

·特邀论文·

# 矢量涡旋光束的模式连续可调生成技术

付时尧, 高春清\*

北京理工大学光电学院, 北京 100081

**摘要** 矢量涡旋光束是一种新型的结构光束, 具有横截面各向异性分布的偏振态, 同时携带有轨道角动量。矢量涡旋光束的这些独特性质使得其在光通信、光镊、激光加工等领域具有重要的应用价值。对于不同的应用, 所需的矢量涡旋光束的偏振态、相位分布不同, 因此偏振、相位模式连续可调的矢量涡旋光束的生成系统是矢量涡旋光束应用的重要基础。报道了本课题组在矢量涡旋光束生成方面的工作, 主要介绍了腔外模式连续可调的矢量涡旋光束的生成方法, 以及矢量涡旋光束阵列的生成方法。

**关键词** 光栅; 涡旋光束; 偏振; 轨道角动量; 衍射光栅

**中图分类号** O436

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201939.0126014

## Selective Generation of Arbitrary Vectorial Vortex Beams

Fu Shiyao, Gao Chunqing\*

*School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

**Abstract** Vectorial vortex beams are a new kind of structure beams, with anisotropic polarization distributions and carrying orbital angular momentum. Such unique features contribute to their applications in lots of domains as optical communications, optical tweezers, laser material processing, etc. Different applications need different polarization and phase distributions. So generating vectorial vortex beams with continuously adjustable polarization and phase distributions is of great importance. In this paper, we introduce some approaches for generating vectorial vortex beams developed in our group, including generation of single vectorial vortex beams outside the cavity and generation of vectorial vortex beams arrays.

**Key words** grating; vortex beams; polarization; orbital angular momentum; diffraction gratings

**OCIS codes** 050.4865; 050.1950; 260.5430

## 1 引 言

光场调控技术是目前光学领域研究的热点之一, 其中, 对光束相位和偏振的调控一直受到国内外研究人员的特别关注。通过对相位和偏振进行非均匀调制, 可以获得具有不同特殊性质的新型光场。例如: 对光场的相位进行调制可以获得携带有轨道角动量的涡旋光束<sup>[1-2]</sup>, 该光束可以应用于超大容量光通信<sup>[3-6]</sup>、光镊<sup>[7]</sup>、旋转探测<sup>[8-9]</sup>、螺旋相衬成像<sup>[10-11]</sup>等技术中; 对光场的偏振态进行调制则会获得具有横截面偏振态各向异性分布的矢量光束<sup>[12]</sup>, 其独特的偏振态分布可使其广泛应用于激光加工<sup>[13]</sup>、高分辨率成像<sup>[14]</sup>、光通信<sup>[15]</sup>、表面等离子体

激发<sup>[16]</sup>等技术中。

近年来, 随着对光场调控技术研究的不断深入, 同时具有偏振涡旋和相位涡旋的光束引起了人们的关注, 这种新型结构光束通常被称为矢量涡旋光束 (VVB)<sup>[17]</sup>。矢量涡旋光束是涡旋光束和矢量光束的一种普遍形式, 既具有横截面各向异性的偏振态分布, 又具有螺旋相位, 并携带有轨道角动量<sup>[18]</sup>。涡旋光束和矢量光束可以分别看作是一种特殊的矢量涡旋光束。

针对不同的应用需求, 人们需要不同偏振、相位模式的矢量涡旋光束。因此, 如何实现偏振、相位模式连续可调的矢量涡旋光束十分重要。本文首先介绍了矢量涡旋光束的基本性质及生成矢量涡旋光束

**收稿日期:** 2018-08-21; **修回日期:** 2018-09-07; **录用日期:** 2018-09-25

**基金项目:** 国家自然科学基金(11834001)、国家重点基础研究发展计划(2014CB340002)、北京理工大学研究生科技创新重点项目(2017CX10003)

\* **E-mail:** gao@bit.edu.cn

的进展,之后重点介绍本课题组在腔外生成偏振、相位模式连续可调的矢量涡旋光束,以及生成矢量涡旋光束阵列方面的工作。

## 2 矢量涡旋光束的基本性质

一束矢量涡旋光束  $|\psi\rangle$  可以在正交圆偏振基底  $\{|R_m\rangle, |L_l\rangle\}$  上分解为两束携带有不同轨道角动量的涡旋光束:

$$|\psi\rangle = \psi_R^m |R_m\rangle + \psi_L^l |L_l\rangle, \quad (1)$$

式中:  $l$  和  $m$  分别为左、右旋涡旋光束的角量子数,也称为拓扑荷数或轨道角动量态;  $\psi_R^m$  和  $\psi_L^l$  为复系数,表征圆偏振分量  $|R_m\rangle$  和  $|L_l\rangle$  的振幅和初始相位。  $|R_m\rangle$  和  $|L_l\rangle$  可分别展开为

$$|R_m\rangle = \exp(im\varphi)[1, i]^T / \sqrt{2}, \quad (2)$$

$$|L_l\rangle = \exp(il\varphi)[1, -i]^T / \sqrt{2}, \quad (3)$$

式中:  $\varphi$  为角向坐标。由于光子的自旋角动量只有  $\pm 1$  两个本征值,分别对应于宏观上的左、右旋圆偏振态<sup>[19]</sup>,因此矢量涡旋光束亦可理解为由许多具有相反自旋角动量且携带有不同轨道角动量的光子叠加而来的。此外,(1)~(3)式也提供了一种腔外生成矢量涡旋光束的思路,即可先生成两束标量涡旋光束,再将它们偏振合成。

