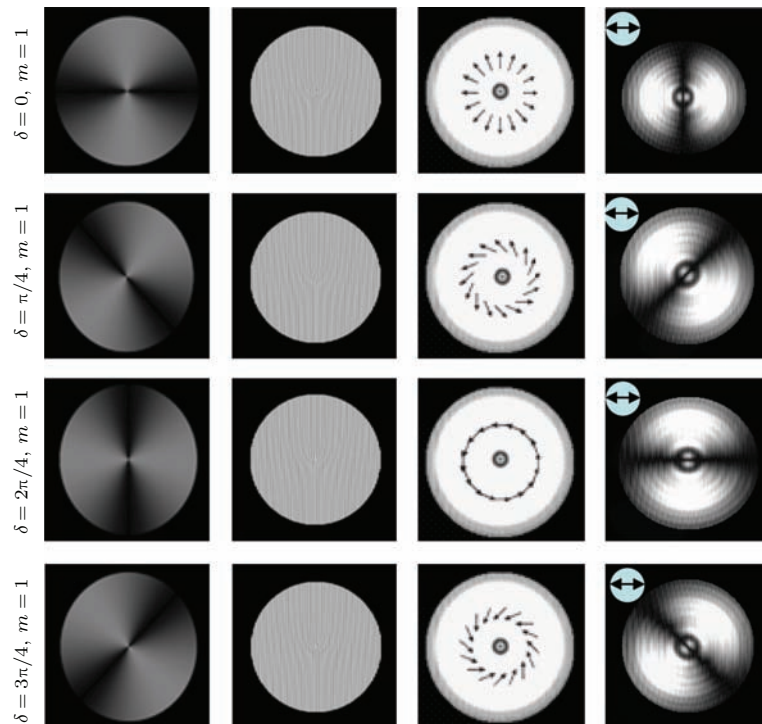


图6 第一列为SLM上加载的灰度图像; 第二列为生成的全息光栅; 第三列为生成矢量光的偏振态分布; 第四列为矢量光经过水平检偏器后的光场分布图. 第一、第二、第三、第四行分别对应  $\delta = 0, \pi/4, 2\pi/4, 3\pi/4$  的情况

Fig. 6. The first column is the loaded gray image. The second column is the generated holographic grating. The third column is the vector beams and the polarization distribution. The fourth column is the optical distribution after horizontal detector. Lines 1, 2, 3, 4 represent the station of  $\delta = 0, \pi/4, 2\pi/4, 3\pi/4$ , respectively.

下面生成偏振态随 $\delta$ 变化的矢量光, SLM上加载的灰度图与相位角 $\varphi$ 的关系为 $\varphi_0 = m\varphi + \delta$ . 图6第一行表示 $m = 1, \delta = 0$ 的情况, 分别为SLM加载的图像、生成的全息光栅、全息光栅再现生成矢量光及其偏振态分布和经过水平检偏器后的光场分布. 第二、第三、第四行分别对应 $\delta = \pi/4, 2\pi/4, 3\pi/4$ 的情况( $m$ 均等于1). 图6中消光线改变了与 $\delta$ 相对应的角度, 即矢量光的偏振角度也整体改变了 $\delta$ , 生成矢量光效果较好. 此外, 我们计算了文献[14]生成任意矢量光束方法的激光利用效率 $\mu \frac{\varpi_{\text{矢量光}}}{\varpi_{\text{出射光}}} = 4.7\%$  (其中 $\mu$ 表示激光利用效率,  $\varpi$ 表示光束平均功率). 而本文中生成矢量光的激光利用效率 $\mu \frac{\varpi_{\text{矢量光}}}{\varpi_{\text{出射光}}} = 22.8\%$ , 这充分说明本文方法

能够有效地提高激光的利用效率.

### 5 半径相关的矢量光生成与分析

下面生成偏振态随半径 $\rho$ 变化的矢量光, SLM上加载的灰度图与半径 $\rho$ 的关系为 $\varphi_0 = \pi n\rho/\rho_0 + \delta$ ,  $\rho_0$ 为光斑半径.  $n = 1, \delta = 0$ 的情况如图7第一行所示, 分别为SLM加载的图像、生成的全息光栅、全息光栅再现生成矢量光及其偏振态分布和经过水平检偏器后的光场分布. 图7第二、第三、第四行分别对应 $n = 2, 3, 4$ 的情况( $\delta$ 均等于零). 可见生成了偏振态随半径变化的矢量光, 经过检偏器后的光场出现了圆环消光线, 且消光线的个数为 $n$ , 生成矢量光的效果较好.

