

## 采用萨格纳克干涉仪与螺旋相位片生成矢量光束

辛璟焘<sup>1</sup>, 李 凯<sup>1</sup>, 张 雯<sup>1</sup>, 娄小平<sup>2</sup>, 祝连庆<sup>1,2</sup>

- (1. 北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100016;
2. 北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100192)

**摘 要:** 萨格纳克干涉仪中传播的两束光具有相同的光程, 因而适合用于高稳定的合束系统, 螺旋相位片作为无源、分离器件具有螺旋光束转化效率高、工作环境适用条件低等优点。研究将萨格纳克干涉仪和螺旋相位片结合起来生成矢量光束的方法具有重要的研究意义。通过分析光束的轨道角动量态和偏振态在萨格纳克干涉仪中的演化规律, 优化设计出了等腰直角三角形的合束光路结构。合束装置可以不使用 1/2 波片进行光束偏振态调制, 因此光路结构更紧凑和稳定。通过旋转检偏器方法测量了生成矢量光束的阶数。实验结果证实了合束方法的高稳定性和高效率。

**关键词:** 矢量光束; 萨格纳克干涉仪; 螺旋相位片

**中图分类号:** TH744 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0217001

## Generation of vector beams by Sagnac interferometer and spiral phase plates

Xin Jingtao<sup>1</sup>, Li Kai<sup>1</sup>, Zhang Wen<sup>1</sup>, Lou Xiaoping<sup>1</sup>, Zhu Lianqing<sup>1,2</sup>

- (1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China; 2. Beijing Key Laboratory for Optoelectronics Measurement Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Two beams in the traveling the same path with opposite directions makes it is more suitable for stability beam combination. As a passive and separation device, spiral phase plate has the advantages of high efficiency and low working conditions. It has important significance to propose a method to generation vector beam with Sagnac interferometer and spiral phase plate combination. By analyzing the evolution of the orbital angular momentum states and the polarization states of the beams in the Sagnac interferometer, an isosceles right triangle optical structure beam combination system was designed. Without half wave plate, the optical structure was more compact and stability. The order of generated vector beams were checked with rotation of polarizer. The experimental results confirm the high stability and high efficiency of the combined beam method.

**Key words:** vector beam; Sagnac interferometer; spiral phase plates

收稿日期: 2016-06-10; 修订日期: 2016-07-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划) (2015AA042308); 教育部“长江学者和创新团队”发展计划(IRT1212); 北京市重大科技计划项目(Z151100003615010); 北京市优秀人才培养资助(2015000020124G076)

作者简介: 辛璟焘(1980-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光纤传感技术、光纤激光和激光束光学方面的研究。Email: xinjingtao@bistu.edu.cn

通讯作者: 祝连庆(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感与激光器、生物医学检测技术及仪器、精密测量与系统方面的研究。Email: zhulianqing@sina.com

## 0 引言

奇点空心光束<sup>[1-2]</sup>作为一种新型激光束,近年来被大量研究。一类是被称之为标量奇点光束的涡旋光束<sup>[3]</sup>,其位相是依赖于光束横截面的角向分布的,即位相因子是  $\exp(il\phi)$ ,其中  $l$  是位相拓扑荷,一般为整数。另一类是被称之为矢量奇点光束的矢量光束,光束中某一点的偏振态不确定,而该点周围的光具有确定的偏振态,目前热点研究的是具有轴对称偏振态分布的矢量光束,这类光束的复振幅表达式是麦克斯韦方程组在柱坐标系下的特征解,所以它也被称为轴对称偏振光束、偏振涡旋光束和矢量偏振光束等。轴对称偏振光束只是矢量光束中的一类,文中用矢量光束代指具有轴对称偏振态分布的矢量光束<sup>[4]</sup>,用琼斯矢量表示为:

$$\vec{E}(\phi, r) = A(r) [\cos(p\theta + \theta_0) \sin(p\theta + \theta_0)]^T$$