矢量涡旋光束可以用杂合庞加莱球模型来表征。人们最初用偏振庞加莱球的数学模型表示几种常见的各向同性的偏振态(线偏振态、椭圆偏振态和圆偏振态)<sup>[20]</sup>。后来,Milione等<sup>[21]</sup>对偏振庞加莱球进行了拓展,提出了高阶庞加莱球的概念,以表征具有各向异性偏振态分布的柱坐标矢量光束。为了进一步表征同时具有各向异性偏振态和相位分布的矢量涡旋光束,Yi等<sup>[22]</sup>将高阶庞加莱球继续扩展到更普遍的形式——杂合庞加莱球模型。在笛卡尔坐标下,杂合庞加莱球由杂合斯托克斯参量  $S_0, S_1, S_2$  和  $S_3$  描述:

$$\begin{cases} S_0 = |\psi_R^m|^2 + |\psi_L^l|^2 \\ S_1 = 2|\psi_R^m||\psi_L^l|\cos\phi \\ S_2 = 2|\psi_R^m||\psi_L^l|\sin\phi \\ S_3 = |\psi_R^m|^2 - |\psi_L^l|^2 \end{cases}, \quad (4)$$

式中:  $\phi = \arg(\psi_R^m) - \arg(\psi_L^l)$  为  $|R_m\rangle$  和  $|L_l\rangle$  的初始相位差。

图1为  $m=0, l=2$  时的杂合庞加莱球,不难看出,球面上每一个点  $(\theta, \sigma)$  均对应着一束具有复杂偏振态分布的矢量涡旋光束,杂合庞加莱球的南北两极分别为  $m=0, l=2$  的标量涡旋光束。球面上除

了南北两极以外的点,其余点的偏振态不仅沿角向变化,还沿径向变化,这种径向变化的偏振态是由参与偏振叠加的两个标量涡旋光束的尺寸差异造成的。

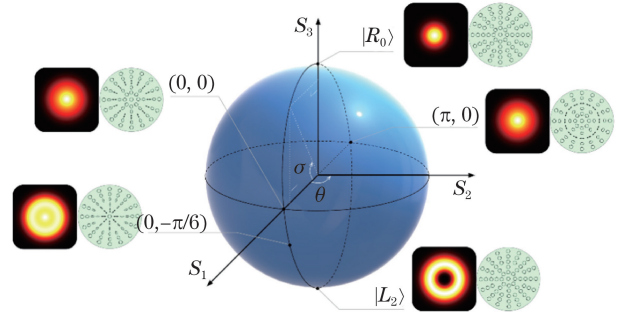


图1  $m=0, l=2$  时的杂合庞加莱球

Fig. 1 Hybrid-order Poincaré sphere with  $m=0$  and  $l=2$

在庞加莱球理论的基础上,Ren等<sup>[23]</sup>提出了广义庞加莱球模型,该模型从球面延伸到球内,从面延拓到体,用以表征更为复杂的光场分布。由于常见的偏振光束以及矢量光束、矢量涡旋光束均可用庞加莱球模型表征,因此也将它们统称为庞加莱光束<sup>[24]</sup>。

## 3 矢量涡旋光束生成的技术进展

矢量涡旋光束的生成技术主要分为腔内法和腔外法两大类。腔内法即在激光谐振腔内引入相位或偏振调制器件,或设计特殊的腔镜,使激光器直接输出矢量涡旋光束。腔外法则是在激光谐振腔外通过相位或偏振调制器件将基模高斯光束直接转化为矢量涡旋光束。

### 3.1 腔内法

目前,腔内法生成矢量涡旋光束的报道还很少,报道较多的是生成特定模式的涡旋光束,或是径向偏振、角向偏振等特殊偏振态分布的柱坐标矢量光束,并不能实现模式的连续可调输出。例如,2007年,Caley等<sup>[25]</sup>通过设计特殊的衍射光学元件输出镜进行模式选择,输出了特定模式的涡旋光束,但当生成不同的模式时,需要更换不同的输出镜。2009年,Zhou等<sup>[26]</sup>利用掺铒光纤激光器腔内插入双折射晶体进行模式选择,获得了波长为  $1.6 \mu\text{m}$  的径向偏振光束。近年来,上海光学精密机械研究所通过腔内插入布鲁斯特窗轴棱镜、微片激光器、光子晶体光栅等方法,对生成角向偏振光束的技术进行了研究<sup>[27-28]</sup>。

液晶空间光调制器(LC-SLM)等新型调制器件的出现,推动了矢量涡旋光束的腔内模式连续可调生成技术的发展。2013年,Ngcobo等<sup>[29]</sup>报道了一

种基于 LC-SLM 的数字激光器,他们将空间光调制器的液晶反射面作为谐振腔的一个反射镜,通过在空间光调制器上加载不同的全息光栅,得到了包括涡旋光束在内的不同的激光模式,实现了相位模式连续可调的输出。虽然这种数字激光器的效率较低,也无法对偏振参量进行实时调控,但它为腔内模式连续可调地生成矢量涡旋光束提供了一个新思路。

2016年,南非 CSIR 国家激光中心报道了在激光腔内同时调控偏振和相位以生成矢量涡旋光束的工作<sup>[30]</sup>。该中心的研究人员在一个侧面抽运的 Nd:YAG 激光系统中,于腔内插入 1/4 波片(QWP)和 q 波片,通过控制 QWP 与 q 波片间的主轴夹角,使偏振相位模式连续可调地产生了位于高阶庞加莱球上的波长为 1.064  $\mu\text{m}$  的矢量涡旋光束。

