

基于二维电介质超表面的柱矢量光束 偏振阶数调控

蒋锐¹, 贺炎亮¹, 张小科¹, 蔡瑶¹, 刘俊敏¹, 陈书青^{1,2}, 李瑛¹, 范滇元¹

¹深圳大学光电工程学院, 二维材料光电科技国际合作教育部联合实验室,
广东省二维材料信息功能器件与系统工程技术研究中心, 广东 深圳 518060;

²新加坡国立大学电气与计算机工程系, 新加坡 117576

摘要 超表面在柱矢量光束(CVB)产生方面具有效率高、器件精巧等优势,被广泛用于 CVB 产生及相关应用,但是该方法存在一个比较大的缺点:超表面的结构是固定的,因此生成的 CVB 的阶数是不可调的。为了解决该问题,在 1550 nm 波段实验证明了一种通过模式的加减操作来高效调控 CVB 偏振阶数的方法。通过将两块超表面级联在一起,实现了 CVB 偏振阶数的减法运算;在两块超表面之间插入一块半波片,通过反转 CVB 偏振阶数,实现了 CVB 偏振阶数的加法运算。最终实现了在 $-8\sim 8$ 范围内以 2 为步长的 CVB 偏振阶数调控操作,实验结果与 Jones 矩阵的计算结果完全吻合。

关键词 表面光学; 二维电介质超表面; 柱矢量光束; 偏振阶数

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0705001

Polarization Order Adjustment of Cylindrical Vector Beams by Using Two-Dimensional Dielectric Metasurfaces

Jiang Rui¹, He Yanliang¹, Zhang Xiaoke¹, Cai Yao¹, Liu Junmin¹,
Chen Shuqing^{1,2}, Li Ying¹, Fan Dianyuan¹

¹College of Optoelectronic Engineering, International Collaborative Laboratory of 2D Materials for Optoelectronics
Science and Technology, and Centre of 2D Materials Information Devices and Systems of Information
Technology of Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, Singapore 117576, Singapore

Abstract Metasurfaces have been widely used to generate cylindrical vector beams (CVB) owing to its inherent advantages of high efficiency and compact structure. However, a disadvantage of this method is that the polarization order of the generated CVB is hard to be changed, because the structure of metasurface is fixed. To solve this problem, we experimentally demonstrate a simple and efficient method to manipulate the polarization order of CVB through modes addition and subtraction operation at the working wavelength of 1550 nm. By two cascaded metasurfaces, the subtraction operation of polarization orders is realized. Further, a half wave-plate inserted between two metasurfaces is used to reverse polarization orders, in order that the add computation of polarization

收稿日期: 2018-01-18; 收到修改稿日期: 2018-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(61490713, 61575127, 61505122)、广东省自然科学基金(2016A030310065, 2014A030310279)、深圳科技基础研究项目(JCYJ20150324141711651, JCYJ20160422152152634, JCYJ2016032814464)、深圳大学自然科学基金(000059, 2016031)、广东省科技计划项目(2016B050501005)、广东教育厅自然科学基金(2015KTSCX124, 2015KQNCX146)

作者简介: 蒋锐(1991—),男,硕士研究生,主要从事光场调控、光电子器件方面的研究。

E-mail: jiangrui-love@foxmail.com

导师简介: 李瑛(1973—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光场调控、激光技术、光电器件等方面的研究。

E-mail: queenly@szu.edu.cn

orders is realized. Experimental results are in good agreement with the calculation results through Jones matrix, and the polarization order of CVB can be adjusted from -8 to 8 with step length of 2 by modes addition and subtraction.

