

基于Metasurface的柱矢量光束的产生*

易煦农¹⁾³⁾ 李瑛^{1)2)†} 刘亚超²⁾ 凌晓辉¹⁾ 张志友¹⁾ 罗海陆¹⁾²⁾

1) (深圳大学光电工程学院, 深圳 518060)

2) (湖南大学微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 长沙 410082)

3) (湖北工程学院物理与电子信息工程学院, 孝感 432000)

(2013年12月4日收到; 2014年1月8日收到修改稿)

本文提出了一种基于Metasurface产生任意柱矢量光束的方法. 采用的Metasurface是在熔融石英上刻蚀空间变化的非周期光栅构成. 非周期光栅会形成空变的有效双折射, 从而对光场的偏振态空间分布进行调制. 通过琼斯矩阵的方法分析得出这样的Metasurface可以将入射线偏振光转换为柱矢量光束, 并且只需要改变入射线偏振光的偏振方向即可获得高阶庞加莱球赤道上任意一点的柱矢量光束. 最后, 用Metasurface搭建了一套简单、高效的柱矢量光束产生系统, 实验结果与理论分析一致.

关键词: 柱矢量光束, 高阶庞加莱球, 激光光学

PACS: 42.25.-p, 42.25.Ja, 03.65.Vf

DOI: 10.7498/aps.63.094203

1 引言

所谓的矢量光束就是指偏振态空间非均匀分布的光束^[1]. 这一概念是相对于偏振态空间均匀分布的标量光束而提出的. 矢量光束中最为特殊的就是偏振态在横截面上呈轴对称分布的光束即柱矢量光束^[2]. 柱矢量光束是亥姆霍兹方程在柱坐标系下的特征解, 在坐标原点处其偏振态是不确定的即存在奇点. 偏振奇点导致柱矢量光束在原点处光强为零, 所以其光强呈环状分布. 柱矢量光束当中最受人们关注的两个最为典型的例子是径向偏振和角向偏振光束, 这两种光束偏振方向与径向的夹角分别为 0° 和 90° . 径向偏振光经紧聚焦后其矢量性质会发生变化, 且在焦点处能够获得很强的纵向电场分量^[1,3-7]; 角向偏振光经紧聚焦后可以获得纯纵向磁场分量, 光强仍然保持空心的环状分布, 且横截面各处偏振方向保持不变^[4,8]; 和径向成其他夹角的柱矢量光束经聚焦后能够形成平顶的光强分布^[1,4]. 正是因为柱矢量光束的这些特性使其在

激光加工、电子加速、光信息处理、光学捕捉与控制 and 高分辨成像等领域有巨大潜在应用价值^[1,9-12], 从而引起了许多研究者的高度重视.

通过多年的研究, 人们开发出多种实现矢量光束产生的方法^[1,13-17], 归纳起来起来可以分为主动方法和被动方法. 主动方法主要对激光器光学谐振腔进行特殊的设计, 在激光器内选出所需要的模式. 被动方法则一般采用干涉法、空间光调制器波面重构法和晶体双折射法等. 但是, 现在人们所常用的主动和被动方法都存在需要搭建复杂的光学系统及成本较高等缺陷. 近年来, 由于微纳米技术的发展, 通过由周期性和非周期性微纳米结构组成的Metasurface来调控光已经得到研究人员的广泛关注^[18-22].

Metasurface是一种二维的微纳米结构, 而Metamaterial可以认为是其三维版本. 超材料是由人工设计构造的微结构单元代替自然界的微观粒子组成^[20]. 由于Metasurface是二维的平面结构, 其制作难度和成本都比三维的Metamaterial要低, 而某些光学特性还要优于三维的Metamateri-

* 教育部博士点基金(批准号: 20100542917)和湖北省教育厅科学研究项目(批准号: Q20132703)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: queenly@vip.sina.com

al. 研究人员设计出的各种结构的 Metasurface 在成像、传感、数据存储、量子信息处理^[20-22]和操控光的自旋霍尔效应^[23-26]等方面展现出了令人惊奇的性能. 在利用人工微结构产生矢量光场方面, 研究者们已经通过设计出的空间改变的亚波长光栅实现了空间偏振态的转换. Marrucci 等利用液晶设计出所谓的 q 板调控偏振的原理和功能也与 Metasurface 类似, 但液晶的损伤阈值较低, 不利于实际应用^[22,27].