### 3.2 腔外法

腔外转化法是指在激光谐振腔外将基模高斯光束转化为矢量涡旋光束的方法,主要包括亚波长光栅法、干涉合成法、q 波片转化法等。与腔内法相比,腔外法在模式生成可调方面有了一定的进步,但对于位于杂合庞加莱球上的偏振、相位模式连续任意可调的生成仍存在一定困难。

亚波长金属或介质光栅是一类空间偏振转化器件,当光栅周期小于入射光束的波长时,亚波长介质光栅就会表现出单轴晶体的双折射特性。通过设计刻槽的周期及方向,可将入射光束转化为矢量涡旋光束<sup>[31]</sup>。

干涉合成法可通过一定的干涉系统将厄米高斯(HG)光束或标量涡旋光束转化为矢量涡旋光束。可以将径向偏振和角向偏振光束这两类特殊的矢量涡旋光束看作是两束线偏振方向与排列方向同时正交的 HG 光束同轴合束<sup>[32-34]</sup>,这意味着可以通过一定的干涉装置将 HG 光束转化为矢量涡旋光束。2005年,Passilly 等<sup>[32]</sup>利用马赫-曾德尔干涉仪将偏振正交的 HG<sub>01</sub>与 HG<sub>10</sub>相干叠加,得到了径向偏振矢量涡旋光束。此外,还可利用双折射晶体的 walk-off 特性<sup>[33]</sup>,或利用 LC-SLM 结合一个  $\pi$  相位跳变器件<sup>[34]</sup>等方法,在同一光路上完成相干合成,以提高干涉系统的稳定性,在一条光路上合成稳定输出的矢量涡旋光束。

一种更普遍的干涉合成方法是,采用两束具有相反自旋角动量和不同轨道角动量的涡旋光束以同轴合束的方式来合成矢量涡旋光束,如通过 Rochi 光栅<sup>[35]</sup>、渥拉斯通棱镜(WP)<sup>[36]</sup>、小角度双折射分束镜<sup>[37]</sup>、直角棱镜<sup>[38]</sup>、Sagnac 干涉仪<sup>[39-41]</sup>、类

Sagnac 系统<sup>[42]</sup>等。本课题组于 2015 年报道了一种利用泰曼-格林干涉仪获得矢量光束的方法<sup>[43]</sup>,其原理是将泰曼-格林干涉仪某一臂上的平面反射镜替换为直角棱镜,利用直角棱镜屋脊面右手系成像的性质,使两臂反射合束的光束满足(1)式,最终生成了矢量光束。

文献<sup>[35-43]</sup>均将两束标量涡旋光束相干合束为矢量涡旋光束,如果可以像文献<sup>[33-34]</sup>一样在一路上实现相干合成,就会大大提高系统的稳定性。2012年,Moreno 等<sup>[44]</sup>研究了 LC-SLM 的偏振调制特性,发现其只对某一特定方向偏振的线偏振光束具有纯相位调制作用,对于与其偏振方向正交的线偏振分量无调制作用,而后,他们基于该特性将 LC-SLM 分屏,并分别对两个正交的线偏振分量进行相位调制来获得矢量涡旋光束,由于没有对入射的高斯光束进行分束和合束,故而系统的稳定性大大提升<sup>[45]</sup>。Han 等<sup>[46]</sup>在此基础上通过实验获得了任意复杂的矢量光场。2017年,Cai 等<sup>[47]</sup>采用一台 LC-SLM,搭配半波片(HWP)和 QWP 等调制器件,在一路上生成了满足  $l=0$  或  $m=0$  的矢量涡旋光束。本课题组也曾基于 LC-SLM 的这一特性,采用双调制器级联的方式,生成了光束尺寸不随偏振阶次等参数变化的完美矢量涡旋光束<sup>[48]</sup>。

作为一种自旋-轨道角动量耦合器件<sup>[49]</sup>,q 波片可用于腔外生成矢量涡旋光束<sup>[50-54]</sup>。2012年,Cardano 等<sup>[50]</sup>报道了通过液晶 q 波片来生成矢量涡旋光束的方法。2014年,Yi 等<sup>[51]</sup>利用超表面材料制成的 q 波片成功地生成了矢量涡旋光束。2015年,Chen 等<sup>[52]</sup>利用 q 波片制成的偏振转换器件生成了任意态矢量涡旋光束。2016年,Moreno 等<sup>[53]</sup>利用 LC-SLM 来模拟 q 波片,并生成了矢量涡旋光束。2017年,Liu 等<sup>[54]</sup>采用 q 波片与螺旋相位片相结合的方式,同时引入各向异性偏振态分布和螺旋相位,生成了矢量涡旋光束。

## 4 矢量涡旋光束的偏振、相位模式连续可调生成

下面介绍本课题组在矢量涡旋光束的腔外偏振、相位模式连续可调生成技术方面开展的一些研究工作。

### 4.1 双光栅调制法

双光栅调制法可以看作是各向异性的偏振调制过程,即通过两个全息光栅分别对入射的线偏振高斯光束的两个正交线偏振分量进行相位调制,为其

引入不同的轨道角动量,进而再通过一系列偏振器件对其进行偏振转化,最终生成矢量涡旋光束,如图 2 所示。

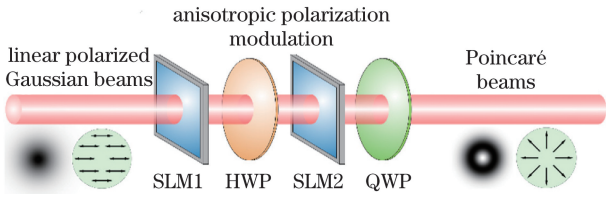


图 2 双光栅调制法生成矢量涡旋光束的原理图<sup>[55]</sup>

Fig. 2 Schematic of generating vectorial vortex beams through double grating modulation<sup>[55]</sup>