Key words optics at surfaces; two-dimensional dielectric metasurface; cylindrical vector beam; polarization order

OCIS codes 240.2130; 240.5445

1 引 言

柱矢量光束(CVB)是一种偏振态呈空间非均匀分布的结构光,主要包含径向偏振光和角向偏振光^[1-2]。在数学上,CVB是麦克斯韦波动方程严格的矢量解^[3]。基于它所具有的独特光场分布及光学特性,CVB在光通信、激光加工、电子加速以及光子俘获方面都展现出了极大的应用价值和前景^[4-11]。

传统产生 CVB 的方法主要有被动法和主动法两类,主动法是通过设计特殊的激光谐振腔结构,通过谐振生成所需要偏振阶数的 CVB^[12-14];被动法则是通过对偏振态呈空间均匀分布的光束进行转化从而生成偏振态呈空间非均匀分布的 CVB^[15-17]。这些方法都存在系统结构复杂、稳定性低、成本高等缺点,使系统在使用过程中无法灵活生成所需偏振阶数,从而限制了 CVB 的实际应用。因此,有必要提出一种新的 CVB 产生及阶数调控的方法。

近年来,二维微纳电介质超表面受到了越来越多的关注,被广泛地用作不均匀各向异性介质,以操控光束的偏振态,并被用于产生 CVB。相对于传统调制 CVB 的器件而言,如 Q-plate 和空间光调制器(SLM),二维微纳电介质超表面具有很多优点,如损伤阈值高、结构小巧、成本低、稳定性高等^[18-20]。这些优点使其广泛应用于图像处理、传感、数据存储、量子信息操控以及光束的自旋霍尔效应(SHE)等^[18,21-27]领域。然而,超表面的结构是固定的,这意味着单块超表面只能生成特定偏振阶数的 CVB,这无疑限制了超表面的进一步应用。

本文提出并实验证明了一种在 1550 nm 波段使用超表面灵活调控 CVB 偏振阶数的方法。通过 Jones 矩阵计算发现,将多块超表面与半波片(HWP)进行灵活组合可以实现 CVB 偏振阶数的加减以及反转。将两个超表面级联,可以实现 CVB 偏振阶数的减法运算;在这两个超表面之间插入一个半波片,可以实现 CVB 偏振阶数的加法运算^[28-30]。实验结果与 Jones 矩阵计算结果十分吻合。通过该方法,理论上可以实现 CVB 偏振阶数的任意调控,但由于实验条件限制,最终只在实验中实现了 CVB 偏振阶数在 $-8\sim 8$ 范围内,步长为 2 的自由调控,提出的 CVB 偏振阶数调控方案在光通信等领域有

潜在的应用前景^[4-11]。

2 原理分析

CVB 是指在横截面不同位置上偏振方向和径向有一个特定角度的奇异光束,其电场表达式可以表示为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, \phi) = E_0(r) [\cos(n\phi + \theta_0) \mathbf{e}_x + \sin(n\phi + \theta_0) \mathbf{e}_y], \quad (1)$$

式中: $E_0(r)$ 为振幅; ϕ 为方位角; n 为偏振阶数; \mathbf{e}_x 和 \mathbf{e}_y 分别为笛卡尔坐标系下的 x 方向和 y 方向的单位矢量; θ_0 为电场矢量与径向的夹角。当 $\theta_0 = 0$ 时,(1)式表示径向偏振 CVB;当 $\theta_0 = \pi/2$ 时,(1)式表示角向偏振 CVB。

超表面的结构与 q 板类似,在其横截面上,光轴方向的方位角可以定义为

$$\phi(r, \theta) = q\theta + \phi_0, \quad (2)$$

式中: (r, θ) 对应极坐标; $\theta = \arctan(y/x)$ 为方位角; ϕ_0 为光轴的初始方向,对应 θ 为 0 时的方向; q 为一个恒定值,表示超表面的空间旋转率。这里, ϕ_0 被设置为 0 。

以下对空间变化的超表面的 Jones 变换矩阵进行推导。快轴为水平方向的波片的 Jones 矩阵可以表示为^[31]

$$\mathbf{M}_{\text{wp}} = \begin{pmatrix} \exp\left(\frac{i\delta}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-\frac{i\delta}{2}\right) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中: δ 为波片的相位延迟。对于实验中所采用的超表面,其 Jones 矩阵可以表示为^[32]

$$\mathbf{M}(\phi) = \mathbf{R}(-\phi) \mathbf{M}_{\text{wp}} \mathbf{R}(\phi), \quad (4)$$

