

全光控制产生任意矢量光束

刘国威 杨艳芳 何 英 郑 晓 罗祝裕

上海大学理学院物理系, 上海 200444

摘要 提出通过调制光场的所有空间分布参数产生任意矢量光束的方法,即用两个反射型纯相位液晶空间光调制器可以对光的相位、振幅和偏振(包括偏振旋转和椭圆偏度)等参量进行全光调制或全光控制。在理论上给出了全光控制的琼斯矩阵方程,再计算要加载在空间调制器上的灰度图,从而产生目标矢量光场。实验上,通过调制两个或三个光场的空间分布参数产生了不同的矢量光场图样,从而验证了全光控制产生矢量光场方法的可行性。

关键词 物理光学; 偏振; 空间光调制器; 相位调制

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0526001

Generation of Arbitrary Vector Beams by Full Control of Light

Liu Guowei Yang Yanfang He Ying Zheng Xiao Luo Zhuyu

Department of Physics, College of Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract We propose a method named as full control of light to generate arbitrary vector beams by modulating all the parameters of the spatial distributions of an optical field. Two reflective phase-only liquid crystal spatial light modulators can be used to modulate all the parameters of light including the phase, amplitude and polarization (polarized rotation and ellipticity). Theoretically, we provide the Jones matrix of full control of light. Then the grayscale that is loaded on the spatial light modulator can be calculated according to the designed vectorial optical field. Experimentally, different vector beams containing amplitude and/or polarization modulations are successfully generated and tested using polarization measurement to verify the feasibility of this method of full control of light.

Key words physic optics; polarization; spatial light modulators; phase modulation

OCIS codes 260.5430; 070.6120; 060.5060; 090.1760

1 引 言

矢量光束是指同一时刻在光束横截面上不同位置具有不同偏振态的光束,也称为非均匀偏振光束。这一概念是相对于通常研究的线偏振、圆偏振和椭圆偏振等光束提出的。对于矢量光束而言,其偏振态分布是空间变化的,这种特性导致了矢量光束在理论描述、传输以及与物质相互作用等方面具有全新的特性^[1-3]。例如径向偏振矢量光束在强聚焦时可以形成小的焦斑尺寸、获得很强的纵向电场分量^[4-9],而角向偏振矢量光束在强聚焦时只有横向场,纵向场为零^[10-11],某些特定偏振的矢量光束强聚焦时,可以形成平顶光束、光针、光球和光学囚笼等特殊结构的光束^[12-18]。基于这些特殊性质,矢量光束在粒子囚禁与操纵、激光加工等领域具有很大的应用潜力。

关于光束性质和应用的大量研究促进了实验上发展出通过不同装置产生独特性质的矢量光束。大量研究表明,目前产生矢量光束的主要方法是在激光腔外通过对波前的重构或通过光束的相干叠加,而波前的重构一般用空间光调制器(SLM)完成,且SLM有透射型和反射型两种类型,因此产生矢量光束的方法可以

收稿日期: 2014-12-29; 收到修改稿日期: 2015-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(61108010, 60877055)