下面结合图 2 介绍采用双光栅调制法以偏振、相位模式连续可调的方式生成矢量涡旋光束的具体过程。实验中,采用两个纯相位 SLM 来模拟全息光栅。水平线偏振基模高斯光束经过 SLM1 后被转化为水平线偏振标量涡旋光束,其角量子数为  $l_0$ 。在经过快轴方向与水平面呈  $\theta_{\text{HWP}}$  的 HWP 后,光束被转化为偏振方向与水平面呈  $2\theta_{\text{HWP}}$  的线偏振涡旋光束,并射入 SLM2。调制器的相位调制特性<sup>[44]</sup>使得只有水平线偏振分量可以被调制,而垂直线偏振分量则不受影响,当 SLM2 加载  $l_m$  阶涡旋相位光栅  $\exp[i(l_m\phi - \phi)]$  时,水平线偏振方向的角量子数变为  $-(l_0 + l_m)$ ,垂直方向的角量子数由于一次反射而变为  $-l_0$ 。此时 SLM2 的出射光束可以看

作是两束正交线偏振且携带有不同轨道角动量的标量涡旋光束的同轴合束,该光束经与水平面呈  $45^\circ$  的 QWP 后,转化为两束旋向相反且携带有不同轨道角动量的圆偏振标量涡旋光束的同轴合束,满足 (1) 式,即生成了矢量涡旋光束。

在本实验中,庞加莱球南北两极涡旋光束的角量子数可通过加载于 SLM1 和 SLM2 上的全息光栅来控制,具体可表示为:  $m = -l_0, l = -(l_0 + l_m)$ 。生成的矢量涡旋光束位于庞加莱球球面上的位置由加载于 SLM2 上的涡旋相位光栅参数  $\phi$  以及 HWP 的快轴方向与水平面的夹角  $\theta_{\text{HWP}}$  来决定。这表明,只要合理地控制角度  $\theta_{\text{HWP}}$  及加载于两个 SLM 上的光栅,就可以生成位于任意阶次庞加莱球球面上任意位置的矢量涡旋光束,进而实现偏振、相位模式连续可调的矢量涡旋光束的生成。

图 3 为一组利用双光栅调制法生成的位于杂合庞加莱球 ( $l=2, m=0$ ) 球面上的矢量涡旋光束的实验结果,其中,从上至下分别为生成的球面坐标  $(\theta, \sigma)$  为  $(0, 0)$ 、 $(\pi, 0)$ 、 $(0, \pi/4)$  以及南极 ( $\sigma = -\pi/2$ ) 和北极 ( $\sigma = \pi/2$ ) 位置处的矢量涡旋光束。利用在不同角度放置的检偏器 (P2) 测量其偏振态的分布,以表征球面坐标参数  $\theta$ ; 通过测量参数  $S_3/S_0$  表征球面坐标参数  $\sigma$ 。实验结果表明,生成的矢量涡旋光束的偏振、相位模式与预期完全相符。

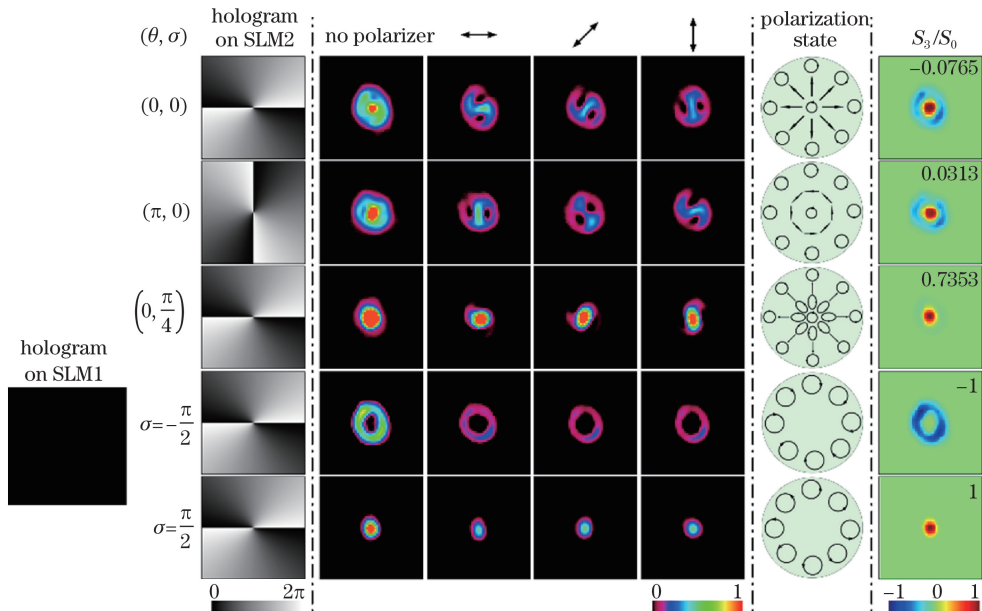


图 3 利用双光栅调制法生成位于杂合庞加莱球 ( $l=2, m=0$ ) 球面上的矢量涡旋光束的实验结果<sup>[55]</sup>

Fig. 3 Experimental results of generating vectorial vortex beams on hybrid Poincaré sphere with  $m=0$  and  $l=2$  through double grating modulation method<sup>[55]</sup>