其中:

$$\mathbf{R}(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}. \quad (5)$$

将(3)式和(5)式代入(4)式,与位置相关的 Jones 矩阵 $\mathbf{M}(\phi)$ 可扩展为

$$\mathbf{M}(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \frac{\delta}{2} - i \cos(2\phi) \sin \frac{\delta}{2} & -i \sin(2\phi) \sin \frac{\delta}{2} \\ -i \sin(2\phi) \sin \frac{\delta}{2} & \cos \frac{\delta}{2} + i \cos(2\phi) \sin \frac{\delta}{2} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

假设超表面有一个 π 相位的均匀双折射相位延迟(半波),并且在其横截面上沿快轴方向相位是非均匀的,则 Jones 矩阵 $\mathbf{M}(\phi)$ 可以简化为

$$\mathbf{M}_{\text{hw}}(\phi) = \begin{pmatrix} \cos(2\phi) & \sin(2\phi) \\ \sin(2\phi) & -\cos(2\phi) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

一束水平线偏振光,可用 Jones 电场矢量表示为 $\mathbf{E}_{\text{in}} = E_0(1, 0)^T$, 当它通过 q 值为 q_1 的超表面后,其输出可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{M}_{\text{hw}} \mathbf{E}_{\text{in}} &= E_0 \begin{pmatrix} \cos(2\phi) & \sin(2\phi) \\ \sin(2\phi) & -\cos(2\phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \\ E_0 \begin{pmatrix} \cos(2\phi) \\ \sin(2\phi) \end{pmatrix} &= E_0 \begin{pmatrix} \cos(2q_1\theta) \\ \sin(2q_1\theta) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (8)$$

显然,一束线偏振光通过超表面后,就可以得到 CVB,但是该 CVB 的偏振阶数依旧是不可改变的。因此,在该超表面后级联另外一个 q 值为 q_2 的超表面,可得

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{out1}} = \mathbf{M}_{\text{hw}} \mathbf{E}_{\text{out}} &= \\ E_0 \begin{pmatrix} \cos(2q_2\theta) & \sin(2q_2\theta) \\ \sin(2q_2\theta) & -\cos(2q_2\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(2q_1\theta) \\ \sin(2q_1\theta) \end{pmatrix} &= \\ E_0 \begin{pmatrix} \cos[2(q_2 - q_1)\theta] \\ \sin[2(q_2 - q_1)\theta] \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

至此,通过级联两个不同偏振阶数的超表面,可实现 CVB 偏振阶数的减操作,所得到的 CVB 偏振阶数 $l = 2(q_2 - q_1)$ 。若在这两个超表面之间插入一个快轴为水平方向的半波片 $\mathbf{J}_{\text{hw}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$, 可

得输出为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{out2}} = \mathbf{M}_{\text{hw}} \mathbf{J}_{\text{hw}} \mathbf{E}_{\text{out}} &= \\ E_0 \begin{pmatrix} \cos(2q_2\theta) & \sin(2q_2\theta) \\ \sin(2q_2\theta) & -\cos(2q_2\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(2q_1\theta) \\ \sin(2q_1\theta) \end{pmatrix} &= \\ E_0 \begin{pmatrix} \cos[2(q_1 + q_2)\theta] \\ \sin[2(q_1 + q_2)\theta] \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

由(10)式可见,最终得到 CVB 的偏振阶数是两个超表面偏振阶数和的 2 倍,从第二块超表面出射的 CVB 具有的偏振阶数 $l = 2(q_1 + q_2)$ 。