本文采用 Metasurface 来产生柱矢量光束. 我们采用的 Metasurface 是在熔融石英刻蚀方向随方位角改变而改变的光栅来实现空间变化的相位延迟. 理论分析表明只要用线偏振光入射到 Metasurface 就可以获得柱矢量光束, 且柱矢量光束的偏振方向与径向的夹角随入射光偏振方向的改变而改变. 最后, 我们用 Metasurface 搭建了一个简单易调的光学系统实现了柱矢量光束的产生, 从而证明了理论分析的正确性. 基于 Metasurface 的方法产生柱矢量光束相比于传统方法具有光学系统简单, 能量利用效率高, 成本低廉, 稳定可靠, 以及损伤阈值高等许多优点, 我们相信 Metasurface 一定能成为产生柱矢量光束的一个有效工具.

2 理论分析

柱矢量光束指光束横截面上任一点的偏振方向都与径向成一定的夹角, 其电场可以表示为

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

其中 $E_0(r)$ 为电场振幅, ϕ 为方位角, \mathbf{e}_x 和 \mathbf{e}_y 分别为 x 方向和 y 方向单位矢量, θ_0 为电场矢量与径向的夹角. 当 $\theta_0 = 0$ 时, (1) 式表示的柱矢量光束为径向偏振, 电场矢量始终平行于径向; 当 $\theta_0 = \pi/2$ 时, (1) 式表示的柱矢量光束为角向偏振, 电场矢量始终垂直于径向.

为了便于表征光场的偏振态, 1892 年, 庞加莱基于斯托克斯参量构建了一个球体, 球面上任意一点表示一个偏振态, 这就是所谓的庞加莱球. 由于庞加莱球是一种几何表象, 所以可以非常直观、形象的描述光的偏振态. 但是, 庞加莱球只能描述偏振态空间均匀分布的光束, 而对于近年来受到极大关注的偏振态空间非均匀分布的矢量光束却无能为力, 为了解决这一问题, Milione 等引入了高阶庞

加莱球的概念^[28]. 高阶庞加莱球的斯托克斯参数定义为

$$\begin{aligned} S_0^m &= |\langle R_m/E \rangle|^2 + |\langle L_m/E \rangle|^2, \\ S_1^m &= 2\text{Re}(\langle R_m/E \rangle^* \langle L_m/E \rangle), \\ S_2^m &= 2\text{Im}(\langle R_m/E \rangle^* \langle L_m/E \rangle), \\ S_3^m &= |\langle R_m/E \rangle|^2 - |\langle L_m/E \rangle|^2, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 R_m, L_m 分别表示具有涡旋相位的右旋圆偏振和左旋圆偏振, 其数学表达式为

$$\langle R_m \rangle = \exp(-im\phi)(\mathbf{e}_x - i\mathbf{e}_y)/\sqrt{2}, \quad (3)$$

$$\langle L_m \rangle = \exp(+im\phi)(\mathbf{e}_x + i\mathbf{e}_y)/\sqrt{2}, \quad (4)$$

其中 m 为拓扑荷数.