#### 4.2 单光栅调制法

单光栅调制法是一种采用单一纯相位衍射光

栅将高斯光束转化为模式连续可调的矢量涡旋光束的方法,这种矢量涡旋光束的生成方法意味着

要对高斯光束的偏振和相位进行同时调制。然而,纯相位型衍射光栅虽然对光场的相位具有较好的调制性能,但无法直接调制偏振,因此必须合理地设计光学系统,使其能对相位和偏振同时进行调制。

为了实现这一目标,本课题组设计了如图 4 所示的基于 WP 的利用单光栅调制生成矢量涡旋光束的光学系统,该系统可生成偏振、相位模式连续可调的矢量涡旋光束。首先,入射激光器结合起偏器(P1)得到水平线偏振的基模高斯光束,该光束经过扩束器(BE)扩束后入射到 LC-SLM 中。LC-SLM 用于模拟一块利用透过率函数傅里叶展开法设计的纯相位衍射光栅<sup>[56-58]</sup>,将入射的基模高斯光束调制为两束分别位于 $\pm 1$  衍射级的不同阶次的标量涡旋光束,且它们的振幅、初始相位和角量子数均可被任

意控制。这两束涡旋光束经透镜 L1 后会聚,并为其中的一束光引入一块快轴方向与水平面呈  $45^\circ$  的 HWP,将其线偏振方向由水平转为竖直,以满足 WP 的入射条件。此时,通过合理地设计参数使经 L1 后的两束涡旋光束的会聚角与 WP 的分束角相匹配,故而这两束涡旋光束可被 WP 完美地线偏振正交合束。合束光束再经一块与水平面呈  $45^\circ$  的 QWP 后,被转化为两束旋向相反且携带有不同轨道角动量的圆偏振标量涡旋光束的同轴合束,满足(1)式,即生成了矢量涡旋光束。需要注意的是,由于 L1 已经将光栅的远场衍射光场成像在 WP 的合束点处(即 L1 的后焦面),因此若要观察生成的矢量涡旋光束,就必须利用两个薄凸透镜 L2 和 L3 构成  $4-f$  成像系统,将 L1 后焦面处的光场成像在 CCD 相机的像面上。

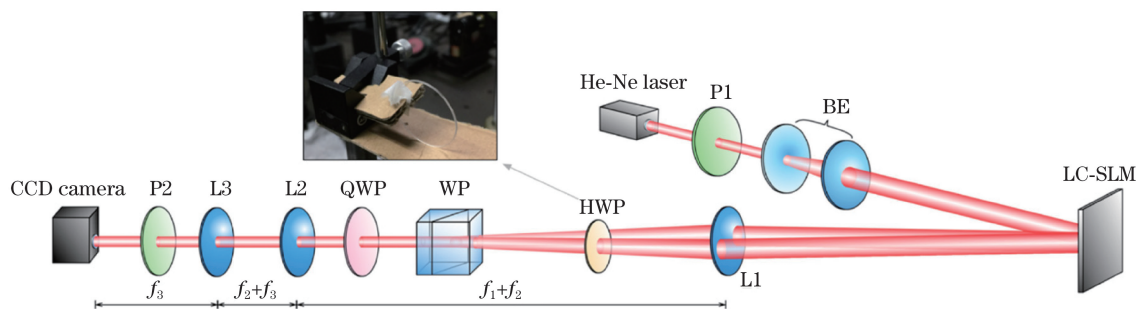


图 4 基于 WP 的单光栅调制法生成矢量涡旋光束的实验系统图<sup>[56]</sup>

Fig. 4 Experimental system diagram for generating vectorial vortex beams through single-grating modulation<sup>[56]</sup>

利用图 4 所示的系统生成矢量涡旋光束的本质仍是采用旋向相反的两束标量涡旋光束来合束,但需要注意的是,这两束涡旋光束均由加载于 LC-SLM 上的纯相位衍射光栅来产生,它们分别位于不同的衍射级,且振幅、初始相位、角量子数等均可通过改变光栅的参数来控制。这表明,通过合理地设计衍射光栅即可生成任意模式的矢量涡旋光束,当要切换不同模式的矢量涡旋光束时,无需调节任何硬件,直接通过计算机改变加载于调制器上的衍射光栅就可生成偏振、相位模式连续可调的矢量涡旋光束。

## 5 矢量涡旋光束阵列的生成

矢量涡旋光束阵列即不同偏振、相位模式分布的矢量涡旋光束在空间中按照一定规律排布的复杂的光场形式<sup>[59-64]</sup>。生成矢量涡旋光束阵列亦可理解为在不同的衍射级上同时生成不同模式的矢量涡旋光束,不同的衍射级次对应着不同的空间位置,这在多点光镊<sup>[65]</sup>、高效受激发射减损显微镜<sup>[66]</sup>等同时

需要多个矢量涡旋光束的相关技术领域具有重要的应用价值。当前报道生成矢量涡旋光束阵列的方法主要有达曼 q 波片法<sup>[59]</sup>、合束法<sup>[60-64]</sup>等。达曼 q 波片是一种数字几何相位器件,由达曼光栅和 q 波片整合而来,可将特定偏振态的基模高斯光束转化为矢量涡旋光束阵列。合束法是一种较为简单的矢量涡旋光束阵列生成方法,其基于矢量涡旋光束的偏振合成原理,先生成两个旋向相反的圆偏振标量涡旋光束阵列,而后将它们的衍射级一一对应,进行阵列合束,最终就可获得矢量涡旋光束阵列,如图 5 所示,其中,  $p$  为标量涡旋光束的角量子数。