3 实验结果分析

调控 CVB 偏振阶数的实验装置如图 1 所示。实验中,首先利用连续波长(CW)激光器产生一束 1550 nm 的基模单色高斯光束,所产生基模单色高斯光束的光谱分布如图 1 右上角所示;接着,高斯光束通过格兰激光偏振片(GL1)转换为线偏振光;而后再通过一个超表面(MS1)转换为 CVB。图 1 左下角对应偏振阶数分别为 $q=1$ 和 $q=2$ 的超表面图解。图 2 对应 q 值分别为 0、1、2 的超表面所产生的光束光强分布图,左边的第 1 列为这 3 个模式的电场矢量分布,第 2 列对应为没有在电荷耦合器件(CCD)前放置 GL 时所对应的强度分布图。剩下的 4 列则对应在 CCD 前放置了 GL 的情况下,所得到的强度分布图,其中右上角表示检偏器的不同透振角度。

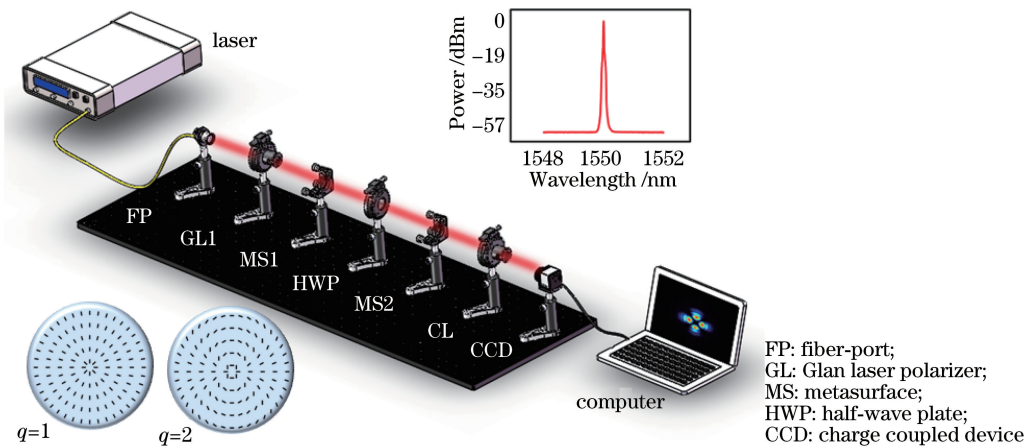


图 1 调控 CVB 偏振阶数的实验装置图。左下角为两个偏振阶数分别为 $q=1$ 和 $q=2$ 的超表面, 右上角为所产生基模高斯光束的光谱图

Fig. 1 Experimental setup of manipulating CVB polarization order. The lower left corner has two super-surfaces with polarization orders $q=1$ and $q=2$, and the upper right corner shows the spectrum of the generated fundamental Gaussian beam

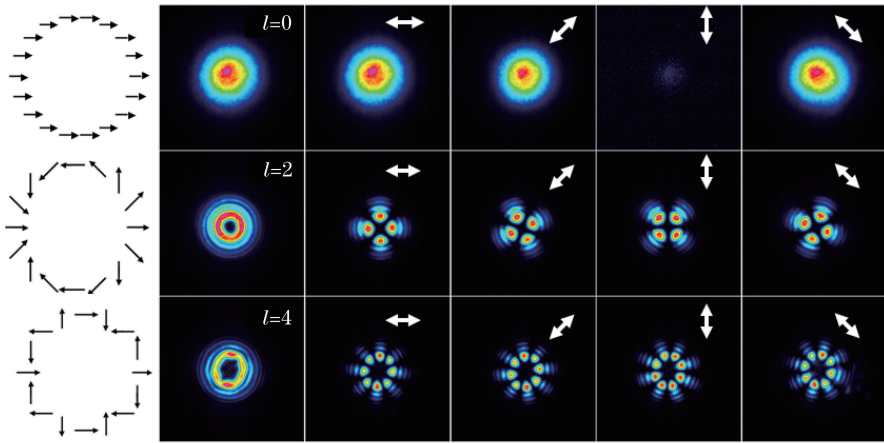


图 2 q 值分别为 0,1,2 的超表面所产生的光束光强分布图

Fig. 2 Beam intensity distributions of CVBs generated by using metasurfaces with $q=0, 1, 2$