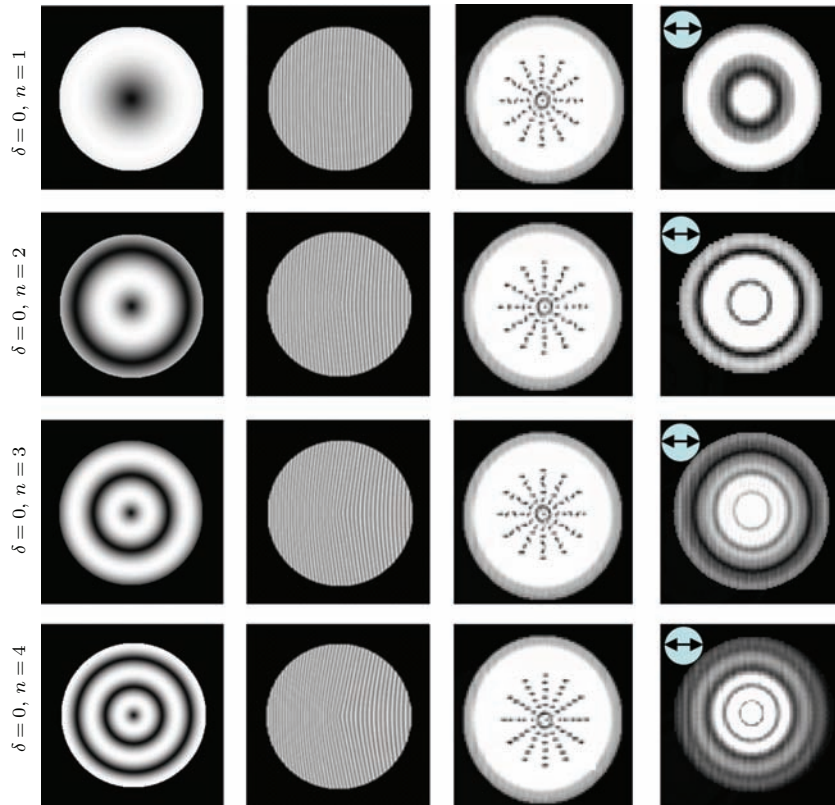


图7 第一列为SLM上加载的灰度图像; 第二列为生成的全息光栅; 第三列为生成矢量光的偏振态分布; 第四列为矢量光经过水平检偏器后的光场分布图. 第一、第二、第三、第四行分别对应 $n = 1, 2, 3, 4$ 的情况

Fig. 7. The first column is the loaded gray image. The second column is the generated holographic grating. The third column is the vector beams and the polarization distribution. The fourth column is the optical distribution after horizontal detector. Lines 1, 2, 3, 4 represent the station of  $n = 1, 2, 3, 4$ , respectively.

### 6 角度和半径相关的矢量光生成与分析

下面生成偏振态同时随半径 $\rho$ 和角度 $\delta$ 变化的

矢量光, SLM上加载的灰度图与半径 $\rho$ 和角度 $\delta$ 的关系为 $\varphi_0 = m\varphi + \pi n\rho/\rho_0 + \delta$ .  $m = 1, n = 1, \delta = 0$ 的情况如图8第一行所示, 分别为SLM加载的图像、生成的全息光栅、全息光栅再现生成矢量光及其偏振态分布和经过水平检偏器后的光场分

布. 图8第二、第三、第四行分别为  $m = 2, n = 1, \delta = 0$ ;  $m = -1, n = 1, \delta = 0$ ;  $m = -2, n = 1, \delta = 0$  的情况. 可见生成了偏振态同时随半径和角

度变化的矢量光, 经过检偏器后的光场出现了螺旋消光线; 消光线的个数为  $2m$ , 且转过了  $n \times 2\pi$  的角度, 生成矢量光的效果较好.

