

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2017.03.019

空间波片偏振调制生成矢量光束的模拟研究

史成芳¹, 荆建立¹, 郭明磊^{2,3}

1. 蚌埠学院机械与电子工程系, 蚌埠 233030; 2. 安徽科技学院理学院, 滁州 233100;
3. 南京师范大学纳米光子学实验室, 南京 210023.

摘要: 为了研究空间可变波片偏振调制生成矢量光束的方法, 本文借助琼斯矢量和琼斯矩阵较深入地分析了任意阶拉盖尔-高斯螺旋光束通过空间偏振转换器件生成矢量光束的过程, 并根据数学模型对矢量光束的远场强度分布进行了数值仿真. 仿真结果表明: 线偏振和圆偏振的基模光束可分别通过空间半波片和空间四分之一波片转化生成矢量光束, 且随着空间波片阶数的提高, 输出光束暗核逐渐增大; 空间波片对螺旋光束的作用可以等效为两个正交圆偏振的螺旋分量的叠加, 通过轨道角动量偏振检测仿真, 证实了该方法的正确性.

关键词: 矢量光束; 琼斯矩阵; 空间可变波片; 螺旋光束

中图分类号: O436.1, O438.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2017)03-0541-06

Simulation of the vector beams generated by the polarization modulation of the spatial variant wave-plate

SHI Cheng-Fang¹, JING Jian-Li¹, GUO Ming-Lei^{2,3}

(1. Mechanical and electrical college, Bengbu university, Bengbu 233030, China;
2. College of Science, Anhui University of Science and Technology, Chuzhou 233100, China;
3. Nano-photonics Laboratory, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to study the generation of the vector beams by using the polarization modulation of the spatial variant wave-plate, the Jones vectors and Jones matrix are used to further discuss the process, in which an arbitrary Laguerre-Gaussian beam can be transformed into vector beam. Based on the mathematical mode, the far-field intensity distributions of the generated vector beams have been simulated by numerical method. The simulated results show that, the line-polarized and circularly polarized beams with basic mode can be converted to vector beams by using spatial variant half-wavelength plate and quarter wavelength plate respectively, and the dark core of the output beam increases with an increase of the order of the spatial variant wave-plate. The effects of the spatial variant wave-plate on the helical beams can be equivalent to the superposition of two mutually orthogonal circularly polarized helical beams. The polarization test of the orbital angular momentum confirms the practicability of this method.

Keywords: Vector beam; Jones matrix; Spatial variant wave-plate; Helical beam

收稿日期: 2015-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(61475073); 安徽省自然科学基金项目(KJ2012Z240); 蚌埠学院科研项目(2015ZR13)

作者简介: 史成芳(1976-)女, 山东日照人, 硕士, 讲师, 从事电子学及光电技术应用研究. E-mail: scf322@163.com.

1 引言

矢量光束是一种空间非均匀偏振光束,其光束中心偏振方向的不确定导致其场强在中心出现奇点.光场的矢量特性对光波的传输和与物质的相互作用等有重要的影响,因此矢量光束在许多实际应用中表现出新的物理特性^[1-5]:光强分布可以出现 doughnut 中空环形光斑^[4];在高数值孔径透镜聚焦下柱状偏振矢量光形成紧压缩焦点等^[6].近年来,矢量光束特别是径向光束和切向光束由于其独特的偏振特性,在高分辨受激损耗显微成像、微观粒子操控、光信息编码等方面得到了广泛应用^[7-10].另外,实验表明,对于左手材料和磁性材料^[11],矢量光束能激发产生新的表面激元波效应^[12,13].有关矢量光束的产生,已经成为国内外研究的热点之一.人们提出了许多产生矢量光束的方法,例如:基于液晶空间调制器加载灰度图生成矢量光束的方法^[14-17];利用厄米-高斯 HG 光束合成矢量光束^[18,19];利用空间可变波片生成矢量光束^[20-22];通过激光与非线性晶体作用直接生成矢量光束等^[23-25].