首先,将两个超表面级联,以实现 CVB 偏振阶数的减操作。由(8)式可知,当一束线偏振光通过一个偏振阶数为 2 的超表面后,即变成一束 CVB。在这个超表面之后再放置一个偏振阶数为 1 的超表面,传输矩阵如(9)式所示。在 CCD 前不放置 GL 和放置 GL 的情况下所得到的光强分布示意图如

图 3 第 1 行所示,此时所得到的 CVB 偏振阶数为一 2,而将两块超表面各自位置互换之后所得到的实验结果如图 3 第 2 行所示,此时所得到的 CVB 偏振阶数为 2。

如上所述,通过将两块不同偏振阶数的超表面级联,实现了 CVB 偏振阶数的减法运算。

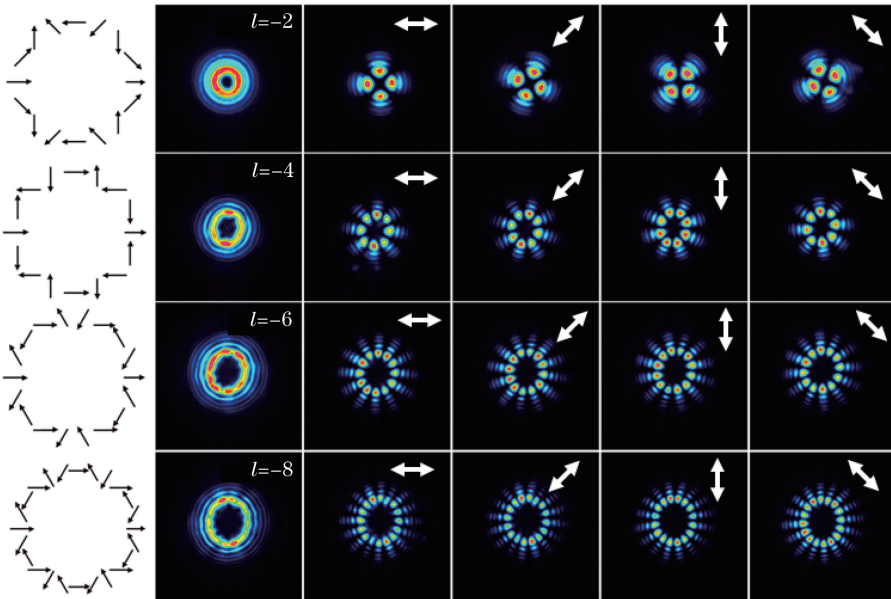


图 3 在超表面之后插入半波片反转 CVB 偏振阶数实验结果

Fig. 3 Experimental results of CVBs with reversed polarization order generated by inserting HWP behind metasurface

通过理论分析可知,当在超表面后插入一块半波片时,从半波片出射的即是偏振阶数获得反转的 CVB。如图 3 所示,通过该系统,可分别获得经过反转的偏振阶数为 -2, -4, -6, -8 的 CVB,如此,实现 CVB 偏振阶数的加法操作就很简单了。由(10)式可知,在两块超表面之间插入一块半波片,第 1 块超表面产生 CVB,其后的半波片使所产生

CVB 的偏振阶数反转,而后第 2 块超表面再给 CVB 增加一个偏振阶数,如此即可实现了 CVB 偏振阶数的加法操作。图 4 为第 1 块超表面偏振阶数 $q=2$,第 2 块超表面偏振阶数分别为 $q=1$ 和 $q=2$ 的实验结果图,如图所示,得到的 CVB 偏振阶数分别为 6 和 8。

利用该系统生成的不同偏振阶数的 CVB 的计算结果如图 5 所示,通过该系统生成了以 2 为步长,

偏振阶数为 $-8\sim 8$ 的一系列 CVB,图 5 对应为所生成 CVB 的光强分布图。由图 5 可见,实验结果与理论分析十分吻合。从所得的实验结果中也可以看