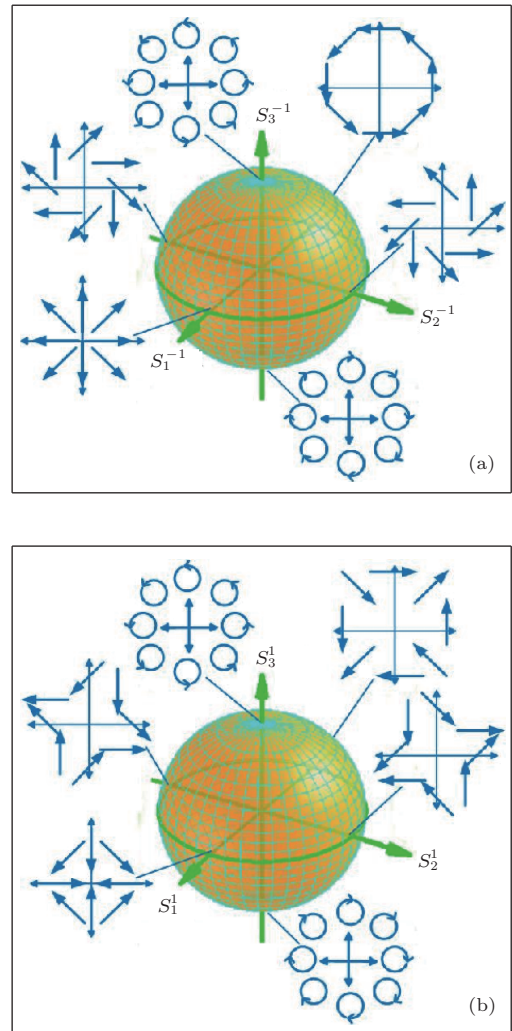


图 1 高阶庞加莱球 (a) $m = -1$; (b) $m = +1$

图 1 给出了 $m = \pm 1$ 的高阶庞加莱球示意图. 高阶庞加莱球的南极和北极点分别表征带涡旋相位的右旋和左旋圆偏振光. 对于 $m = -1$ 的高

阶庞加莱球而言, 赤道上所有的点满足 $S_3^{-1} = 0$, 故赤道上的点表征的是线偏振矢量光束, 且这些光束的偏振态空间分布都具有柱对称性, 所以又称之为柱矢量光束. 比如 S_1^{-1} 轴与球面相交的点 $(1, 0, 0)$ 和 $(-1, 0, 0)$ 分布代表径向偏振光和角向偏振光. 本文就是要采用 Metasurface 的方法来产生 $m = -1$ 高阶庞加莱球赤道上的所有光束. $m = -1$ 和 $m = +1$ 两个庞加莱球上偏振态的转化可以由一个半波片来实现.

我们采用的 Metasurface 是在熔融的石英硅上蚀刻一个非周期性光栅, 其结构随方位角的改变而改变, 从而构成一种具有特定空间结构的不均匀各向异性介质. 微结构方位角的改变本质上可以等效为局域单轴晶体光轴方向的改变, 所以我们可以将这样的 Metasurface 看成是光轴随方位角变化的空间非均匀分布位相延迟片或者波片. 通过人工设计的这种空变有效双折射可以对光场的偏振分布进行空间调制. 理论上, 只要能够加工出合适的空间微结构分布, 就能够获得任意的空间偏振态分布. 我们实验所用的 Metasurface 与近年来 Marrucci 等^[27] 提出的用液晶制作的 q 板 (q -plate) 原理和功能都类似. 值得注意的是, 液晶有分辨率低和损伤阈值很低的缺点, 而 Metasurface 可以根据不同的工作波长, 选择不同的材料作为基片, 以

大大提高透过率和损伤阈值, 并且随着微纳米加工技术的发展, Metasurface 的分辨率也要高于液晶.

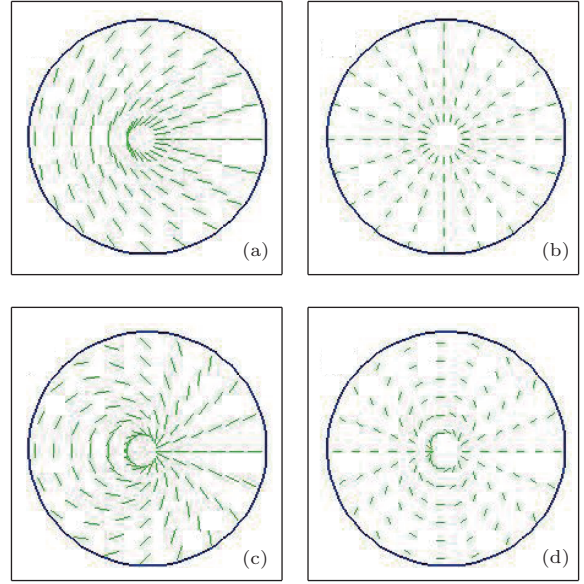


图2 Metasurface 示意图 (a) $q = 1/2$; (b) $q = 1$; (c) $q = 3/2$; (d) $q = 2$

我们实验采用的 Metasurface 相位延迟为 π , 所以这样的 Metasurface 可以当作光轴随方位角变化的半波片. Metasurface 的工作波长在可见光波段 ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 其琼斯矩阵可以表示为

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) - i \cos 2\phi \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) & -i \sin(2\phi) \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \\ -i \sin(2\phi) \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + i \cos 2\phi \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

其中 $\phi = \frac{1}{2} \arctan \frac{y}{x}$, $\psi = \pi$. 与 q 板进行比较可知, 这样的 Metasurface 相当于 $q = \frac{1}{2}$ 的 q 板. 图 2 给出了 $q = \frac{1}{2}$, $q = 1$, $q = \frac{3}{2}$ 和 $q = 2$ 的 Metasurface 结构示意图.