通常激光器输出光束是满足一定边界条件并具有不同横向模式的光束,在柱坐标下,可以用拉盖尔-高斯(LG)光束来表示.LG 光束主要表现为不同径向模式数和不同拓扑荷值的能量分布,且携带螺旋相位分布和轨道角动量.在基模状态,LG 光束退化为无螺旋相位的基模高斯光束.高阶 LG 光束不易产生,可以通过激光器联合加载相息图的空间调制器产生^[14,15].在光束偏振态控制和转化的研究中,琼斯矢量和琼斯矩阵可以简洁方便地描述偏振光束和偏振转化器件,因此得到了广大学者的青睐.为了研究空间可变波片空间偏振作用的一般情况,即对任意阶拉盖尔-高斯螺旋光束的偏振图像转化过程进行分析,本文借助琼斯矢量、琼斯矩阵和 LG 光束的数学形式,通过基于 Matlab 语言的数值模拟,分别分析了任意阶拉盖尔-高斯螺旋光束通过空间半波片、四分之一波片生成矢量光束的方法.通过输出矢量光束图样和轨道角动量偏振检测的模拟分析,我们发现线偏振和圆偏振的基模高斯光束可分别通过空间半波片和空间四分之一波片转化生成矢量光束,且随着空间可变波片阶数的提高,输出光束暗核逐渐增大,经过检偏器后的消光个数是组合波片阶数的两倍;空间可变波片对螺旋光束的作用可以等效为两个正交圆偏

振的螺旋分量按一定的权重的叠加.在螺旋光束径向指数与拓扑荷值之差等于空间可变波片阶数时,生成矢量光束的图样为环形包围的亮点.本文所用方法首先将琼斯矩阵通过扩展适应了矢量光束偏振研究的需要,然后把光场的空间偏振态作为调制内容,可以将任意阶拉盖尔-高斯螺旋光束转化为具有不同偏振态分布和相位分布的矢量光束,这在光波作为信息载体的光场调控中具有很强的现实意义,为矢量光束的生成和应用研究提供了新的有效途径.

2 空间可变半波片调制

LG 光束作为一种典型的螺旋光束,其复振幅在柱坐标二维平面内可以表示为^[17],

$$U_{LG}(r, \theta) = A_0 \left(\frac{2r^2}{\omega_0^2} \right)^{\frac{l+1}{2}} L_p^{|l|} \left(\frac{2r^2}{\omega_0^2} \right) e^{-\frac{r^2}{\omega_0^2}} e^{i\theta} \quad (1)$$

其中, A_0 为振幅, $L_p^{|l|}$ 为缔合拉盖尔多项式, ω_0 为光束的束腰半径, p, l 分别为径向指数和角向指数,角向指数也称为拓扑荷值.相位函数 $e^{i\theta}$ 决定了 LG 光束波前具有螺旋结构,这也正是其应用于光势阱力操控微观粒子的原因.当 $p = l = 0$ 时, LG 光束退化为波前无螺旋结构、光强呈高斯函数分布的基模高斯光束.琼斯矢量和琼斯矩阵在讨论光波的偏振态和光学器件的偏振特性时,具有形式简洁、计算方便的优点,为了适应矢量光束偏振研究的需要,根据矢量光束的附加相位是光波横截面上方位角 φ 和半径 r 的函数,可以将矢量光束的琼斯矢量定义为,

$$J_{ve} = \begin{pmatrix} \cos(m\varphi + 2n\pi r/r_0 + \varphi_0) \\ \sin(m\varphi + 2n\pi r/r_0 + \varphi_0) \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, m, n 为整数, r_0 为光斑半径, φ_0 为初始偏振方向.当 $m = n = 0$ 时, (2) 式即表示偏振方向与水平方向成 φ_0 角的线偏振光;当 $m = 1, n = 0, \varphi_0 = 0$ 时,表示径向偏振光;当 $m = 1, n = 0, \varphi_0 = \pi/2$ 时,表示切向偏振光.本文为了分析方便,假定 $n = 0$,即矢量光束的附加相位只是光波横截面上方位角 φ 的函数.

相邻两片的快轴夹角为 $m\pi/M$ 的多片扇形半波片拼接起来,可以形成空间可变半波片,其中 M 是扇形半波片的总数目, m 称为组合半波片的阶数.对于由八片扇形半波片组成的组合半波片,相邻两片的快轴夹角分别为 $\pi/8, \pi/4, 3\pi/8$ 时,可分别形成一阶、二阶、三阶空间半波片. m 阶空间半

