

doi:10.3788/gzxb20184701.0126002

基于 Pancharatnam-Berry 相位调控产生混合偏振 矢量光束

徐兆鑫, 黄修章, 黄攀立, 艾余前, 张晨, 陈欢, 易煦农

(湖北工程学院 物理与电子信息工程学院, 湖北 孝感 432000)

摘 要:提出了一种基于 Pancharatnam-Berry(PB)相位调控产生混合偏振矢量光束的方法,按照光轴随空间坐标变化的规律,用相位延迟为 π 的 PB 相位元件对 PB 相位进行操控,获得局域偏振为线偏振的矢量光束,将此矢量光束入射到四分之一波片,产生混合偏振矢量光束.通过测定斯托克斯参数重构输出光场的偏振分布,实验结果表明:当以 $\theta_0=0$ 的线偏振光入射时,输出光场包含庞加莱球上垂直于 S_3 轴经线圆上所有偏振态的混合矢量光场;当以 $\theta_0=\pi/2$ 的线偏振光入射时,输出光场包含庞加莱球上垂直于 S_1 轴经线圆上所有偏振态的混合矢量光场.

关键词:物理光学;偏振;衍射光学;双折射;光电子器件

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)01-0126002-8

Generation of Hybridly Polarized Vector Beams by Manipulating Pancharatnam-Berry Phase

XU Zhao-xin, HUANG Xiu-zhang, HUANG Pan-li, AI Yu-qian,
ZHANG Chen, CHEN Huan, YI Xu-nong

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

Abstract: A method for generating hybridly polarized vector beams by manipulating Pancharatnam-Berry (PB) phase is proposed. According to the law of optical axis varying with the spatial coordinates, a PB phase element is used to manipulate the PB phase and generate vector beams with local linear polarization. When the vector beam is incident to a quarter-wave plate, a hybridly polarized vector beam is obtained. By measuring the Stokes parameter, the polarization distribution of the output light field is reconstructed. The experimental results show that the output hybridly polarized field contains all polarization states on the longitude of Poincaré sphere perpendicular to S_3 axis when input wave is linearly polarized light with polarization angle $\theta_0 = 0$. The output hybridly polarized field contains all polarization states on the longitude of Poincaré sphere perpendicular to S_3 axis when input wave is linearly polarized light with polarization angle $\theta_0 = 0$. When the polarization angle $\theta_0 = \pi/2$, the output hybridly polarized field includes all polarization states on the longitude of Poincaré sphere perpendicular to S_1 axis.

Key words: Physical optics; Polarization; Diffractive optics; Birefringence; Optoelectronic device

OCIS Codes: 260.0260; 260.5430; 050.1970

基金项目:湖北省大学生创新创业项目(No. 201610528003),国家自然科学基金(No.11547017)和湖北省自然科学基金(No. 2014CFB578)资助

第一作者:徐兆鑫(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为微纳光子学器件. Email: xuzhaoxin666@163.com

导师(通讯作者):易煦农(1979-),男,副教授,博士,主要研究方向为自旋光子学器件. Email: xny@szu.edu.cn

收稿日期:2017-07-06; **录用日期:**2017-09-18

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

偏振是光场的一个基本性质.传统的偏振光包括线偏振、椭圆偏振和圆偏振,这些偏振态都是空间均匀的,即光场波阵面上各点具有相同的偏振态.近 20 年来,具有空间非均匀偏振分布的光场(波阵面上各点具有不同偏振态)即矢量光束受到了研究人员的极大关注^[1].偏振态的空间非均匀分布会导致光场产生一些奇异的光学特性.比如,径向偏振光在紧聚焦的条件下会产生强的纵向电场^[2-3],而角向偏振光在紧聚焦的条件下会产生强的纵向磁场^[4-5].双环状径向偏振矢量光束被聚焦时在焦点区域会形成“光学囚笼”(Optical cage)^[6].这些特性使得矢量光场在粒子捕获、激光加工和超分辨成像等领域有巨大的潜在应用,也激发了更多科研人员对光场偏振操控的兴趣^[7].