作者简介: 刘国威(1989—),男,硕士研究生,主要从事光束传输与控制方面的研究。E-mail: dlliuguowei@yeah.net

导师简介: 杨艳芳(1973—),女,博士,副教授,主要从事光信息方面的研究。E-mail: yanfangyang@shu.edu.cn

是采用波前重构和光束相干叠加两类中的一种,也可以是两个结合使用来产生更为复杂的矢量光束。如用光束的干涉产生径向和角向偏振光束^[19-20]。一个透射型SLM和干涉法联合使用产生任意拓扑核的矢量光束^[21]。2011年南京大学的Chen H等^[22]利用一个透射型SLM,通过携带有不同相位的左、右旋偏振光的叠加,实现了调制相位和偏振两个参量产生任意矢量光束^[22]。2012年西班牙埃尔南德斯大学的Moreno等^[23]提出将一个透射型SLM分为两个区域,利用两个透射型子系统的双调制能实现调制振幅、相位和偏振来产生矢量光束,但是这种方法如果要达到理想的衍射效率,就必须将SLM的液晶面板做大,这会导致实际应用的局限性。2013年巴萨罗纳大学的Maluenda等^[24]提出用两个透射型SLM和马赫-曾德尔干涉法产生任意强度和偏振分布的矢量光束。在2013年本课题组和代顿大学^[25]提出将两个反射型SLM分别等分为两个区域来形成四个反射型SLM子系统,用每个系统分别控制一个参量来产生任意矢量光束,这种方法的一个局限性是需要设计复杂的光路并且光路调节起来相当困难。本文中提出一种利用两个反射型且不分区的SLM实现调制光的振幅、偏振方向和椭圆度产生矢量光束的方法,这避免了透射型SLM不能实现高的空间分辨率和SLM分区使用的复杂设计的两个问题。

2 理论模型

要实现全光控制,需要从光束的表达式出发,给出携带有相位、振幅和偏振参量的表达式。根据琼斯矢量的表征,光场表示为:

$$E(x,y) = A(x,y)\exp[j\Phi(x,y)] \begin{Bmatrix} E_x(x,y) \\ E_y(x,y)\exp[j\delta(x,y)] \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $A(x,y)$ 是振幅分布, $\Phi(x,y)$ 是 x 分量和 y 分量的共同相位, E_x 和 E_y 是归一化的琼斯矢量,携带有偏振信息,且 E_x 和 E_y 都是实数,满足 $E_x^2 + E_y^2 = 1$ 。 $\delta(x,y)$ 是 x 分量和 y 分量间的相位延迟。可以明显看出,相位 $[\Phi(x,y)]$ 、振幅 $[A(x,y)]$ 、偏振方向 (E_x 和 E_y) 和相位延迟 $[\delta(x,y)]$ 4 个自由度能表征矢量光场,因此逐点像素调制 4 个自由度就可以产生任意分布的矢量光场,4 个自由度详细的调制原理如下。

1) 相位调制。水平方向偏振的高斯光束照射到SLM上,反射光束就携带有加载的相位信息,即实现了相位调制,琼斯矢量表达为:

$$\begin{Bmatrix} E_{x1}(x,y) \\ E_{y1}(x,y) \end{Bmatrix} = \exp[j\phi_1(x,y)] E_0(x,y) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中 $E_0(x,y)$ 是入射线偏振光的振幅, $\phi_1(x,y)$ 是加载到空间光调制器的相位模式。

2) 振幅调制。根据马吕斯定律 $I = I_0 \cos^2 \theta$, 入射线偏振光通过偏振片后,出射光的振幅与入射光的振幅成余弦平方的关系,余弦角 θ 是线偏振光与偏振片的夹角,因此要实现振幅调制,就必须使光束发生偏振旋转。实验上在不改变偏振片方向的前提下要实现偏振旋转^[26]的方法是通过 1/4 波片(QWP)和透射型SLM或反射型SLM的结合,后面实验中采用QWP和反射型SLM来实现偏振旋转。

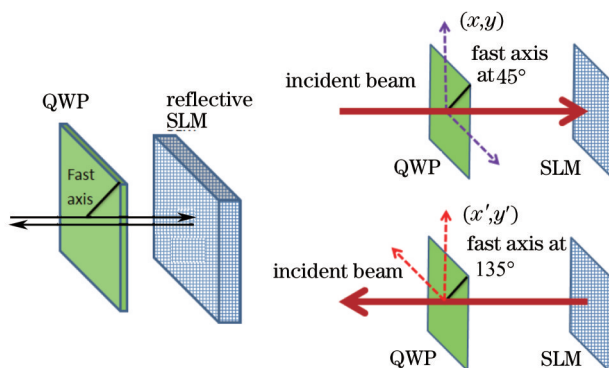


图1 纯偏振旋转装置图

Fig.1 Illustration of the spatially variant polarization rotator setup

纯偏振旋转的实验装置如图 1 所示,包括一个快轴与水平方向成 45°的 QWP 和一个反射型的 SLM。线偏振光束经过 QWP 打到 SLM 上发生反射,反射回来的光会第二次经过 QWP。由于相反的传输方向,实验室坐标系会发生水平翻转,因此第二次经过的 QWP 的快轴与水平方向成 135°方向。则偏振旋转 M_{PR} 的琼斯矩阵 M_{PR} 表达式为:

$$M_{PR} = M_{QWP(135^\circ)} M_{REFL} M_{SLM} M_{QWP(45^\circ)} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1-j & -1-j \\ -1-j & 1-j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp[j\phi(x,y)] & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-j & 1+j \\ 1+j & 1-j \end{bmatrix} = \exp\left[j\frac{\phi(x,y)}{2}\right] R\left[\frac{3\pi}{2} - \frac{\phi(x,y)}{2}\right], \quad (3)$$

从(3)式中可以看出,偏振旋转只与加载在 SLM 上的 $\phi(x,y)$ 有关。

根据上述分析可以看出,用一个纯偏振旋转装置和一个偏振片就能实现振幅调制。琼斯矢量表达为:

$$\begin{bmatrix} E_{x2}(x,y) \\ E_{y2}(x,y) \end{bmatrix} = \exp\left\{j\left[\phi_1(x,y) + \frac{\phi_2(x,y)}{2} + \pi\right]\right\} \sin\left[\frac{\phi_2(x,y)}{2}\right] E_0(x,y) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$\phi_2(x,y)$ 是加载到 SLM 上的相位模式。

3) 偏振旋转(偏振方向)。根据(3)式,水平偏振的光照直接照射到偏振旋转装置上就可以实现偏振旋转,实现偏振旋转后的光的琼斯矢量场表达为:

$$\begin{bmatrix} E_{x3}(x,y) \\ E_{y3}(x,y) \end{bmatrix} = \exp\left\{j\left[\phi_1(x,y) + \frac{\phi_2(x,y)}{2} + \frac{\phi_3(x,y)}{2}\right]\right\} \sin\left[\frac{\phi_2(x,y)}{2}\right] \begin{Bmatrix} \sin\left[\frac{\phi_3(x,y)}{2}\right] \\ \cos\left[\frac{\phi_3(x,y)}{2}\right] \end{Bmatrix} E_0(x,y), \quad (5)$$

$\phi_3(x,y)$ 是加载到 SLM 上的相位模式。

4) 椭圆偏度。调制椭圆偏度就是让 x 分量和 y 分量之间产生相位延迟,即改变 x 分量或者 y 分量的相位。实验中使用的 SLM 只对 x 方向的线偏振光起作用,因此改变 x 分量的相位就能实现椭圆偏度的调制,即让 x 方向的线偏振光束直接照到 SLM 上,最终的出射光场的琼斯矢量表达式变为:

$$\begin{bmatrix} E_{x4}(x,y) \\ E_{y4}(x,y) \end{bmatrix} = \exp\left\{j\left[\phi_1(x,y) + \frac{\phi_2(x,y)}{2} + \frac{\phi_3(x,y)}{2} + \phi_4(x,y)\right]\right\} \times \sin\left[\frac{\phi_2(x,y)}{2}\right] \sin\left[\frac{\phi_3(x,y)}{2}\right] \begin{Bmatrix} 1 \\ \cot\left[\frac{\phi_3(x,y)}{2}\right] \exp\{j[\phi_4(x,y)]\} \end{Bmatrix} E_0(x,y), \quad (6)$$

式中 $\phi_4(x,y)$ 是加载到 SLM 上的相位模式。

从上面的讨论可以看出,依据(1)式可以设计所要产生的矢量光束的相位、振幅、偏振方向和相位延迟 4 个参量。为了在实验上产生设计的矢量光束,就必须计算出加载在不同 SLM 上的 4 个相位模式,对比(1)式和(2)、(4)、(5)、(6)式可以得到:

$$\phi_2(x,y) = 2 \sin^{-1}[A(x,y)], \quad (7)$$

$$\phi_3(x,y) = 2 \tan^{-1}\left(\frac{|E_y(x,y)|}{|E_x(x,y)|}\right) - \pi, \quad (8)$$

$$\phi_4(x,y) = -\delta(x,y), \quad (9)$$

$$\phi_1(x,y) = \Phi(x,y) - \frac{\phi_2(x,y)}{2} - \frac{\phi_3(x,y)}{2} - \phi_4(x,y), \quad (10)$$