波片的琼斯矩阵^[26]可以表示为,

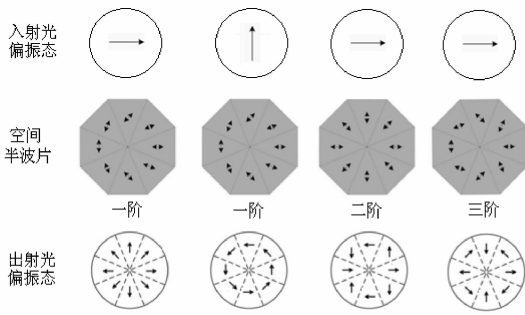


图 1 空间可变半波片的结构及特性
Fig. 1 The structure and properties of the spatial variant half-wavelength plate.

$$J_{m,\lambda/2} = \begin{bmatrix} \cos m\varphi & \sin m\varphi \\ \sin m\varphi & -\cos m\varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

当一束偏振方向沿 x 方向的线偏振光通过该 m 阶空间可变半波片时, 输出光束的琼斯矢量为,

$$J_{out} = \begin{bmatrix} \cos m\varphi & \sin m\varphi \\ \sin m\varphi & -\cos m\varphi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos m\varphi \\ \sin m\varphi \end{pmatrix} \quad (4)$$

若将入射光的偏振方向转动 $\pi/2$, 即沿 y 方向的线偏振光通过该 m 阶空间可变半波片时, 输出光束的琼斯矢量为,

$$J_{out} = \begin{bmatrix} \cos m\varphi & \sin m\varphi \\ \sin m\varphi & -\cos m\varphi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin m\varphi \\ -\cos m\varphi \end{pmatrix} \quad (5)$$

从式(4)(5)可以看出, 空间可变半波片可以将线偏振基模高斯光束转化为矢量光束, 其中一阶空间半波片可以分别将 x 、 y 方向的线偏振基模高斯光束转化为径向偏振光和切向偏振光, 该空间可变半波片的结构及特性如图 1 所示. 径向偏振光和切向偏振光的转化可以直接由入射光的偏振态去控制, 这比使用其他转化器实现径向和切向转化灵敏性更好, 操控更简便.

我们将生成的矢量光束通过检偏器, 可以旋转检偏器来检验矢量光束的偏振状态, 偏振检测的结果如图 2 所示. 从图 2 分析可知, 矢量光束通过检偏器以后, 形成消光带不同的光强分布, 且消光带主瓣数是空间半波片阶数的两倍; 随着空间波片阶数的提高, 输出光束暗核逐渐增大; 检偏器旋转 θ 角, 则矢量光束旋转角度为 θ/m , m 为空间可变半波片的阶数.

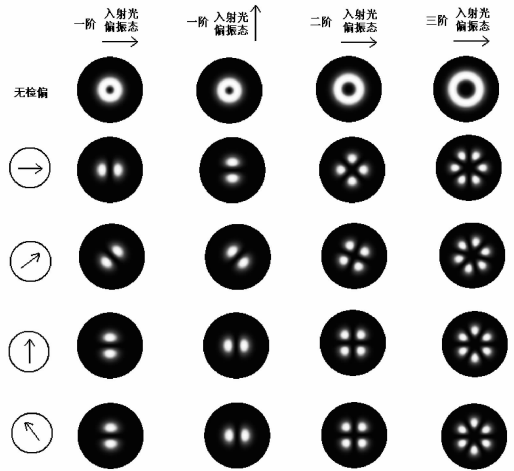


图 2 空间可变半波片生成矢量光束的偏振态检测
Fig. 2 The polarization test of the vector beams generated by spatial variant half-wavelength plate.

3 空间可变 $\lambda/4$ 波片的调制

空间可变 $\lambda/4$ 波片与空间可变半波片类似, 其琼斯矩阵可以表示为^[21],

$$J_{m,\lambda/4} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta + i \sin^2 \theta & (1-i) \sin \theta \cos \theta \\ (1-i) \sin \theta \cos \theta & i \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $\theta = m\varphi + \pi/4$, m 为空间可变 $\lambda/4$ 波片的阶数, φ 为极坐标系下的极角. 当一束左旋圆偏振光通过该 m 阶空间可变 $\lambda/4$ 波片时, 输出光束的琼斯矢量为,

$$J_{out} = J_{m,\lambda/4} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i\theta} \begin{pmatrix} \cos \theta + \sin \theta \\ \sin \theta - \cos \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos m\varphi \\ \sin m\varphi \end{pmatrix} e^{im\varphi} e^{i\pi/4} \quad (7)$$