到,二维电介质超表面不仅可用于生成 CVB,同样可以通过偏振阶数的加减运算来灵活操控所生成 CVB 的偏振阶数。

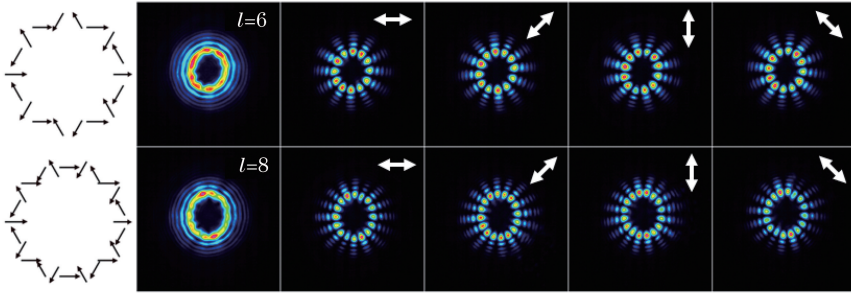


图 4 在两块超表面之间插入半波片生成不同阶数 CVB 的实验结果

Fig. 4 Experimental results of CVBs with different orders generated by inserting HWP between two cascaded metasurfaces

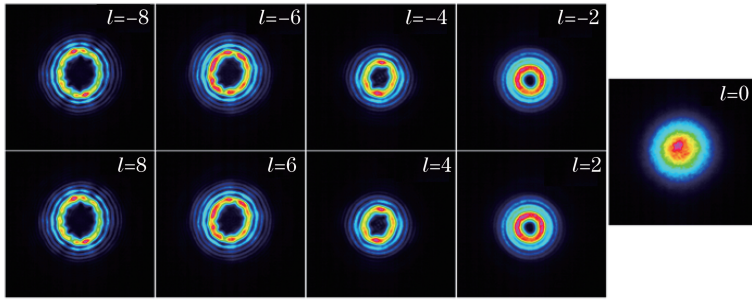


图 5 利用该系统生成的不同偏振阶数的 CVB

Fig. 5 CVBs with different orders generated through proposed system

4 结 论

研究了一种将两块二维电介质超表面级联以实现灵活操控生成 CVB 偏振阶数的方法。理论计算和实验结果都表明这种方法具有可行性。将两块超表面和一个半波片级联,实现了 CVB 偏振阶数的加减,从而自由操控 CVB 偏振阶数。其中,CVB 偏振阶数减操作是通过将两个超表面级联实现的,而 CVB 偏振阶数加操作则是借助半波片对偏振阶数进行反转,从而化减操作为加操作。实验实现了在 $-8\sim 8$ 范围内,以 2 为步长的 CVB 偏振阶数的自由调控。自由操控 CVB 偏振阶数也对 CVB 在光通信和信息处理方面潜在的大规模应用有重要意义。

参 考 文 献

[1] Zhan Q W. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(1): 1-57.
 [2] Dai J, Gao J, Fan Z G. Polarization-maintaining capacity of backscattered linearly and circularly polarized lights[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0505002.

戴俊, 高隽, 范之国. 线偏振光与圆偏振光后向散射偏振保持能力 [J]. *中国激光*, 2017, 44 (5): 0505002.

[3] Hall D G. Vector-beam solutions of Maxwell's wave equation[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(1): 9-11.
 [4] Milione G, Lavery M P J, Huang H, *et al.* 4×20 Gbit/s mode division multiplexing over free space using vector modes and a q -plate mode (de) multiplexer[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 1980-1983.
 [5] Zhao Y F, Wang J. High-base vector beam encoding/decoding for visible-light communications[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4843-4846.
 [6] Drevinskis R, Zhang J Y, Beresna M, *et al.* Laser material processing with tightly focused cylindrical vector beams [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(22): 221107.
 [7] Xu J, Yang Z J, Li J X, *et al.* Electron acceleration by a tightly focused cylindrical vector Gaussian beam [J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 14(2): 025301.
 [8] Huang L, Guo H, Li J, *et al.* Optical trapping of gold nanoparticles by cylindrical vector beam [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(10): 1694-1696.
 [9] Yan S H, Yao B L. Radiation forces of a highly focused radially polarized beam on spherical particles