因此对于任意设计的矢量光束,通过(7)式到(10)式就能计算出要分别加载在 SLM 上的相位模式灰度图,在实验上就可以获得期望的出射矢量光束。

3 实验装置

从上面讨论的理论模型可知,要完成全光控制产生任意矢量光束需要4个SLM调制4个自由度参量。但是,在实验中是用电荷耦合器件(CCD)检测输出光束的强度,在4个自由度中,一般情况下,除过涡旋光束,相位的改变并不改变光束的强度分布,因此为了考虑实验的简单性,在设计实验光路时就没有对相位进行调制,仅仅考虑振幅、偏振旋转和椭偏度三个自由度的调制,实验装置如图2所示。其中,两个空间光调制器采用的是德国Holey公司的Poluto型号的纯相位型SLM。实验中使用波长为632.8 nm的He-Ne激光器作为输入光,然后光经过空间滤波器后和透镜1对光束进行扩束。水平方向偏振的偏振片1(P1)和1/2波片(HWP)联合使用调节入射光束的强度,用小孔调节光束的光斑大小。然后光束经过能量分束镜1(NPBS1)和QWP1照射到SLM1上,QWP1和SLM1能完成偏振旋转,即改变线偏振的方向。可以看出,用SLM1能完成振幅调制和偏振方向的改变,在SLM1上的振幅调制是用P2来完成,并且P2也可以检测调制振幅后的光的偏振分布。用SLM2调制椭偏度时,经过P2的光的偏振方向是水平方向,然后光再经过SLM2和QWP2完成椭偏度的调制。在实验中,为了获得清晰的图样,由焦距均为75 mm的透镜2和透镜3组成一个4f系统,因此从SLM2到透镜2的距离应等于透镜2的焦距。由于光经过一个4f系统,图像会发生镜像变换,因此最后再使用焦距为50 mm的透镜4将图像旋转回到原方向。

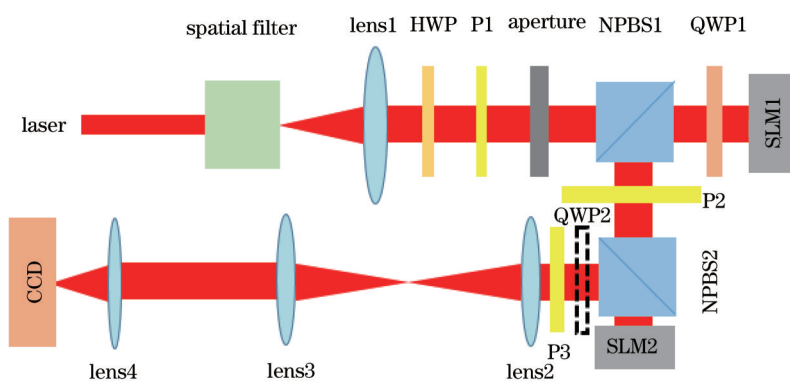


图2 产生矢量光束实验装置的框架图

Fig.2 Schematic diagram of the experimental setup for generation vector beams

4 实验结果

1) 相位调制

一般情况下,相位的改变不会改变光束的强度分布,但是涡旋光束是一个特例,带有螺旋相位 $[\exp(jm\phi)]$ 的涡旋光束的中心是空心的,改变螺旋相位,光束中心的空心区域会改变。为了说明这个问题,做了单独的涡旋相位调制。实验时仅在SLM1上调制螺旋相位,而SLM2上不加载任何相位模式。实验给出了带有拓扑核 m 为1、3、5时涡旋光束的远场强度分布,结果如图3所示。从结果中可以看出加载不同的拓扑核对光束强度的分布的影响是不同的,加载的拓扑核越大,空心部分越大。