式中:  $p$  为绕光束横截面一周偏振态变化的周期数,也被称为光场的偏振阶数或空间偏振拓扑数;  $\theta$  为方位角;  $\theta_0$  为  $\theta=0$  时的初始偏振指向;  $A(r)$  描述了光束的强度分布,常见的分布类型有拉盖尔-高斯型和贝塞尔型。矢量光束的轴对称偏振结构和中空的结构分布使其在一些科学研究和工程技术领域展现出独特的优势。特别是径向偏振光束,由于其在高数值孔径透镜聚焦下,聚焦光斑可突破衍射极限,并且在焦点附近具有很强的纵向电场分量,已经在高分辨率成像技术、粒子捕获<sup>[5]</sup>、带电微粒加速<sup>[6]</sup>、激光加工<sup>[7-8]</sup>和表面等离子体波的激发与聚焦<sup>[9]</sup>、光信息技术领域<sup>[10-11]</sup>表现出重要的应用价值。

角向偏振光束在激光加工<sup>[12]</sup>等领域也具有独特的应用价值,此外研究人员也在逐渐开发高阶矢量光束在粒子捕获<sup>[13]</sup>和光信息传输领域的应用<sup>[14]</sup>。

因此矢量光束的生成技术被广泛的研究<sup>[4]</sup>,主要有激光器直接生成和激光腔外转化两类方法,其中腔外转化又主要分为空间偏振转化方法和合束技术。

合束生成矢量光束的原理主要分为两类:一是多束线偏振厄米-高斯光束合成;二是两束圆偏振的螺旋光束(常见的光强分布形式有拉盖尔-高斯光束和 Bessel 光束)合成。在合成技术手段上常采用优化

改进已有干涉仪的方法,主要有马赫-曾德尔干涉仪<sup>[16]</sup>、萨格纳克干涉仪<sup>[17-18]</sup>和泰曼-格林干涉仪<sup>[19]</sup>等方法。由于萨格纳克干涉仪中传输的两束光的光程相等,因此合束稳定性最好。2006年 V. G. Niziev 等用萨格纳克干涉仪将两束厄米-高斯光束合成了一阶矢量光束<sup>[17]</sup>,上述方法不适用于高阶矢量光束的生成。2009年 P. H. Jones 等用萨格纳克干涉仪将两束螺旋光束稳定的合成了分数阶矢量光束<sup>[18]</sup>,他们的方法中在干涉仪中插入了道威棱镜和 1/2 波片进行光束轨道角动量态的和偏振态的调制,使用反射式液晶空间光调制器进行螺旋光束的生成。另外,在他们的方法中,入射光和出射光束同轴反向传输,因此必须采用分光片进行分光输出,整个系统矢量光束转化效率小于 25%。因此,优化基于萨格纳克干涉仪方法实现稳定、高效率、多模式的矢量光束的生成是有意义的研究工作。文中对光束的轨道角动量态和偏振态在 Sagnac 干涉仪中的演化过程进行分析,对合束方法进行优化,干涉仪中不使用 1/2 波片进行光束偏振态调制,入射光和合成后出射光束垂直传输,不仅简化了光路结构还提高了合成光束的稳定性和转化效率。在 Jones 的方法中,利用反射型液晶空间调制器同时作为螺旋光束的生成元件和反射镜。用液晶空间调制器生成螺旋光束具有生成光束模式灵活可调和光束质量高等优点<sup>[20]</sup>,但是液晶空间调制器成本高、对环境要求高、转化效率较低和激光损伤阈值低,因此采用螺旋相位片代替液晶空间光调制器生成螺旋光束可降低成本,并能在恶劣的环境下工作,同时能够提高转化效率。基于上述目的,文中采用螺旋相位片生成螺旋光束,并使用基于 Sagnac 干涉仪的合束装置实现了矢量光束的生成。文中采用的方法具有结构简单、合束稳定性好和生成矢量光束质量高等优点。