- [J]. *Physical Review A*, 2007, 76(5): 053836.
- [10] Skelton S E, Sergides M, Saija R, *et al.* Trapping volume control in optical tweezers using cylindrical vector beams[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(1): 28-30.
- [11] Chen R, Agarwal K, Sheppard C J R, *et al.* Imaging using cylindrical vector beams in a high-numerical-aperture microscopy system [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 3111-3114.
- [12] Yonezawa K, Kozawa Y, Sato S. Generation of a radially polarized laser beam by use of the birefringence of a c-cut Nd:YVO₄ crystal[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(14): 2151-2153.
- [13] Machavariani G, Lumer Y, Moshe I, *et al.* Birefringence-induced bifocusing for selection of radially or azimuthally polarized laser modes [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3304-3310.
- [14] Kozawa Y, Sato S. Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(22): 3063-3065.
- [15] Dong S H, Wang X L, Su R T, *et al.* Research on conversion technology from non-polarized to linearly polarized laser based on the principle of polarization phase locking[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0202006.
董苏惠, 王小林, 粟荣涛, 等. 基于偏振锁相的非线偏-线偏光转换技术研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0202006.
- [16] Zhan Q W, Leger J R. Interferometric measurement of the geometric phase in space-variant polarization manipulations [J]. *Optics Communications*, 2002, 213(4/5/6): 241-245.
- [17] Chen S Z, Zhou X X, Liu Y C, *et al.* Generation of arbitrary cylindrical vector beams on the higher order Poincaré sphere[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(18): 5274-5276.
- [18] Li Y, Liu Y C, Ling X H, *et al.* Observation of photonic spin Hall effect with phase singularity at dielectric metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1767-1774.
- [19] Yi X N, Li Y, Ling X H, *et al.* Addition and subtraction operation of optical orbital angular momentum with dielectric metasurfaces [J]. *Optics Communications*, 2015, 356: 456-462.
- [20] Liu Y C, Ling X H, Yi X N, *et al.* Realization of polarization evolution on higher-order Poincaré sphere with metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(19): 191110.
- [21] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. *Science*, 2013, 339(6125): 1232009.
- [22] Beresna M, Gecevičius M, Kazansky P G, *et al.* Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(20): 201101.
- [23] Kang M, Chen J, Wang X L, *et al.* Twisted vector field from an inhomogeneous and anisotropic metamaterial[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, 29(4): 572-576.
- [24] Liu Y C, Ke Y G, Luo H L, *et al.* Photonic spin Hall effect in metasurfaces: a brief review [J]. *Nanophotonics*, 2017, 6(1): 51-70.
- [25] Liang Y S, Yao B L, Lei M, *et al.* Optical micromanipulation based on spatial modulation of optical fields[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026003.
梁言生, 姚保利, 雷铭, 等. 基于空间光场调控技术的光学微操纵 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026003.
- [26] Ling X H, Zhou X X, Yi X N, *et al.* Giant photonic spin Hall effect in momentum space in a structured metamaterial with spatially varying birefringence[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(5): e290.
- [27] Shu W X, Ke Y G, Liu Y C, *et al.* Radial spin Hall effect of light[J]. *Physical Review A*, 2016, 93(1): 013839.
- [28] Stalder M, Schadt M. Linearly polarized light with axial symmetry generated by liquid-crystal polarization converters[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(23): 1948-1950.
- [29] Zhang Y, Guo X Y, Han L, *et al.* Gouy phase induced polarization transition of focused vector vortex beams [J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25725-25733.
- [30] Zhang Y Q, Dou X J, Yang Y, *et al.* Flexible generation of femtosecond cylindrical vector beams [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(3): 030007.
- [31] Yariv A, Yeh P. *Photonics: optical electronics in modern communications* [M]. New York: Oxford University Press, 2007.
- [32] Marrucci L, Manzo C, Paparo D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(16): 163905.