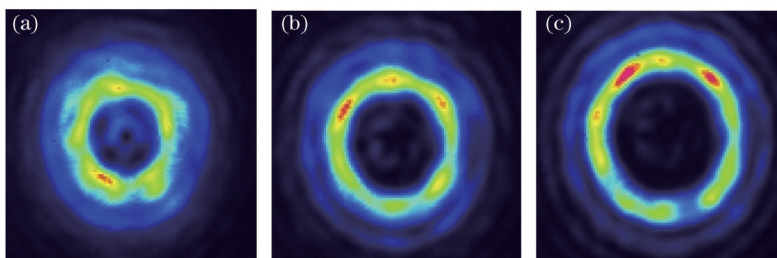


图3 不同拓扑核时调制相位产生涡旋光束。(a) $m=1$; (b) $m=3$; (c) $m=5$

Fig.3 Modulation phase to generate vortex beam with different topological charges. (a) $m=1$; (b) $m=3$; (c) $m=5$

2) 振幅和偏振的调制

为了证明振幅和偏振调制的作用,设计了“SHEO”的二进制图样,其中,“SH”部分设计成 45° 方向偏振,

“EO”部分设计成 135° 方向偏振,模拟光束的强度和偏振分布如图 4 所示。用(7)~(10)式计算出要加载在 SLM 上的灰度图,因为此时在 SLM2 上没有加载相位,则光路中就不需要加入偏振片 3。用 CCD 检测时先将 P2 置于水平偏振方向,观察到的是强度均匀分布的“SHEO”图像,如图 5(a)所示。这是因为当 P2 置于水平偏振方向时, 45° 和 135° 方向的偏振光在水平方向的分量是相同的,所以能够观察到强度均匀的图像。当 P2 旋转到 45° 方向时, 45° 方向偏振的光能够透过 P2 而 135° 方向偏振的光不能够透过 P2,所以只能观察到 45° 方向偏振的“SH”图样,如图 5(b)所示。当 P2 旋转到 135° 方向时, 45° 方向偏振的光不能够透过 P2 而 135° 方向偏振的光能够透过 P2,所以只能观察到 135° 方向偏振的“EO”图样,如图 5(c)所示。可以明显看出图 5 的结果既能证明实现振幅调制,也能证明实现了改变光的偏振方向。



图 4 不同偏振“SHEO”图样的模拟图

Fig.4 Different polarization “SHEO” logo

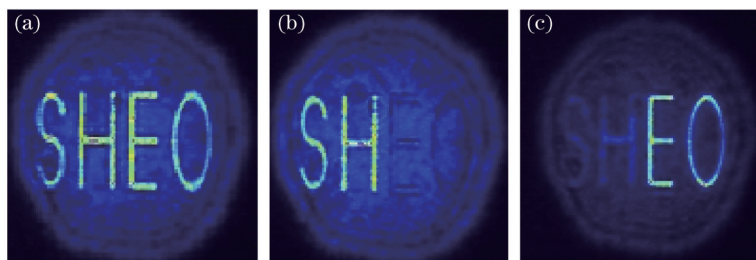


图 5 调制振幅和偏振方向产生的“SHEO”图形。(a) P2 置于水平方向; (b) P2 旋转到 45° 方向; (c) P2 旋转到 135° 方向

Fig.5 Modulation amplitude and polarization rotation to generate “SHEO” pattern. (a) Direction of P2 is horizontal;