假设有初始偏振方向为 θ_0 的线偏振光入射到 Metasurface 上, 则出射光可以表示为

$$\mathbf{E}(\phi) = \begin{pmatrix} \cos(2\phi - \theta_0) \\ \sin(2\phi - \theta_0) \end{pmatrix}. \quad (6)$$

与 (1) 式相比较, 我们不难看出 (2) 式所表示的通过 Metasurface 透射的光束为柱矢量光束. 我们可以通过改变入射线偏振光的偏振方向 θ_0 来获得庞加莱球赤道上不同位置的柱矢量光束. 当 $\theta_0 = 0$ 时, $\mathbf{E}(\phi) = \begin{pmatrix} \cos 2\phi \\ \sin 2\phi \end{pmatrix}^T$, 得到的

是庞加莱球上 $(1, 0, 0)$ 点的光束即径向偏振光束; 当 $\theta_0 = 3\pi/4$ 时, 可以得到庞加莱球上 $(0, 1, 0)$ 点的光束即方位角 45° 偏振光束; 当 $\theta_0 = \pi/2$ 时, $\mathbf{E}(\phi) = \begin{pmatrix} \sin 2\phi \\ -\cos 2\phi \end{pmatrix}^T$, 得到的是庞加莱球上 $(-1, 0, 0)$ 点的光束即角向偏振光束. 显而易见, 采用 Metasurface 的方法我们只需要调整入射线偏振光的偏振方向就可以调节柱矢量光束的偏振方位角, 从而非常方便地实现柱矢量光束之间的转化. 在其他常见的柱矢量光束产生方法中, 研究人员一般通过两个半波片的组成旋光元件, 通过调节两个半波片光轴之间的夹角才能实现从一种柱矢量光束转化到另外一种柱矢量光束, 比如当两个半波片光轴之间的夹角为 $\pi/4$ 时可以实现径向偏振光与角向偏振光之间的转换.

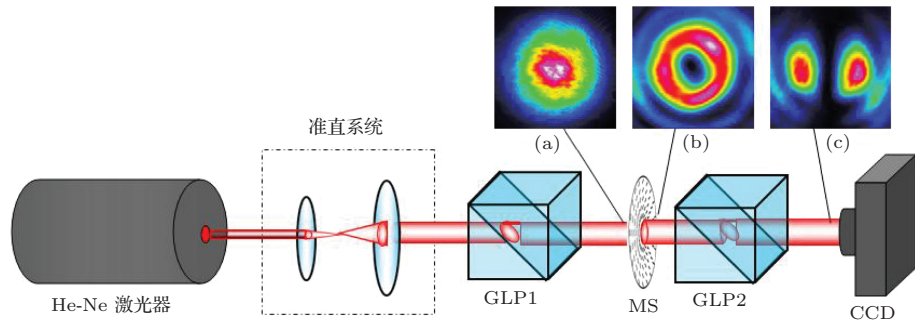


图3 产生柱矢量光束实验装置图 (a) 入射光强度分布; (b) 径向偏振光强度分布; (c) 径向偏振光经检偏器后光强分布

3 实验结果与讨论

我们采用如图3所示实验装置. 实验中采用 THORLABS 公司的 He-Ne 激光 (波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 激光器出射的基模高斯光束首先经准直系统扩束准直后通过格兰激光偏振器 (GLP1) 得到高光束质量的线偏振光. 从 GLP1 出射的线偏振光经 Metasurface (MS) 后被转化为柱矢量光束. 格兰激光偏振器 GLP2 作为检偏器检验光束的偏振态. CCD 用来记录光束的强度分布. 图3(b) 部分给出了实验测得的径向偏振光束光强分布图. 当不加检偏器 GLP2 时, 不管入射到 Metasurface 的线偏振光的偏振方向角度为何值, 所产生的柱矢量光束的光强分布是一样的环状, 中间都会出现一个暗点, 这是由于光束中心点偏振态是不确定的, 是一个偏振奇点, 所以光强为零. 这套系统比用空间光调制器等方法产生柱矢量光束的光学系统要简单得多, 且光路稳定, 容易调试, 不易受振动、空气湍流等等环境因素的影响.