为了描述光场的偏振态,庞加莱于 1892 年基于斯托克斯参数导入了庞加莱球.庞加莱球是一种描述光场偏振态的几何表象,具有形象、直观、数学运算简单的特点.球面上任意一点代表了单色平面波的一种偏振态.矢量光束由于其同一波阵面的不同位置具有不同的偏振态,所以其偏振态不能由庞加莱球上的一点来描述^[8].最受人们关注的柱矢量光束具有庞加莱球赤道上所有点的偏振态,但是其光束横截面上各点的局域偏振本质上都是线偏振.最近,一种所谓的混合偏振矢量光束引起了研究人员的兴趣^[9-12].这种光束横截面上的偏振态包括了线偏振、椭圆偏振和圆偏振.研究表明,在高数值孔径透镜的聚焦下,混合偏振矢量光束的偏振态分布展现出有趣的三维变化特性,使其在粒子操控及显微技术领域具有潜在的应用价值^[13-15].

对矢量光场的研究兴趣让研究者们开发出了多种产生矢量光束的方法.这些方法可以分为有源法和无源法两大类.有源方法主要是通过设计新型的光学谐振腔来产生矢量光束^[16];无源方法则是通过波前重构将普通激光光束转化为矢量光束.无源的方法一般借助于空间光调制器或特别设计的光子学器件(如超表面、q 片等),光路调节方便、灵活,因而更受人们关注^[17-20].

Pancharatnam-Berry(PB)相位是两种几何相位之一,与光场偏振态的演化有关(另一类几何相位是 Rytov-Vladimirskii-Berry 相位,与光束的传播方向有关),而庞加莱球可以方便地描述光场偏振态变化所导致的 PB 相位^[21].PB 相位为研究人员操控光场的偏振态及设计新颖光子学器件提供了一个新的自由度.以色列的 Hasman 小组在电介质基底或金属膜上蚀刻亚波长光栅构成所谓的 PB 相位元件实现了对光场偏振和相位的调控^[22].国内也有不少相关研究.比如,Kang Ming 等提出在金属板上刻上方向变化的矩形亚波长小孔实现 PB 相位的操控^[23];Li Peng 等则基于纵向 PB 相位调控产生了矢量贝塞尔-高斯光束^[24];Liu Yachao 等基于超表面实现了高阶庞加莱球上的偏振演化^[25].

本文提出一种基于 PB 相位调控产生混合偏振矢量光束的方法,利用一个四分之一波片和一个 PB 相位元件对光场进行两次 PB 相位调控,将入射的线偏振光转化为混合偏振矢量光束.设计的 PB 相位元件的光轴随空间坐标按特定的几何分布.线偏振光通过 PB 相位元件后被转化为局域偏振为线偏振的矢量光束.由于矢量光束的局域偏振仍然是线偏振,因此,当矢量光束再通过一个光轴方向不随空间坐标变化的四分之一波片后,其局域偏振方向与光轴方向的夹角仍然是空间坐标的函数.因此,矢量光束通过四分之一波片后再次受到 PB 相位的空间调制,从而被转化为混合偏振矢量光束.该研究对设计基于 PB 相位的光子学器件具有重要参考价值.

1 波片与 PB 相位

混合矢量光束是指光束横截面内具有多种不同偏振态的光束.当光场通过波片发生偏振态改变的同时,会产生一个附加的 PB 相位因子.波片的琼斯矩阵可以写为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\Gamma}{2}\right) - i\cos 2\theta \sin\left(\frac{\Gamma}{2}\right) & -i\sin(2\theta) \sin\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \\ -i\sin(2\theta) \sin\left(\frac{\Gamma}{2}\right) & \cos\left(\frac{\Gamma}{2}\right) + i\cos 2\theta \sin\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 Γ 为波片的相位延迟, θ 为波片光轴与 x 轴的夹角.假设入射光场为线偏振光,则其电场矢量表示为

$$\mathbf{E}_m(x, y) = \mathbf{E}_0(x, y) \begin{pmatrix} \cos \theta_0 \\ \sin \theta_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{E}_0(x, y)$ 为光场振幅, θ_0 为光场偏振角. 左旋圆偏振和右旋圆偏振为一对正交偏振态, 所以, 线偏振光可以分解为左、右旋圆偏振光的线性叠加

$$\mathbf{E}_{\text{in}}(x, y) = \frac{1}{2} \mathbf{E}_0(x, y) \left[\exp(-i\theta_0) \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} + \exp(i\theta_0) \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \right] \quad (3)$$