基于图 5 所示的原理,本课题组开展了生成柱坐标矢量光束阵列<sup>[60]</sup>、完美矢量光束阵列<sup>[61]</sup>和矢量涡旋光束阵列<sup>[62]</sup>的研究工作。本节将着重介绍矢量涡旋光束的生成。

合束法生成矢量涡旋光束的关键在于,要将生成的两组标量涡旋光束阵列按照对应的衍射级一一合束,因此必须考虑不同衍射级的衍射角不同等问题。设计了如图 6 所示的系统,其中两个 LC-SLM

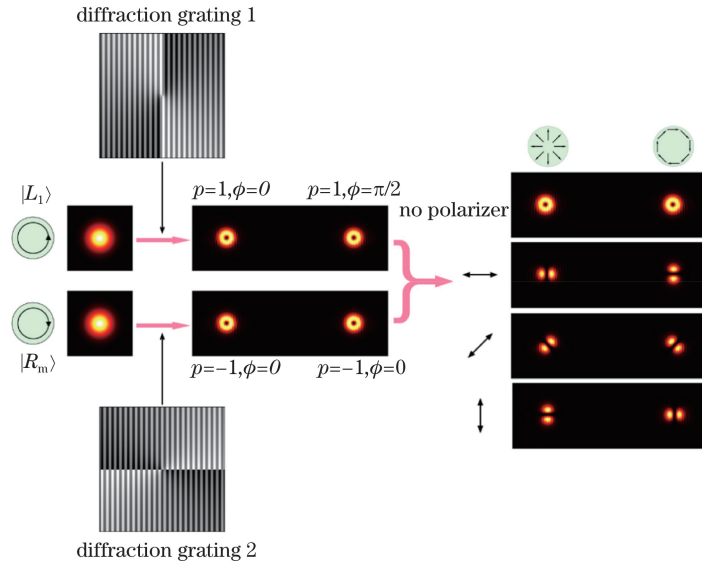


图 5 矢量涡旋光束阵列的生成原理

Fig. 5 Principles of generating vectorial vortex beams array

(LC-SLM1 和 LC-SLM2)分别用于对入射高斯光束的正交线偏振分量进行调制,以获得两组偏振方向正交的标量涡旋光束阵列。两个焦距相同的薄凸透镜 L1 和 L2 构成  $4-f$  成像系统,其可将物平面 1:1

地成像在像平面上。因此,通过  $4-f$  系统可将 LC-SLM1 上的光栅成像在 LC-SLM2 上,使得在同一衍射平面上同时调制两个线偏振分量,进而实现两个标量阵列中各个对应的衍射级次一一合束。

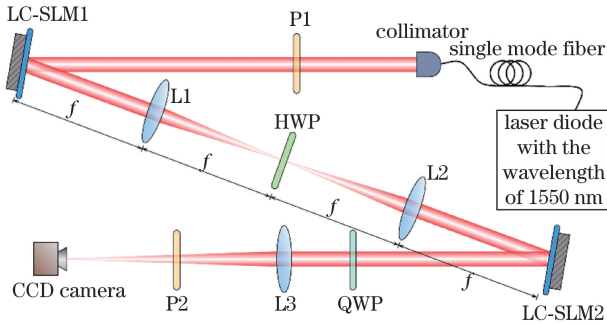


图 6 矢量涡旋光束阵列的生成系统<sup>[62]</sup>

Fig. 6 Generating system of vectorial vortex beams array<sup>[62]</sup>

由(1)式可知,偏振合束法生成的矢量涡旋光束的偏振、相位模式主要由合束的两束标量涡旋光束的振幅、初始相位和角量子数决定。因此,在图 6 所示的矢量涡旋光束阵列生成系统中,可通过加载于两个 LC-SLM 上的全息光栅来控制所生成的两组偏振正交的标量涡旋光束阵列中各个光束的振幅、初始相位和角量子分布,进而控制所生成的矢量涡旋光束阵列的模式分布。

图 7 为一组利用图 6 所示系统生成的  $2 \times 2$  矢量涡旋光束阵列,同时也给出了经检偏器后的光场分布。不难看出,实验结果与预期吻合。

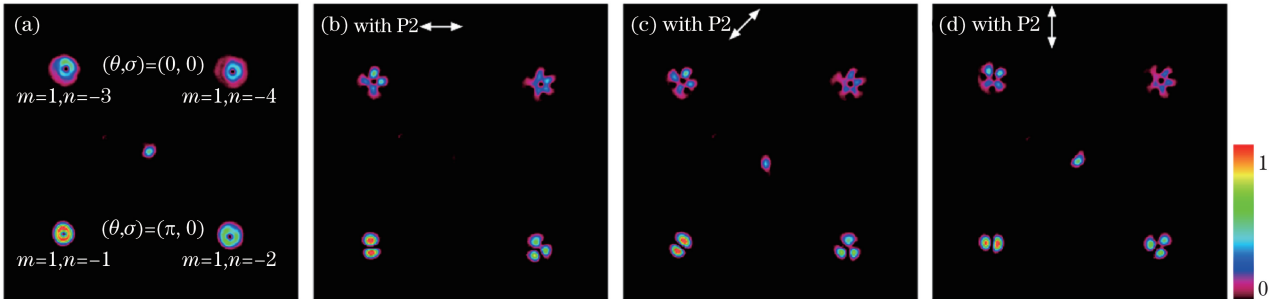


图 7 生成矢量涡旋光束阵列的实验结果<sup>[62]</sup>。(a) CCD 直接接收到的光场分布;(b)经水平检偏器后的光场分布;