图4给出了实验测得的结果. 第一行给出的是检偏器透光方向与水平方向夹角的示意图, 检偏器与水平方向的夹角分别为 0° , 45° , 90° 和 135° . 第二行给出了 $\theta_0 = 0$ 的光通过检偏器后 CCD 记录的光强分布图. 我们可以看出消光方向始终与检偏器透光方向成 90° . 当逆时针旋转检偏器, CCD 显示消光方向也跟着逆时针旋转, 故可判断此光束的偏振态对应高阶庞加莱球上的 $(1, 0, 0)$ 点, 为径向偏振光. 第四行为 $\theta_0 = 90^\circ$ 的情况, 由图可以看出消光方向与检偏器成 0° 角, 并且消光方向随检偏器同方向转动, 故可以判断此光束为角向偏振, 对应高阶庞加莱球赤道上的 $(-1, 0, 0)$ 点. 径向偏振和角向偏振消光方向互补, 是一对相互正交的偏振态. 第三行和第五行分别为 $\theta_0 = 135^\circ$ 和 $\theta_0 = 45^\circ$

的情况. 由图4不难看出其消光方向与检偏器分别成 45° 和 135° , 且其消光方向的旋转与检偏器的旋转方向一致, 故可判定此两种光束的偏振方向与径向的夹角分别为 45° 和 135° , 对应高阶庞加莱球上的点为 $(0, 1, 0)$ 和 $(0, -1, 0)$.

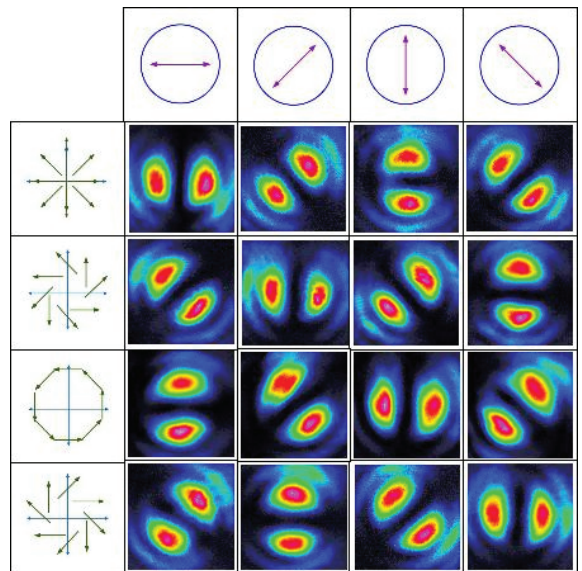


图4 实验产生的柱矢量光束经检偏器后的光强分布图

从实验结果图4我们还可以看出, 柱矢量光束在庞加莱球赤道上转过的角度即经度是入射线偏振光偏振方向转过角度的2倍. 当入射线偏振光偏振方向转过 $\pi/4$ 时, 柱矢量光束在庞加莱球上的经度变化 $\pi/2$; 当入射线偏振光偏振方向转过 $\pi/2$ 时, 柱矢量光束在庞加莱球上的经度变化 π , 柱矢量光束变为与之正交的柱矢量偏振; 入射光偏振方向旋转 π , 柱矢量光束偏振坐标绕赤道变化 2π .

综上所述, 实验测得的结果与本文第二部分理论分析所得结果一致, 这证明采用 Metasurface 搭建的光学系统, 通过旋转起偏器 GLP1 调整入射光的偏振方向就可以获得 $m = -1$ 的高阶庞加莱球赤

道上各点的柱矢量光束.

4 结 论

本文提出用一个 Metasurface 组成光学系统可以产生 $m = -1$ 的高阶庞加莱球赤道上的任意柱矢量光束, 在 Metasurface 后插入一个半波片可以将 $m = -1$ 的高阶庞加莱球赤道上的柱矢量光束转为 $m = +1$ 的高阶庞加莱球赤道上对应点的柱矢量光束. 实验研究表明: Metasurface 的人工微结构可以对光场实现空变的相位调控, 进而对光场偏振进行空域的调制; 线偏振光通过 Metasurface 后转化为柱矢量光束, 柱矢量光束的偏振方向由入射线偏振光的偏振方向决定; 柱矢量光束在高阶庞加莱球上沿赤道转过的经度是入射线偏振光偏振角旋转的两倍; 由于微纳米加工技术的发展, 新型超薄 Metasurface 的制作和应用已经拓展到可见光波段. 我们有理由相信 Metasurface 不仅会成为产生柱矢量光束的有效工具, 而且也能在操控光的其他特性方面大显身手.