将式(3)代入式(1), 得到输出光场为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{out}}(x, y) = & \frac{1}{2} \mathbf{E}_0(x, y) \exp(-i\theta_0) \left[\cos \frac{\Gamma}{2} + i \sin \frac{\Gamma}{2} \exp(-i\varphi_p) \right] \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} + \\ & \frac{1}{2} \mathbf{E}_0(x, y) \exp(i\theta_0) \left[\cos \frac{\Gamma}{2} + i \sin \frac{\Gamma}{2} \exp(i\varphi_p) \right] \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\varphi_p = 2(\theta - \theta_0)$ 为与光场偏振手性有关的附加相位, 即 PB 相位. 从式(4)可以看出, 入射线偏振光的左、右旋圆偏振分量分别获得了大小相等、符号相反的 PB 相位. 值得注意的是: PB 相位的大小是由波片光轴和入射光的夹角决定的. 由于任意偏振光都可以分解为左、右旋圆偏振的线性叠加, 所以上述结论可以非常方便地推广到任意偏振入射的情况. 值得一提的是, 当相位延迟 $\Gamma = \pi$, 即波片为半波片时, 输出光场表示为

$$\mathbf{E}_{\text{out}}(x, y) = \mathbf{E}_0(x, y) \begin{bmatrix} \cos(2\theta - \theta_0) \\ \sin(2\theta - \theta_0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)表明输出光场仍然是线偏振光, 只是偏振方向相对入射场振动方向转过了 2θ 的角度. 同理, 不难得到相位延迟 $\Gamma = \pi/2$, 即波片为四分之一波片时的输出光场

$$\mathbf{E}_{\text{out}}(x, y) = \mathbf{E}_0(x, y) \begin{bmatrix} \cos\theta_0 - i\cos(2\theta - \theta_0) \\ \sin\theta_0 - i\sin(2\theta - \theta_0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

显然, 当线偏振光入射到四分之一波片时, 出射光一般为椭圆偏振光. 当 θ, θ_0 取某些特定值, 比如 $\theta = \theta_0 = 0$ 时, 由式(6)可知出射光场仍为线偏振光; 当 $\theta = \pi/4$ 而 $\theta_0 = 0$ 时, 出射光场为右旋圆偏振光.

从以上分析可以看出, 一个常规的波片通过改变相位延迟 Γ 和光轴的角度 θ , 能将光场从一个均匀偏振态转化成为另一个均匀偏振态. 假如某种材料或器件的光轴方向随空间坐标的变化而变化, 不难想象: 具有均匀偏振光场通过这样的器件时, 出射光场的偏振分布将具有空间非均匀性; 光场的左、右旋圆偏振分量也会获得和空间坐标有关的 PB 相位, 这种器件也被称为 PB 相位元件, 简称 PBE (Pancharatnam-Berry Element). 换句话说, 通过设计光轴的空间分布可以实现对光场偏振分布的操控.

同样地, 基于琼斯矩阵, 假设 PB 相位元件的光轴方向可以表示为

$$\theta(x, y) = q\varphi \quad (7)$$

式中 q 为 PB 相位元件的拓扑荷数, $\varphi = \arctan(y/x)$ 为方位角. 式(7)表示 PB 相位元件的光轴分布, 描述光轴在点 (x, y) 与 x 轴的夹角. 图 1 为 $\varphi = \arctan(y/x)$ 的 PB 相位元件的光轴分布示意图.

仍然考虑线偏振光入射, 这种情况下, 入射光偏振方向与光轴的夹角是随坐标变化的, 出射光场获得的 PB 相位也是随坐标变化的. 所以, 由式(4)描述的输出光场一般是局域偏振为椭圆偏振的矢量光束. 本文中, PB 相位元件具有均匀的相位延迟, 且 $\Gamma = \pi$, 那么输出光场可以表示为

$$\mathbf{E}_{\text{out}}(x, y) = \mathbf{E}_0(x, y) \begin{bmatrix} \cos(2q\varphi - \theta_0) \\ \sin(2q\varphi - \theta_0) \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)可见, 输出光场是局域偏振为线偏振的矢量光束. 当 $q = 1/2$ 时, 输出光场为柱矢量光束, 光场的局域偏振方向由入射光的偏振角决定. 当 $\theta_0 = 0$ 时, 出射光为径向偏振光, 而当 $\theta_0 = \pi/2$ 时, 出射光为角向偏振光. 这意味着均匀偏振光通过非均匀各向异性的 PB 相位元件时被转化成了偏振非均匀分布的结构光(矢



图 1 Pancharatnam-Berry 相位元件的光轴(慢轴)分布示意图
Fig.1 The optical axis (slow axis) spatial distribution of the Pancharatnam-Berry phase element

量光束).在前面均匀波片的讨论中已经得出:出射光的具体偏振态取决于波片的相位延迟 Γ 、光轴的角度 θ 以及入射光的偏振态.当均匀的线偏振光通过 PB 相位元件时,由于不同区域的光轴方向(θ)不同,所以出射光的偏振态必然是随空间坐标变化的.换言之,横截面内不同坐标处的光场通过 PB 相位元件时获得的相位延迟不一致,最终导致不同区域的光场产生了不同的偏振演化.