对于右旋圆偏振光, 同样可以计算出输出光束的琼斯矢量,

$$J_{out} = J_{m,\lambda/4} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin m\varphi \\ \cos m\varphi \end{pmatrix} e^{-im\varphi} e^{-i\pi/4} \quad (8)$$

从式(7)、(8)可以看出, 空间可变四分之一波片可以将圆偏振的基模高斯光束转化为矢量光束, 同时该矢量光束具有螺旋相位结构. 当 $m = 1$ 时, 空间可变 $\lambda/4$ 波片将左右旋偏振的基模高斯光束分别转化为切向和径向矢量光, 且轨道角动量 $l = \pm 1$. 若改用拓扑荷值为 $-m$ 的螺旋光代替基模高斯光束时, 则会消除螺旋相位, 获得无螺旋矢量光

束,其轨道角动量偏振检测如图 3 所示.

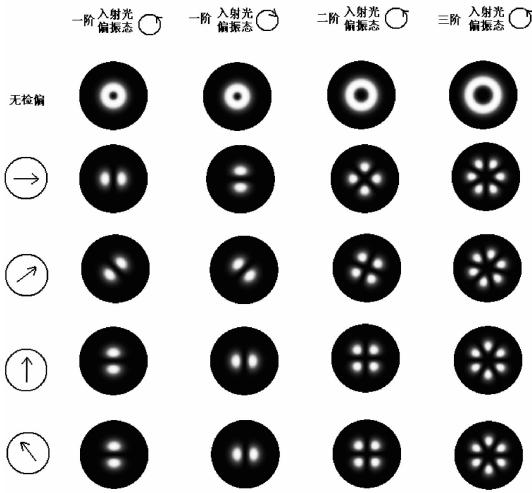


图 3 空间可变 $\lambda/4$ 波片生成矢量光束的偏振态检测

Fig. 3 The polarization test of the vector beams generated by spatial variant quarter-wavelength plate.

若将左旋圆偏振的基模高斯光束通过空间半波片,其输出光束的琼斯矢量为,

$$J_{\text{out}} = J_{m,\lambda/2} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} = e^{im\varphi} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \quad (9)$$

式(9)表明,空间半波片将左旋偏振光转化为右旋偏振光,且附加产生螺旋相位项 $e^{im\varphi}$,不能产生矢量光束.

4 高阶矢量光束转化

以空间可变半波片为例,研究其对高阶螺旋光束的空间偏振调制作用. 当一束拓扑荷值为 l 的具有螺旋相位的拉盖尔高斯光束通过 m 阶空间可变半波片时,生成的矢量光束可以表示为:

$$J_{\text{out}} = \begin{pmatrix} \cos m\varphi & \sin m\varphi \\ \sin m\varphi & -\cos m\varphi \end{pmatrix} e^{il\varphi} \begin{pmatrix} l \\ 0 \end{pmatrix} \\ = \frac{l}{2} \left[e^{i(m+l)\varphi} \begin{pmatrix} l \\ -i \end{pmatrix} + e^{i(m-l)\varphi} \begin{pmatrix} l \\ i \end{pmatrix} \right] \quad (10)$$

从式(10)分析可知,空间可变半波片对螺旋光束的转化作用可以等效为偏振状态相互正交的两束圆偏振光的叠加. 其中一束是拓扑荷值为 $m+l$ 的右旋圆偏振光,另一束是拓扑荷值为 $m-l$ 的左旋圆偏振光. 对于径向指数 $p=0$ 的拉盖尔高斯螺旋光束,当螺旋光束拓扑荷值与径向指数的差值等于空间可变波片的阶数($l-p=m$)时,即螺旋光的拓扑荷值与空间半波片的阶数相等时,则一束圆偏

振光由于 $m-l=0$ 而退化为基模高斯光束,另一束为拓扑荷值为 $2m$ 的圆偏振光. 输入光束为暗核随拓扑荷值逐渐增大的中空光斑,经过 m 阶空间可变半波片后,生成图 4 所示的矢量光束图样. 从图 4 可以看出,当 $m=l$,输出光束为光斑尺寸小于基模光斑的亮点,且该亮点外围存在亮度很弱的环;中心亮点的能量密度比外围环的能量密度要大的多,这是由于其中一束圆偏振光已经退化为基模高斯光束,而另一束中空型圆偏振光对其具有抑制作用而形成.