## 1 原理

相干合成方法的物理意义清晰,易于在实验室中实现。因此很多研究者都采用这种方法。相干合成是一种将特定模式的激光束进行偏振态控制后,通过合束器件合成的方法。有两种模式的激光束常用于合成矢量光束,一种是厄米-高斯(HG)光束,一种是具有轨道角动量的螺旋光束,比如 LG 光束和

高阶 Bessel 光束。用螺旋光束合成矢量光束的过程可以用下面的数学表达式描述为<sup>[18]</sup>:

$$\frac{1}{2} e^{im\theta} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} + \frac{1}{2} e^{-im\theta} \begin{pmatrix} 1 \\ +i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos m\theta \\ \sin m\theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中:  $e^{im\theta}$  和  $e^{-im\theta}$  为螺旋相位;  $(1, -i)^T$  和  $(1, i)^T$  分别为右旋和左旋圆偏振光;  $m$  是合成矢量光束的阶数。可见, 用两束螺旋光束可以合成任意阶的矢量光束。而用 HG 光束仅能合成一阶矢量光束。图 1 是螺旋光束合成径向偏振光束的示意图。



图 1 螺旋光束合成径向矢量光束的原理图

Fig.1 Principle of combination polarization vertex beam by helical beams

下面将对螺旋光束经过反射镜后轨道角动量态变化情况和正反通过螺旋相位片后的轨道角动量态进行分析, 这一点在设计合束装置时具有指导作用。首先, 对坐标系进行规定,  $z$  方向始终是光束传播的方向, 如图 2 所示, 光束轨道角动量态为  $m$  的光束的相位分布可表示为  $\exp(im\phi(x,y))$ , 经过一个反射镜后相位分布可表示为  $\exp(-im\phi(x,y))$ , 即, 光束经过一次反射其轨道角动量态反号一次。

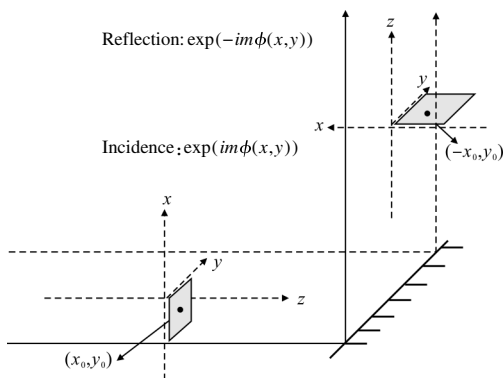
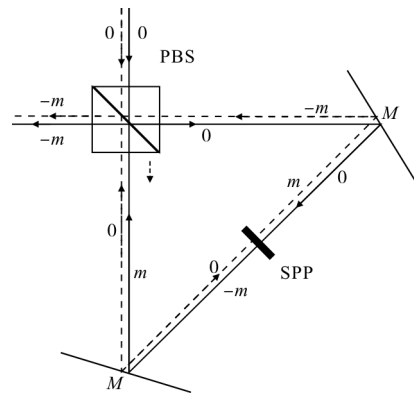


图 2 反射镜改变光束轨道角动量原理图

Fig.2 Principle of OAM changing reflected by mirror

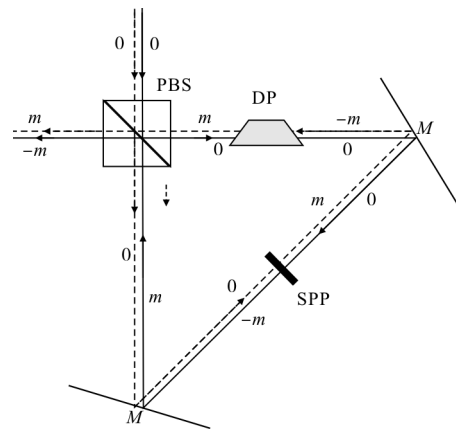
最初设计了如图 3(a) 的等腰三角形的干涉仪结构, 其中虚线表示  $p$  偏振, 实线表示  $s$  偏振。从偏振分光棱镜(PBS)入射的高斯光束的轨道角动量为零,