当偏振非均匀分布的矢量光场入射到光轴方向不变的常规波片时,由于矢量光场横截面内不同区域具有不同的振动方向,即不同区域光场振动方向与光轴夹角($\theta - \theta_0$)不一样.所以,光场经由常规波片变换后也会获得非均匀的 PB 相位,经历不同的偏振演化,从而形成混合偏振矢量光束.假设柱矢量光束入射到四分之一波片,由于柱矢量光束横截面内各点具有不同的偏振角,不难预见:当柱矢量光束局域偏振方向和光轴方向的夹角为 $m \frac{\pi}{2}$ (其中 m 为整数)时,输出光场的局域偏振态仍为线偏振;当柱矢量光束局域偏振方向和光轴方向的夹角为 $(2m+1) \frac{\pi}{4}$ 时,输出光场的局域偏振态为圆偏振;当柱矢量光束局域偏振方向和光轴方向的夹角为其他值时,输出光场的局域偏振态应为椭圆偏振.所以,本文先利用 PB 相位元件产生柱矢量光束,然后再让柱矢量光束通过均匀的四分之一波片即可产生混合偏振矢量光束.以径向偏振光为例,采用琼斯矩阵分析四分之一波片对光场的变换作用.径向偏振光的电场矢量可以表示为

$$\mathbf{E}_{in}(x, y) = \begin{pmatrix} \cos \varphi' \\ \sin \varphi' \end{pmatrix} \quad (9)$$

从四分之一波片出射的光场可以写为

$$\mathbf{E}_{out}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \varphi' - i \cos(2\theta - \varphi') \\ \sin \varphi' - i \sin(2\theta - \varphi') \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(10)可以得到输出光场的斯托克斯参数为

$$\begin{cases} S_0 = 1 \\ S_1 = \cos 2\varphi' \\ S_2 = 0 \\ S_3 = \sin 2\varphi' \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可以看出,输出光场包含了庞加莱球上垂直于 S_3 轴的经线圆上的所有偏振态的混合矢量光场.同理可以推出,当角向偏振光入射到四分之一波片时,输出光场应为包含庞加莱球上垂直于 S_1 轴的经线圆上的所有偏振态的混合矢量光场.

综合以上讨论分析,先通过光轴方向随方位角坐标改变的非均匀各向异性介质实现 PB 相位的空间调制,从而产生径向偏振、角向偏振等柱矢量光束,再通过一个光轴方向不变的四分之一波片将其变换为混合偏振矢量光束.

2 实验结果

为了验证上述理论分析,设计图 2 所示实验装置.He-Ne 激光器作为光源产生波长为 632.8 nm 的基模高斯光束.激光束经望远镜准直系统(Collimator)扩束后入射到格兰激光偏振镜(GLP 1),被转化为线偏振光.PB相位器件(PBE)对线偏振光进行PB相位调控,将其转化为柱矢量光束.四分之一波片(QWP 1)将柱

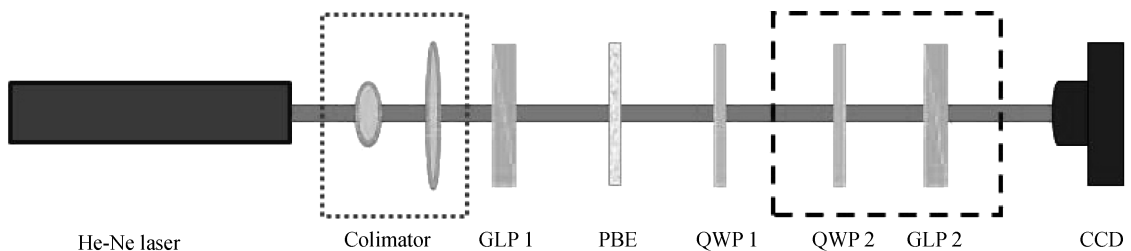


图 2 产生混合偏振矢量光束的实验装置示意图

Fig.2 Diagram of experimental setup for generating hybridly polarized vector beams

矢量光束转化为混合矢量光束.第二个格兰激光偏振镜(GLP 2)作为检偏器用来检测光场的偏振态.为了具体测定输出光束的偏振分布,引入另外一个四分之一波片(QWP 2)和 GLP 2 组合在一起测量光场的斯托克斯参数.CCD 相机用来记录光场的强度分布.