(b) direction of P2 is 45° ; (c) direction of P2 is 135°

3) 椭圆度的调制

在调制振幅和偏振方向的基础上,进一步将“SHEO”图形的“S”设计成左旋圆偏振光,“H”设计成右旋圆偏振光,而保持“EO”的偏振状态不变,模拟的光束偏振分布如图 6(a)所示,图 6(b)给出了相应的加载在 SLM2 上的灰度图。可以明显看出,“EO”部分不会改变椭圆度。实验时,先将 P2 旋转到 45° 方向,则 135° 方向偏振的“EO”不能通过 P2,然后加入偏振片 3(P3),结果显示不管怎么旋转 P3,“SH”图像都不发生改变,如图 7(a)所示,这正说明“SH”部分的偏振态是圆偏振。为了判断是左旋还是右旋,在 P3 和分束镜 2 之间加入 QWP2,然后旋转 QWP2,当 QWP2 的快轴与 P3 成 45° 夹角时,只显示“S”图像,如图 7(b)所示,而 QWP2 的快轴与 P3 成 135° 夹角时,只显示“H”图像,如图 7(c)所示,因此可以判断出“S”部分的偏振为左旋圆偏振,而“H”部分为右旋圆偏振。原因是圆偏振光经过 QWP 会变成线偏振光,而由左旋圆偏振转变成的线偏振的方向与水平方向成 45° ,由右旋圆偏振转变成线偏振的方向与水平方向成 135° 。

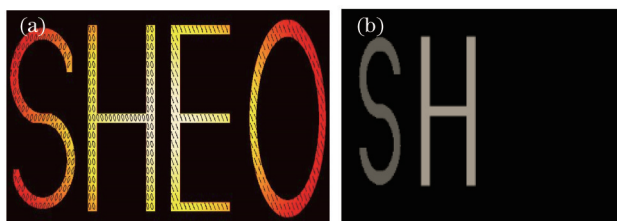


图 6 (a) 模拟调制椭圆度的“SHEO”图形; (b) 实现椭圆度调制加载的相位灰度图

Fig.6 (a) Simulation “SHEO” pattern” by modulating ellipticity; (b) loaded phase gray image to realize elliptical modulation

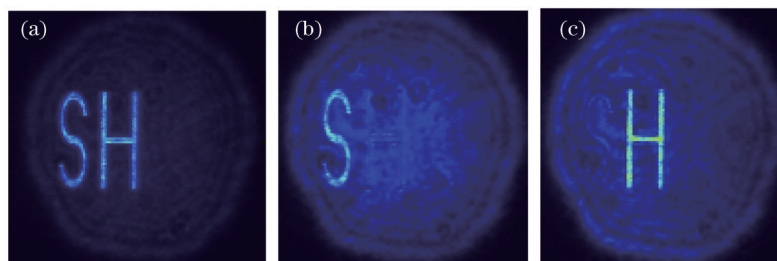


图 7 (a) 圆偏振“SH”的强度分布; (b) 左旋圆偏振的“S”; (c) 右旋圆偏振的“H”

Fig.7 (a) “SH” pattern in circular polarization; (b) “S” in left circular polarization; (c) “H” in right circular polarization