(c)经  $45^\circ$ 检偏器后的光场分布;(d)经竖直检偏器后的光场分布

Fig. 7 Experimental results of generated vectorial vortex beams array<sup>[62]</sup>. (a) Intensity patterns captured by CCD; (b) intensity patterns after passing a horizontal arranged polarizer; (c) intensity patterns after passing a polarizer with  $45^\circ$  arrangement; (d) intensity patterns after passing a vertical arranged polarizer

## 6 结束语

回顾了生成矢量涡旋光束技术的国内外进展,详细介绍了包括双光栅调制法和单光栅调制法在内的偏振、相位模式连续可调的矢量涡旋光束的生成方法与技术,此外还介绍了一种矢量涡旋光束阵列的生成方法。然而,这几种矢量涡旋光束光源依然面临着系统较为庞大、稳定性不高等问题。因此,开发稳定、小型化的偏振、相位模式连续可调的矢量涡旋光束光源仍是未来待解决的问题之一。

## 参 考 文 献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [2] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 161-204.
- [3] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, *et al.* Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [4] Willner A E, Huang H, Yan Y, *et al.* Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 66-106.
- [5] Yu S Y. Potentials and challenges of using orbital angular momentum communications in optical interconnects[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3075-3087.
- [6] Lei T, Zhang M, Li Y R, *et al.* Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Dammann gratings[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(3): e257.
- [7] Padgett M, Bowman R. Tweezers with a twist[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 343-348.
- [8] Lavery M P J, Speirits F C, Barnett S M, *et al.* Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum[J]. *Science*, 2013, 341(6145): 537-540.
- [9] Fu S Y, Wang T L, Zhang Z Y, *et al.* Non-diffractive Bessel-Gauss beams for the detection of rotating object free of obstructions[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20098-20108.
- [10] Khonina S N, Kotlyar V V, Shinkaryev M V, *et al.* The phase rotor filter[J]. *Journal of Modern Optics*, 1992, 39(5): 1147-1154.
- [11] Qiu X D, Li F S, Zhang W H, *et al.* Spiral phase contrast imaging in nonlinear optics: seeing phase objects using invisible illumination[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 208-212.
- [12] Zhan Q W. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(1): 1-57.
- [13] Meier M, Romano V, Feurer T. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation[J]. *Applied Physics A*, 2007, 86(3): 329-334.
- [14] Chen W B, Zhan Q W. Numerical study of an apertureless near field scanning optical microscope probe under radial polarization illumination[J]. *Optics Express*, 2007, 15(7): 4106-4111.
- [15] Liu J, Li S M, Zhu L, *et al.* Direct fiber vector eigenmode multiplexing transmission seeded by integrated optical vortex emitters[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(3): 17148.
- [16] Zhou Z H, Tan Q F, Jin G F. Surface plasmon interference formed by tightly focused higher polarization order axially symmetric polarized beams[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(12): 1178-1181.
- [17] Zhang D K, Feng X, Cui K Y, *et al.* Identifying orbital angular momentum of vectorial vortices with Pancharatnam phase and Stokes parameters[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11982.
- [18] Milione G, Evans S, Nolan D A, *et al.* Higher order Pancharatnam-Berry phase and the angular momentum of light[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(19): 190401.
- [19] Beth R A. Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light[J]. *Physical Review*, 1936, 50(2): 115-125.
- [20] Poincaré H. *Théorie mathématique de la Lumière*[M]. Paris: Gauthiers-Villars, 1892.
- [21] Milione G, Sztul H I, Nolan D A, *et al.* Higher-order Poincaré sphere, Stokes parameters, and the angular momentum of light[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(5): 053601.
- [22] Yi X N, Liu Y C, Ling X H, *et al.* Hybrid-order Poincaré sphere[J]. *Physical Review A*, 2015, 91(2): 023801.
- [23] Ren Z C, Kong L J, Li S M, *et al.* Generalized Poincaré sphere[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26586-26595.
- [24] Galvez E J. Light beams with spatially variable polarization[M]// Andrews D L. *Photonics: scientific foundations, technology and applications*, Volume 1. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2015: 61-76.
- [25] Caley A J, Thomson M J, Liu J S, *et al.* Diffractive optical elements for high gain lasers with arbitrary