参考文献

- [1] Zhan Q W 2009 *Adv. Opt. Photon.* **1** 1
- [2] Jia X T, Wang Y Q 2011 *Opt. Lett.* **36** 295
- [3] Deng D M, Guo Q 2007 *Opt. Lett.* **32** 2711
- [4] Youngworth K S, Brown T G 2000 *Opt. Express.* **47** 1963
- [5] Kozawa Y, Sato S 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **32** 1839
- [6] Zhang Z M, Pu J X, Wang X Q 2008 *Appl. Opt.* **47** 1963
- [7] Huang K, Shi P, Cao G W, Li K, Zhang X B, Li Y P 2011 *Opt. Lett.* **36** 888
- [8] Hao X, Kuang C F, Wang T T, Liu X 2010 *Opt. Lett.* **35** 3928
- [9] Yan S H, Yao B L 2007 *Phys. Rev. A* **76** 053836
- [10] Zhao W Q, Tang F, Qiu L R, Liu D L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 054201 (in Chinese)[赵维谦, 唐芳, 邱丽荣, 刘大礼 2013 物理学报 **62** 054201]
- [11] Chang Q, Yang Y F, He Y, Liu H G, Liu J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104202 (in Chinese)[常强, 杨艳芳, 何英, 刘海港, 刘键 2013 物理学报 **62** 104202]
- [12] Pu J X, Wang T, Lin H C, Li C L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 089201
- [13] Maurer C, Jesacher A, Furrhapter S, Bernet S, Ritsch-Marte M 2007 *New. J. Phys.* **9** 78
- [14] Wang X L, Ding J, Ni W J, Guo C S, Wang H T 2007 *Opt. Lett.* **32** 3549
- [15] Wang X L, Li Y N, Chen J, Guo C S, Ding J P, Wang H T 2010 *Opt. Express.* **18** 10786
- [16] Xu K, Yang Y F, He Y, Han X H, Li C F 2010 *J. Opt. Soc. Am. A* **27** 572
- [17] Li Y Y, Chen Z Y, Liu H, Pu J X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1740 (in Chinese)[李阳月, 陈子阳, 刘辉, 蒲继雄 2010 物理学报 **59** 1740]
- [18] Bomzon Z, Kleiner V, Hasman E 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 1587
- [19] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, Hasman E 2002 *Opt. Lett.* **27** 285
- [20] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M, *Science* **339** 1289
- [21] Beresna M, Gecevičius M, Kazansky P G, Gertus 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 201101
- [22] Kang M, Chen J, Wang X L, Wang H T 2012 *J. Opt. Soc. Am. B* **29** 572
- [23] Tang M, Zhou X X, Luo H L, Wen S C 2012 *Chin. Phys. B* **21** 124201
- [24] Ling X H, Zhou X X, Luo H L, Wen S C 2012 *Phys. Rev. A* **86** 053824
- [25] Luo H L, Zhou X X, Shu W X, Wen S C, Fan D Y 2011 *Phys. Rev. A* **84** 043806
- [26] Zhou X X, Ling X H, Luo H L, Wen S C 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 251602
- [27] Cardano F, Karimi E, Slussarenko S, Marrucci L, Lisio C, Santamato E 2012 *Appl. Opt.* **51** C1
- [28] Milione G, Sztul H I, Nolan D A, Alfano R R 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 053601

Generation of cylindrical vector beams based on metasurface*

Yi Xu-Nong¹⁾³⁾ Li Ying^{1)2)†} Liu Ya-Chao²⁾ Ling Xiao-Hui¹⁾
Zhang Zhi-You¹⁾ Luo Hai-Lu¹⁾²⁾

1) (*College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

2) (*Laboratory for Micro/Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China*)

3) (*College of Physics and Electronic Information Engineering, Hubei engineering University, Xiaogan 432000, China*)

(Received 4 December 2013; revised manuscript received 8 January 2014)

Abstract

A method of generating cylindrical vector beams based on metasurface is presented in this paper. The metasurface is a fused silica with a space-variant non-periodic grating which is written by laser. The non-periodic grating induces a space-variant effective birefringence that modulates the space distribution of polarization state. It is shown that an incident linearly polarized light can be converted to a cylindrical vector beam by the method of Jones matrix. We can obtain an arbitrary cylindrical vector beam on the equator of the higher-order Poincaré sphere. A simple and efficient experimental system is established with a metasurface. Experimental results are in agreement with the theoretical analysis.

Keywords: cylindrical vector beam, high-order Poincaré sphere, laser optics

PACS: 42.25.-p, 42.25.Ja, 03.65.Vf

DOI: [10.7498/aps.63.094203](https://doi.org/10.7498/aps.63.094203)

* Project supported by Ph. D. Programs Foundation of Ministry of Education of China(Grant No. 20100542917), and the Foundation of Hubei Educational Department, China (Grant No. Q20132703).

† Corresponding author. E-mail: queenly@vip.sina.com