从上述的实验结果可以证明“S”图像为左旋圆偏振光,“H”图像为右旋圆偏振光,而“EO”图像的偏振为 135° 的线偏振,这与设计的矢量光束的偏振态分布是一致的。

5 结 论

提出了一种能调制光场的所有空间参数(包括相位、振幅、偏振方向和椭圆度 4 个自由度)产生任意矢量光场的新方法。由于该方法使用空间光调制器调制光的空间参数,因此可以很容易实现像素级的点对点的调制。通过调制“SHEO”图像的不同参数验证了该方法的可行性和准确性,基于该方法可以设计特殊应用的矢量光束,这在粒子囚禁、微操纵和光束整形等诸多领域具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Hall D G. Vector-beam solutions of Maxwell's wave equation[J]. *Opt Lett*, 1996, 21(1): 9-11.
- 2 Li C F. Representation theory for vector electromagnetic beams[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 063831.
- 3 Deng D, Yu H, Xu S, *et al.*. Nonparaxial propagation of vectorial hollow Gaussian beams[J]. *JOSA B*, 2008, 25(1): 83-87.
- 4 Dorn R, Quabis S, Leuchs G. Sharper focus for a radially polarized light beam[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(23): 233901.
- 5 Quabis S, Dorn R, Eberler M, *et al.*. Focusing light to a tighter spot[J]. *Optics Communications*, 2000, 179(1): 1-7.
- 6 Sun C C, Liu C K. Ultrasmall focusing spot with a long depth of focus based on polarization and phase modulation[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(2): 99-101.
- 7 Grosjean T, Courjon D. Smallest focal spots[J]. *Optics Communications*, 2007, 272(2): 314-319.
- 8 Chen Guojun, Zhou Qiaoqiao, Ji Xianming, *et al.*. Study on high- numerical- aperture- focused characteristics of vector beam produced by π phase plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1226001.
陈国钧,周巧巧,纪宪明,等. π 相位板产生矢量光束的高数值孔径聚焦特性研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1226001.
- 9 Liu Xuening, Wang Jiming, He Chongjun, *et al.*. Backward focus engineering with controlled cylindrical vector beams under different numerical apertures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0114004.
刘雪宁,王吉明,赫崇君,等. 不同数值孔径下调控矢量光束聚焦场的反向构建[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0114004.
- 10 Hao X, Kuang C, Wang T, *et al.*. Phase encoding for sharper focus of the azimuthally polarized beam[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(23): 3928-3930.
- 11 Youngworth K, Brown T. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams[J]. *Opt Express*, 2000, 7(2): 77-87.
- 12 Zhan Q. Properties of circularly polarized vortex beams[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(7): 867-869.
- 13 Liu Jian, Yang Yanfang, He Ying, *et al.*. Flat-top beam creation based on strong focusing of circularly polarized vortex beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0526003.
刘 键,杨艳芳,何 英,等. 基于圆偏振涡旋光束强聚焦的平顶光束的构成[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0526003.
- 14 Liu Jian, Yang Yanfang, He Ying, *et al.*. Amendment for tightly focusing of cylindrically polarized vortex beams[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(7): 0726001.
刘 键,杨艳芳,何 英,等. 柱矢量涡旋光束强聚焦特性的修正研究[J]. *光子学报*, 2014, 43(7): 0726001.
- 15 Wang H, Shi L, Lukyanchuk B, *et al.*. Creation of a needle of longitudinally polarized light in vacuum using binary optics[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(8): 501-505.
- 16 Wang X L, Ding J, Qin J Q, *et al.*. Configurable three-dimensional optical cage generated from cylindrical vector beams[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(17): 3421-3425.

- 17 Zhao Y, Zhan Q, Zhang Y, *et al.*. Creation of a three-dimensional optical chain for controllable particle delivery[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(8): 848–850.
- 18 Yan S, Yao B, Zhao W, *et al.*. Generation of multiple spherical spots with a radially polarized beam in a 4π focusing system[J]. *JOSA A*, 2010, 27(9): 2033–2037.
- 19 Toussaint Jr K C, Park S, Jureller J E, *et al.*. Generation of optical vector beams with a diffractive optical element interferometer[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(21): 2846–2848.
- 20 Passilly N, de Saint Denis R, Aït-Ameur K, *et al.*. Simple interferometric technique for generation of a radially polarized light beam [J]. *JOSA A*, 2005, 22(5): 984–991.
- 21 Wang X L, Ding J, Ni W J, *et al.*. Generation of arbitrary vector beams with a spatial light modulator and a common path interferometric arrangement[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(24): 3549–3551.
- 22 Chen H, Hao J, Zhang B F, *et al.*. Generation of vector beam with space-variant distribution of both polarization and phase[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(16): 3179–3181.
- 23 Moreno I, Davis J A, Hernandez T M, *et al.*. Complete polarization control of light from a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Opt Express*, 2012, 20(1): 364–376.
- 24 Maluenda D, Juvells I, Martínez-Herrero R, *et al.*. Reconfigurable beams with arbitrary polarization and shape distributions at a given plane[J]. *Opt Express*, 2013, 21(5): 5432–5439.
- 25 Han W, Yang Y, Cheng W, *et al.*. Vectorial optical field generator for the creation of arbitrarily complex fields[J]. *Opt Express*, 2013, 21(18): 20692–20706.
- 26 Zhan Q, Leger J R. Microellipsometer with radial symmetry[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(22): 4630–4637.

栏目编辑: 韩 峰