采用的 PB 相位元件是利用高功率飞秒激光在熔融石英玻璃中蚀刻得到的.将激光聚焦在玻璃表面下 $200\ \mu\text{m}$ 处,二氧化硅(SiO_2)在强激光的作用分解为多孔玻璃($\text{SiO}_{2(1-x)} + x\text{O}_2$),导致激光蚀刻过的地方产生折射率变化即形式双折射(form birefringence).这里,本文制作的 PB 相位元件各点具有相同的双折射率.器件等效光轴(快轴和慢轴)方向与激光蚀刻方向平行或垂直.因此,激光蚀刻制成的 PB 相位元件可以当作具有非均匀光轴方向和均匀相移的双折射波片.图 1 为采用的 PB 相位元件的光轴分布示意图,其拓扑荷数 $q=1/2$.根据式(8),PB 相位元件后的输出光场为

$$\mathbf{E}_{\text{out}}(x, y) = \mathbf{E}_0(x, y) \begin{bmatrix} \cos(\varphi - \theta_0) \\ \sin(\varphi - \theta_0) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(12)表明 PB 相位元件后的输出光场是偏振级数为 1 的柱矢量光束,其局域偏振角取决于入射线偏振光的偏振角.

图 3 为沿 x 方向振动($\theta_0=0$)的线偏振光入射的实验结果,图中箭头表示检偏器的透光轴方向.图 3(a)~(d)为 PB 相位元件后的输出光场经过检偏器后测定的光强分布.从图中可以看出,光场具有一个消光方向,且消光方向始终与检偏器的透光轴方向垂直,这表明输出光场为径向偏振光,与前述理论分析相符.图 3(e)~(h)为四分之一波片(QWP1)后的输出光场经过检偏器后测定的光强分布.可以看到:当检偏器置于 0° 和 90° 时会有一个消光方向,且消光方向与检偏器的透光轴方向垂直;而当检偏器置于 45° 和 135° 时,不存在完全消光方向.这表明径向偏振光通过四分之一波片后,其偏振分布发生了改变.

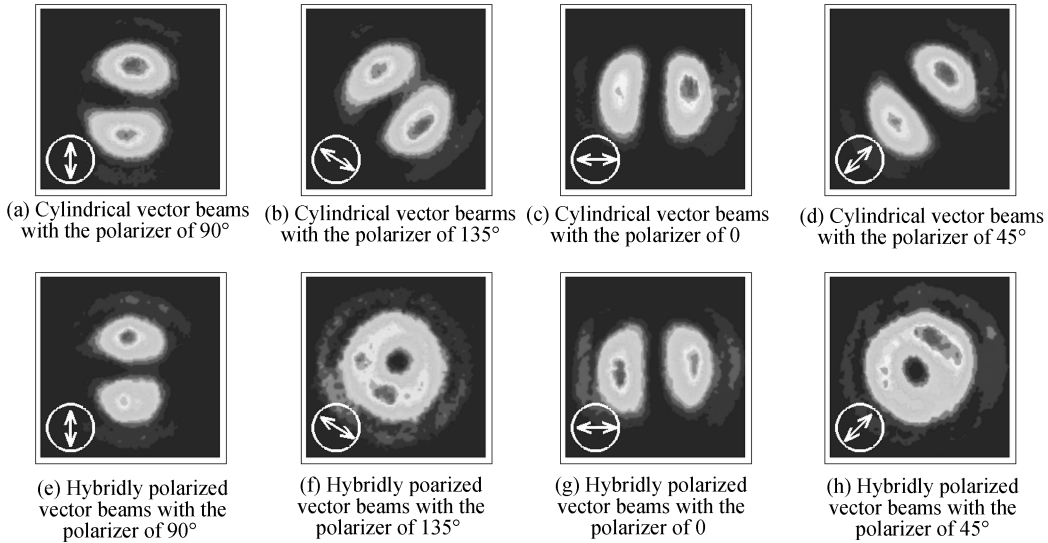


图 3 $\theta_0=0$ 的线偏振光入射后产生的柱矢量光束、混合偏振矢量光束经过检偏器后的光强分布

Fig.3 The measured intensity distribution of the created cylindrical vector beams and hybridly polarized vector beams after passing through the polarizer, when the incident linearly polarized light has a polarization angle $\theta_0=0$