- output beam profiles[J]. *Optics Express*, 2007, 15(17): 10699-10704.
- [26] Zhou R J, Ibarra-Escamilla B, Haus J W, *et al.* Fiber laser generating switchable radially and azimuthally polarized beams with 140 mW output power at 1.6  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(19): 191111.
- [27] Li J L, Ueda K I, Musha M, *et al.* Generation of radially polarized mode in Yb fiber laser by using a dual conical prism[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(20): 2969-2971.
- [28] Lin D, Xia K G, Li J L, *et al.* Efficient, high-power, and radially polarized fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(13): 2290-2292.
- [29] Ngcobo S, Litvin I, Burger L, *et al.* A digital laser for on-demand laser modes[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2289.
- [30] Naidoo D, Roux F S, Dudley A, *et al.* Controlled generation of higher-order Poincaré sphere beams from a laser[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(5): 327-332.
- [31] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, *et al.* Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(5): 285-287.
- [32] Passilly N, Treussart F, Hierle R, *et al.* Simple interferometric technique for generation of a radially polarized light beam[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(5): 984-991.
- [33] Phua P B, Lai W J. Simple coherent polarization manipulation scheme for generating high power radially polarized beam[J]. *Optics Express*, 2007, 15(21): 14251-14256.
- [34] Bashkansky M, Park D, Fatemi F K. Azimuthally and radially polarized light with a nematic SLM[J]. *Optics Express*, 2010, 18(1): 212-217.
- [35] Wang X L, Ding J P, Ni W J, *et al.* Generation of arbitrary vector beams with a spatial light modulator and a common path interferometric arrangement[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(24): 3549-3551.
- [36] Maurer C, Jesacher A, Fühapter S, *et al.* Tailoring of arbitrary optical vector beams[J]. *New Journal of Physics*, 2007, 9(3): 78.
- [37] Xie Y Y, Cheng Z J, Liu X, *et al.* Simple method for generation of vector beams using a small-angle birefringent beam splitter[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 5109-5112.
- [38] Liu S, Qi S X, Zhang Y, *et al.* Highly efficient generation of arbitrary vector beams with tunable polarization, phase, and amplitude[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(4): 228-233.
- [39] Jones P H, Rashid M, Makita M, *et al.* Sagnac interferometer method for synthesis of fractional polarization vortices[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(17): 2560-2562.
- [40] Liu S, Li P, Peng T, *et al.* Generation of arbitrary spatially variant polarization beams with a trapezoid Sagnac interferometer[J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21715-21721.
- [41] Li P, Zhang Y, Liu S, *et al.* Generation of perfect vectorial vortex beams[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2205-2208.
- [42] Wang T L, Fu S Y, Zhang S K, *et al.* A Sagnac-like interferometer for the generation of vector beams[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(9): 231.
- [43] Fu S Y, Gao C Q, Shi Y, *et al.* Generating polarization vortices by using helical beams and a Twyman Green interferometer[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1775-1778.
- [44] Moreno I, Davis J A, Hernandez T M, *et al.* Complete polarization control of light from a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 364-376.
- [45] Moreno I, Davis J A, Cottrell D M, *et al.* Encoding high-order cylindrically polarized light beams [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(24): 5493-5501.
- [46] Han W, Yang Y F, Cheng W, *et al.* Vectorial optical field generator for the creation of arbitrarily complex fields[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 20692-20706.
- [47] Cai M Q, Wang Z X, Liang J, *et al.* High-efficiency and flexible generation of vector vortex optical fields by a reflective phase-only spatial light modulator[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(22): 6175-6180.
- [48] Fu S Y, Wang T L, Gao C Q. Generating perfect polarization vortices through encoding liquid-crystal display devices[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(23): 6501-6505.
- [49] 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.
- [50] Cardano F, Karimi E, Slussarenko S, *et al.* Polarization pattern of vector vortex beams generated by q-plates with different topological charges[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(10): C1-C6.
- [51] Yi X N, Ling X H, Zhang Z Y, *et al.* Generation of cylindrical vector vortex beams by two cascaded metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2014, 22(14): 17207-17215.
- [52] Chen P, Ji W, Wei B Y, *et al.* Generation of arbitrary vector beams with liquid crystal polarization converters and vector-photoaligned q-plates[J].



- Applied Physics Letters, 2015, 107(24): 241102.
- [53] Moreno I, Sanchez-Lopez M M, Badham K, *et al.* Generation of integer and fractional vector beams with q-plates encoded onto a spatial light modulator[J]. Optics Letters, 2016, 41(6): 1305-1308.
- [54] Liu Z X, Liu Y Y, Ke Y G, *et al.* Generation of arbitrary vector vortex beams on hybrid-order Poincaré sphere[J]. Photonics Research, 2017, 5(1): 15-21.
- [55] Fu S Y, Gao C Q, Wang T L, *et al.* Anisotropic polarization modulation for the production of arbitrary Poincaré beams[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2018, 35(1): 1-7.
- [56] Fu S Y, Zhai Y W, Wang T L, *et al.* Tailoring arbitrary hybrid Poincaré beams through a single hologram[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(21): 211101.
- [57] Fu S Y, Wang T L, Gao C Q. Perfect optical vortex array with controllable diffraction order and topological charge[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2016, 33(9): 1836-1842.
- [58] Romero L A, Dickey F M. Theory of optimal beam splitting by phase gratings. I. One-dimensional gratings[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 24(8): 2280-2295.
- [59] Chen P, Ge S J, Duan W, *et al.* Digitalized geometric phases for parallel optical spin and orbital angular momentum encoding[J]. ACS Photonics, 2017, 4(6): 1333-1338.
- [60] Fu S Y, Zhang S K, Wang T L, *et al.* Rectilinear lattices of polarization vortices with various spatial polarization distributions[J]. Optics Express, 2016, 24(16): 18486-18491.
- [61] Fu S Y, Gao C Q, Wang T L, *et al.* Simultaneous generation of multiple perfect polarization vortices with selective spatial states in various diffraction orders[J]. Optics Letters, 2016, 41(23): 5454-5457.
- [62] Fu S Y, Wang T L, Zhang Z Y, *et al.* Selective acquisition of multiple states on hybrid Poincaré sphere[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(19): 191102.
- [63] Badham K, Moreno I, Sánchez-López M M, *et al.* Parallel generation of multiple first-order vector beams with a polarization grating and a q-plate device[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2016, 55(12): 122202.
- [64] Rosales-Guzmán C, Bhebhe N, Forbes A. Simultaneous generation of multiple vector beams on a single SLM[J]. Optics Express, 2017, 25(21): 25697-25706.
- [65] Grier D G. A revolution in optical manipulation[J]. Nature, 2003, 424(6950): 810-816.
- [66] Yan L, Gregg P, Karimi E, *et al.* Q-plate enabled spectrally diverse orbital-angular-momentum conversion for stimulated emission depletion microscopy[J]. Optica, 2015, 2(10): 900-903.