其中  $p$  偏振光经过螺旋相位片(SPP)后轨道角动量转化为  $m$ , 再经过一次反射后, 从偏振分光棱镜透射输出, 因此, 出射光束的轨道角动量为  $-m$ , 而反向传输的  $s$  偏振光经过螺旋相位片后轨道角动量转化为  $-m$ , 再经过反射镜反射和 PBS 反射后输出, 因经过两次反射, 输出光束的轨道角动量仍然为  $-m$ , 因此无法实现矢量光束的合成, 该实验首先搭建了图 3(a) 的实验装置进行实验, 发现无法实现矢量光束的生成。经过分析后, 在光路中加入道威棱镜(DP), 如图 3(b) 所示。利用光束经过道威棱镜, 其轨道角动量态反号的特性, 保证了输出的  $p$  光和  $s$  光的轨道角动量符号相反。



(a) 无道威棱镜

(a) Without Dove prism



(b) 插入道威棱镜

(b) With Dove prism

图 3 光束在 Sagnac 干涉仪中轨道角动量的演化过程

Fig.3 Evaluation of OAM changing in Sagnac interferometer

## 2 实验装置

文中采用的实验装置如图 4 所示。从 He-Ne 激光器出射的激光束经过一个起偏方向为  $45^\circ$  的偏振

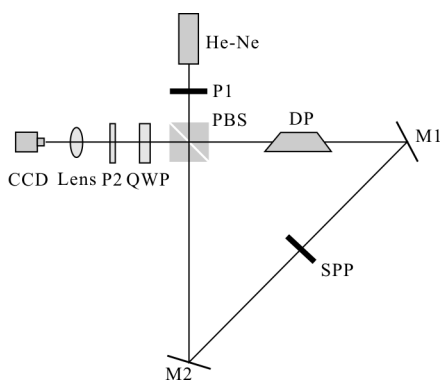


图 4 实验装置

Fig.4 Experimental set up

片后入射到偏振分光棱镜分成能量均匀、偏振方向正交的两束偏振光，其中穿过偏振分光棱镜的  $p$  偏振光和被偏振分光棱镜反射的  $s$  偏振光，经过如图 3(b)所示的传输过程，从偏振分光棱镜的左端同轴输出，接着利用一个快轴方向为  $45^\circ$  的  $1/4$  波片将两束线偏振螺旋光转化为矢量光束，最后用 CCD 相机观察生成的矢量光束。为了检测生成的矢量光束的阶数，还需要在 CCD 相机前放置检偏器。该实验中用到的螺旋相位片由 PRC Photonics 公司生产，在一片玻璃基片上制作了  $5 \times 5$  的螺旋相位片阵列，其实物图如图 5(a)所示，螺旋相位片阵列的螺旋相位结构可表示成灰度图，如图 5(b)所示。在实验过程中，将其安装在一个二维平移台(水平和竖直)上，将