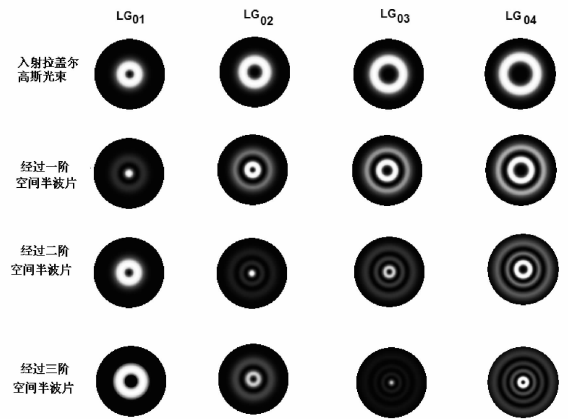


图 4 径向指数为零时高阶矢量光束的生成

Fig. 4 The generation of high-order vector beams when the radial index equals to zero.

对于径向指数 p 不为零的拉盖尔高斯螺旋光束,输入光束为光环数目随径向指数逐渐增大的环形光斑,径向指数 p 相同时,拓扑荷值越大,暗核越大. 经过 m 阶空间可变半波片后,生成的矢量光束输出图样如图 5 所示. 从图 5 分析可知,当 $l-p=m$ 时,生成的矢量光束的输出图样也为环形包围的中心亮斑,且随着径向指数和空间半波片阶数的增大,中心亮斑的能量密度逐渐减弱,直至难以分辨. 但是外围亮环的特征不同于径向指数 $p=0$ 的情形,其能量密度较大,可以清晰地分辨出来.

5 结论

本文利用空间可变波片的琼斯矩阵,分析了空间可变波片调制生成矢量光束的方法. 对于任意阶螺旋拉盖尔-高斯螺旋光束,包括无螺旋相位的基模高斯光束,通过该空间可变波片可以生成具有不同强度和不同偏振态分布的矢量光束,生成的矢量光束可以经过旋转检偏器进行验证,通过轨道角动量检测证明了该方法的可行性. 对矢量光束远

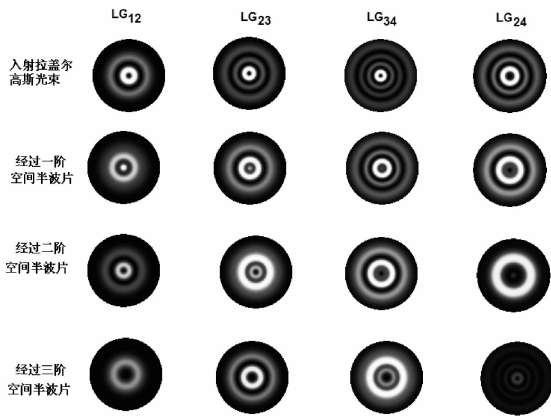


图 5 径向指数不为零时高阶矢量光束的生成
Fig. 5 The generation of high-order vector beams in the case that the radial index is not zero.

场特性的数值仿真结果表明:线偏振和圆偏振的基模光束可分别通过空间半波片和空间四分之一波片转化生成矢量光束,且随着空间波片阶数的提高,输出光束暗核逐渐增大;空间波片对螺旋光束的作用可以等效为两个正交圆偏振的螺旋分量的叠加。对于径向指数为零的螺旋光束,当其中一个螺旋分量的拓扑荷值为零时,生成矢量光束的图样为尺寸很小的亮斑,外围环的亮度很弱;对于拓扑荷值不为零的情形,当拓扑荷值与径向指数差值与空间半波片的阶数相等时,生成矢量光束的图样为外围亮环包围中心亮斑图样,外围环的亮度较强,且随着径向指数和空间波片阶数的增大,中心亮斑能量密度逐渐减弱。本文通过扩展琼斯矩阵的分析,指出空间可变波片可以将任意阶拉盖尔-高斯螺旋光束转化为具有不同偏振态和相位分布的矢量光束,对矢量光束的生成研究提供了新的可借鉴的方法。

参考文献:

[1] Yang L, Xie X, Wang S, *et al.* Minimized spot of annular radially polarized focusing beam [J]. *Opt Lett*, 2013, 38: 1331.

[2] Strohaber J, Scarborough T D, Uiterwaal C J. Ultrashort intense-field optical vortices produced with laser-etched mirrors [J]. *Appl Opt*, 2007, 46: 8583.