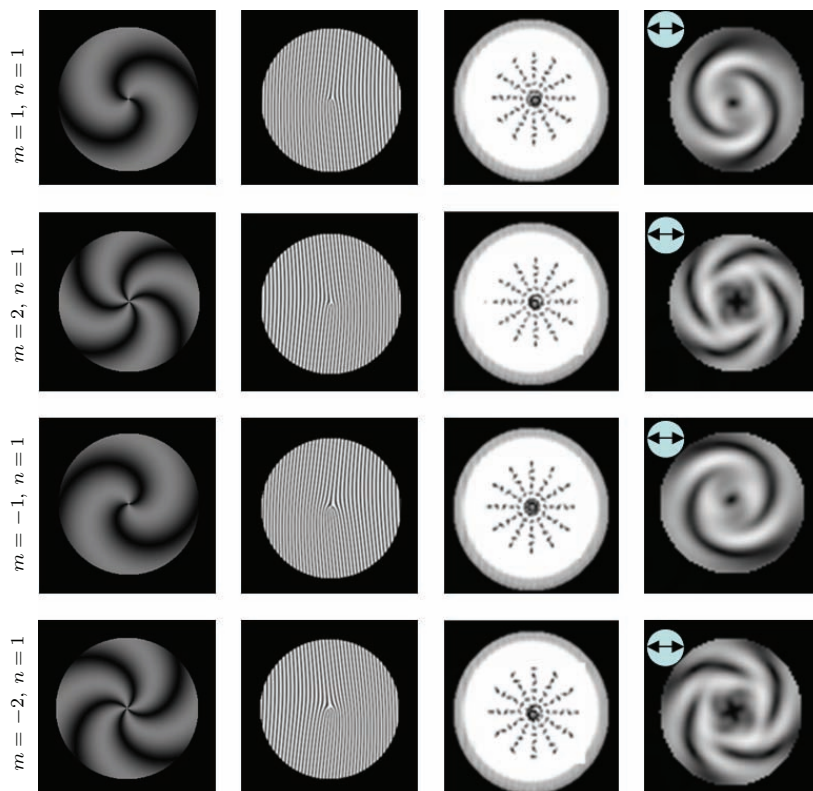


图8 第一列为SLM上加载的灰度图像; 第二列为生成的全息光栅; 第三列为生成矢量光的偏振态分布; 第四列为矢量光经过水平检偏器后的光场分布图. 第一、第二、第三、第四行分别对应  $\delta = 0, m = 1, n = 1$ ;  $\delta = 0, m = 2, n = 1$ ;  $\delta = 0, m = -1, n = 1$ ;  $\delta = 0, m = -2, n = 1$

Fig. 8. The first column is the loaded gray image. The second column is the generated holographic grating. The third column is the vector beams and the polarization distribution. The fourth column is the optical distribution after horizontal detector. Lines 1, 2, 3, 4 represent the station of  $\delta = 0, m = 1, n = 1$ ;  $\delta = 0, m = 2, n = 1$ ;  $\delta = 0, m = -1, n = 1$ ;  $\delta = 0, m = -2, n = 1$ , respectively.

## 7 结 论

本文提出了一种利用光学全息生成任意矢量光的方法, 该方法不需要经过两次衍射滤除零级波, 解决了系统的能量效率低的缺点. 此外, 由于该方法克服了SLM的衍射光的偏振态受加载灰度值影响的问题, 因此生成任意矢量光的光路比较简单. 最后, 通过利用SLM的振幅调制特性, 可以调制矢量光的振幅, 获得振幅可调控的任意矢量光.

## 参考文献

[1] Pohl D 1972 *Appl. Phys. Lett.* **20** 266  
 [2] Liu T, Tan J, Liu J 2013 *Opt. Commun.* **294** 21

[3] 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]  
 [4] 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  
 [5] 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]  
 [6] Pu J X, Wang T, Lin H C, Li C L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 089201  
 [7] Zhan Q W 2009 *Adv. Opt. Photon.* **1** 1  
 [8] Lu F, Huang Z 2009 *Opt. Lett.* **34** 1870  
 [9] Chiou P Y, Ohta A T, Wu M C 2005 *Nature* **436** 370  
 [10] Qi J L, Li X J, Wang W H, Wang X F, Sun W C 2013 *Appl. Opt.* **52** 8369  
 [11] Guo C S, Rong Z Y, Wang S Z 2014 *Opt. Lett.* **39** 386  
 [12] Liu S, Li P, Peng T, Zhao J L 2012 *Opt. Express* **20** 21715

- [13] Han W, Yang Y F, Cheng W, Zhan Q W 2013 *Opt. Express* **21** 20692  
[14] Chen H, Hao J J, Zhang B F, Xu J, Ding J P, Wang H T 2011 *Opt. Lett.* **15** 3179

- [15] Wang X L, Wang H T 2007 *Opt. Lett.* **32** 3549  
[16] Li Y G, Wang X L, Zhao H, Wang H T 2012 *Opt. Lett.* **37** 1790

## Generation of arbitrary vector beam based on optical holography\*

Xi Si-Xing Wang Xiao-Lei<sup>†</sup> Huang Shuai Chang Sheng-Jiang Lin Lie

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

( Received 7 October 2014; revised manuscript received 28 November 2014 )

### Abstract

According to the phase and amplitude modulation of the spatial light modulator (SLM) loading the phase distribution for generating arbitrary vector beams, we present a method of generating arbitrary vector beams based on the optical holography with angle multiplexing. First of all, we use the optical holography to record the special phase distribution on the SLM, and so an optical holographic grating is obtained. In the reproduction process, the two conjugate reference beams with the same incident angle illuminate the holographic grating and the superposition of the two reproduced beams is achieved, thus the arbitrary vector beams are obtained. This method can avoid the emergence of complex polarization distribution, and has advantages such as simple optical setup, convenient operation, and higher polarization purity of generated arbitrary vector beams. Good results of the arbitrary vector beams are also obtained by computer simulation.

**Keywords:** holographic, spatial light modulator, angle multiplexing, arbitrary vector beam

**PACS:** 42.25.Ja, 42.40.Jv

**DOI:** 10.7498/aps.64.124202

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

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: wangxiaolei@nankai.edu.cn