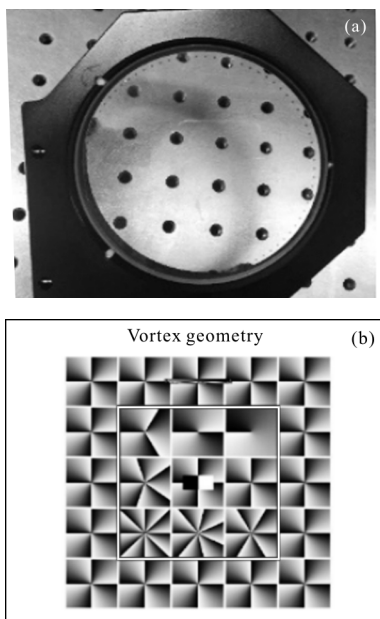


图 5 螺旋相位片阵列

Fig.5 Spiral phase plates array

不同的螺旋相位片移动到光路的中心，实现不同阶数的矢量光束的生成。

### 3 实验结果与讨论

为了确定光束完全合束并且同轴传输，实验过程中用 CCD 相机对合束过程进行观测。为了检验合束是否成功，需要在 CCD 相机前放置一个旋转的检偏器。通过观测检偏器后 CCD 相机上的光强图样，可以帮助判断合束的程度。当两束光完全合束时，光场分布呈均匀的花瓣状，而合束不完全时，光场分布的花瓣不均匀。根据光场分布的情况，进行调节，最终使光场分布呈均匀的花瓣状，即实现完全合束。如图 6 是在 CCD 相机上观测到的 1、3、6、8 阶矢量光束以及它们经过旋转的检偏器后的光强分布图。可以看出生成的矢量光束的强度分布与  $LG_{01}$ 、 $LG_{03}$ 、 $LG_{06}$  和  $LG_{08}$  模拉盖尔高斯光束相同。经过检偏器后，光束将分裂成  $2p$  瓣，其中  $p$  是矢量光束的阶数。在 CCD 上观测的光场图样将随着检偏器的旋转而旋转，当检偏器旋转的速度为  $\theta$  时，CCD 上光场图样的旋转速度为  $\dot{\theta}/p$ 。上述两点常被用于检测矢量光束的阶数。实验结果与上述两点吻合。

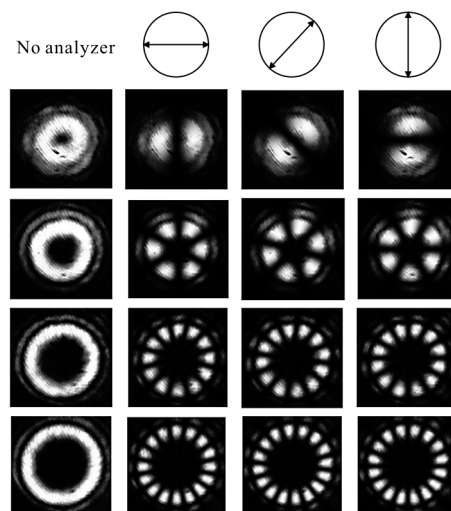


图 6 生成的 1、3、6、8 阶矢量光束的实验结果，其中第一列为矢量光束的光强分布，2~4 列为插入检偏器，并将其旋转  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  的光强分布

Fig.6 Experiments results of generation of 1st, 3rd, 6th and 8th order PVB, first column is the intensity distribution, 2-4 columns are intensity distributions checked by a rotating polarizer at  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$

将检偏器旋转到水平方向来观察合成光束的稳定性,发现在大于1 h的时间内,CCD上观察到的光强分布未发生变化,验证了萨格纳克干涉仪合束方法的高稳定性。理论上该系统的转化效率是100%,由于该实验中使用的光学元器件没有镀增透膜,目前实验测量的转化效率为81%。

## 4 结论

文中通过对多种合束方法生成矢量光束进行分析,将萨格纳克干涉仪合束高稳定的优势和螺旋相位片高转化效率、工作环境适用条件低的优点结合起来,设计基于萨格纳克干涉仪和螺旋相位片的矢量光束生成系统。首先通过分析光束轨道角动量态和偏振态在萨格纳克干涉仪中的演化规律,优化设计出了等腰直角三角形的光束合成光路结构。合束方法可以不使用1/2波片进行光束偏振态调制,光路结构更紧凑和稳定。实验使用5×5的螺旋相位片阵列,进行螺旋光束的生成。搭建合束实验系统将两束偏振态正交、轨道角动量态反号的螺旋光束合成了矢量光束。生成的矢量光束的光强分布与拉盖尔-高斯光束相同。文中采用的方法具有结构简单、合束稳定性高、结构紧凑和生成矢量光束质量高等优点。采用螺旋相位片代替液晶空间光调制器生成螺旋光束不仅降低了成本,提高转化了效率,更能在恶劣的环境下工作,为合束系统小型化、实用提供了新方法。