[3] He M, Chen Z, Sun S, *et al.* Propagation properties and self-reconstruction of azimuthally polarized non-diffracting beams [J]. *Opt Commun*, 2013, 294: 36.

[4] Hao X, Kuang C, Wang T, *et al.* Phase encoding for sharper focus of the azimuthally polarized beam [J]. *Opt Lett*, 2010, 35: 3928.

[5] Weng X, Guo H, Sui G, *et al.* Modulation for focusing properties of vector beams in imaging systems [J]. *Opt Commun*, 2013, 311: 117.

[6] Kuang C, Hao X, Liu X, *et al.* Formation of sub-half-wavelength focal spot with ultra long depth of focus [J]. *Opt Commun*, 2011, 284: 1766.

[7] Du F, Zhou Z, Tan Q, *et al.* Experimental verification on tightly focused radially polarized vortex beams [J]. *Chin Phys B*, 2013, 22: 064202.

[8] Wang T, Kuang C, Hao X, *et al.* Sharper focal spot below $\lambda/4$ of azimuthally polarized illumination phase-encoded by the binary $0/\pi$ phase plate [J]. *Optik*, 2012, 123: 2179.

[9] Chen Z, Pu J, Zhao D. Generating and shifting a spherical focal spot in a 4π focusing system illuminated by azimuthally polarized beams [J]. *Phys Lett A*, 2013, 377: 2231.

[10] Fatemi F K. Cylindrical vector beams for rapid polarization-dependent measurements in atomic systems [J]. *Opt Express*, 2011, 19: 25143.

[11] 刘名扬. 左手材料和磁性材料交替排列结构中的角度特征分析 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2014, 6: 027.

[12] Chen W, Zhan Q. Realization of an evanescent Bessel beam via surface plasmon interference excited by a radially polarized beam [J]. *Opt Lett*, 2009, 34: 722.

[13] Bouhelier A, Ignatovich F, Bruyant A, *et al.* Surface plasmon interference excited by tightly focused laser beams [J]. *Opt Lett*, 2007, 32: 2535.

[14] 席思星, 王晓雷, 黄帅, 等. 基于光学全息中的任意矢量光的生成方法 [J]. *物理学报*, 2015, 64: 124202.

[15] 刘国威, 杨艳芳, 何英, 等. 全光控制产生任意矢量光束 [J]. *光学学报*, 2015, 35: 345.

[16] Volpe G, Petrov D. Generation of cylindrical vector beams with few mode fibers excited by Laguerre-Gaussian beams [J]. *Opt Commun*, 2004, 237: 89.

[17] 郭帅凤, 刘奎, 孙恒信, 等. 利用液晶空间光调制器产生高阶拉盖尔高斯光束 [J]. *量子光学学报*, 2015, 21: 86.

[18] 辛璟焘, 高春清, 李辰. 厄米-高斯光束合成任意阶矢量光束 [J]. *中国科学: 物理学, 力学, 天文学*, 2012, 42: 1017.

[19] Bomzon Z, Hasman E. The formation of laser beams

- with pure azimuthal or radial polarization [J]. *Appl Phys Lett*, 2000, 77: 3322.
- [20] Beresna M, Gecevicius M, Kazansky P G, *et al.* Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass [J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 98: 201101.
- [21] Gong L, Ren Y, Liu W, *et al.* Generation of cylindrically polarized vector vortex beams with digital micromirror device [J]. *J Appl Phys*, 2014, 116: 183105.
- [22] Maurer C, Jesacher A, Furhapter S, *et al.* Tailoring of arbitrary optical vector beams [J]. *New J Phys*, 2007, 9: 78.
- [23] Yu H, Zhang H, Wang Z, *et al.* Experimental observation of optical vortex in self-frequency doubling generation[J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 241102.
- [24] Zhao Y, Wang Z, Yu H, *et al.* Direct generation of optical vortex pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101: 031113.
- [25] Moh K J, Yuan X C, Bu J, *et al.* Generating radial or azimuthal polarization by axial sampling of circularly polarized vortex beams[J]. *Appl Opt*, 2007, 46: 7544.
- [26] Xin J, Gao C, Li C, *et al.* Measuring orbital angular momentum of helical beams by spatially variable retardation plates [J]. *Appl Phys B*, 2012, 108: 703.