## 参考文献:

- [1] Ma Liang, Wu Fengtie. New combined positive axicon for generating bottle beam [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1988–1991. (in Chinese)  
马亮, 吴逢铁. 新型组合正轴棱锥产生局域空心光束[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1988–1991.
- [2] Xu Bijun. Propagation properties of elliptical symmetry anomalous hollow beams through a circular aperture [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1985–1987. (in Chinese)  
徐弼军. 椭圆对称奇异空心光束通过硬边光阑的传输特性[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1985–1987.
- [3] Zhu Yanying, Yao Wenying, Li Yuntao, et al. Experiment of vertex beam generated by method of computer generated holography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3907–3911. (in Chinese)  
朱艳英, 姚文颖, 李云涛, 等. 计算全息法产生涡旋光束的实验[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(12): 3907–3911.
- [4] Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(1): 1–57.
- [5] Lin Jian, Zheng Wei, Wang Haifeng, et al. Effects of scatterers' sizes on near-field coherent anti-Stokes Raman scattering under tightly focused radially and linearly polarized light excitation[J]. *Opt Express*, 2010, 18: 10888–10895.
- [6] Kawauchi H, Yonezawa K, Kozawa Y, et al. Calculation of optical trapping forces on a dielectric sphere in the ray optics regime produced by a radially polarized laser beam [J]. *Opt Lett*, 2007, 32: 1839–1841.
- [7] Liu Y, Cline D, He P. Vacuum laser acceleration using a radially polarized CO<sub>2</sub> laser beam [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1999, 424: 296–303.
- [8] Niziev V G, Nesterov A V. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 1999, 32: 1455–1461.
- [9] Zhan Q. Evanescent Bessel beam generation via surface plasmon resonance by radially polarized beam [J]. *Opt Lett*, 2006, 31: 1726–1728.
- [10] Julio T Barreiro, Tzu-Chieh Wei, Paul G Kwia. Remote preparation of single-photon "Hybrid" entangled and vector-polarization states [J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 030407.
- [11] Li Xiangping, Cao Yaoyu, Gu Min. Superresolution-focal-volume induced 3.0 Tbytes/disk capacity by focusing a radially polarized beam [J]. *Opt Lett*, 2011, 36: 2510–2512.
- [12] Meier M, Romano V, Feurer T. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation [J]. *Appl Phys A*, 2007, 86: 329–334.
- [13] Tian Bo, Pu Jixiong. Tight focusing of a double-ring-shaped azimuthally polarized beam [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(11): 2014–2016.
- [14] Cheng Wen, Joseph W H, Zhan Qiwen. Propagation of vector vortex beams through a turbulent atmosphere [J]. *Opt Express*, 2009, 17: 17829–17836.
- [15] Tidwell, Steve C, Dennis H Ford, et al. Generating radially polarized beams interferometrically[J]. *Applied Optics*, 1990, 29: 2234.
- [16] Jones P H, Rashid M, Makita L M O, et al. Sagnac

- interferometer method for synthesis of fractional polarization vortices, [J]. *Opt Lett*, 2000, 34: 2560.
- [17] Niziev V G, Chang R S, Nesterov A V. Generation of inhomogeneously polarized laser beams by use of a Sagnac interferometer[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(33): 8393–8399.
- [18] Fu S, Gao C, Shi Y, et al. Generating polarization vortices by using helical beams and a twyman green interferometer [J]. *Opt Lett*, 2015, 40: 1775.
- [19] Xin Jingtao, Gao Chunqing, Wang Zheng, et al. Generation of polarization vortices with a Wollaston prism and an interferometric arrangement [J]. *Appl Opt*, 2012, 52: 7077–7094.
- [20] Moreno I, Davis J A, Ruiz I, et al. Decomposition of radially and azimuthally polarized beams using a circular-polarization and vortex-sensing diffraction grating [J]. *Opt Express*, 2010, 7: 7173–7183.