图 4 为沿 y 方向振动($\theta_0=\pi/2$)的线偏振光入射的实验结果.图 4(a)~(d)为 PB 相位元件后的输出光场通过检偏器后的光强分布.可以看到消光方向与检偏器的透光轴方向始终一致,这意味着输出光场应为角向偏振光束.图 4(e)~(h)是光场通过四分之一波片(QWP 1)后的实验结果.从图中可以看到:当检偏器置于 0° 和 90° 时会有一个消光方向,且消光方向与检偏器的透光轴方向一致;当检偏器置于其他角度时,如同图 3 所示实验结果,不存在完全消光方向.

为了确定以上两种线偏振光(θ_0 分别为 0 和 $\pi/2$)入射到混合偏振矢量光场产生系统后输出光束的偏振空间分布,在 GLP 2 之前再插入一个四分之一波片(QWP 2)一起构成一个斯托克斯参数测量系统.通过旋转 QWP 2 和 GLP 2,可以测得克斯参数

$$\begin{cases} S_1 = I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 90^\circ) \\ S_2 = I(45^\circ, 45^\circ) - I(135^\circ, 135^\circ) \\ S_3 = I(-45^\circ, 0^\circ) - I(45^\circ, 0^\circ) \end{cases} \quad (13)$$

式中, $I(\alpha, \beta)$ 表示 QWP 2 的光轴旋转到 α 的角度, GLP 2 的透光轴旋转到 β 的角度时 CCD 记录的光强分布. 斯托克斯参数 S_0 表示待测光束的光强分布, 可以通过撤掉 QWP 2 和 GLP 2 后由 CCD 相机直接测定.

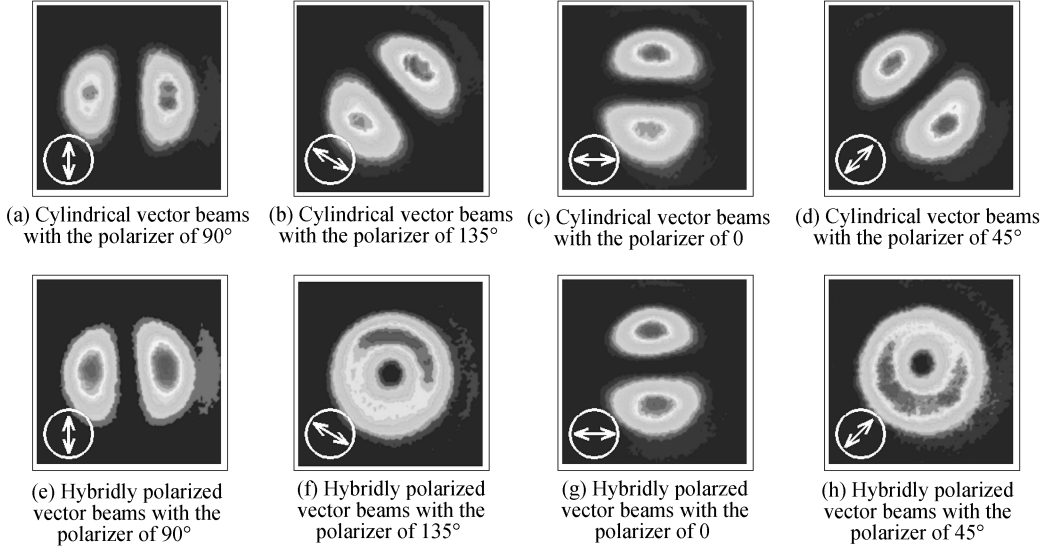


图 4 $\theta_0 = \pi/2$ 的线偏振光入射后产生的柱矢量光束、混合偏振矢量光束经过检偏器后的光强分布

Fig.4 The measured intensity distribution of the created cylindrical vector beams and hybridly polarized vector beams after passing through the polarizer, when the incident linearly polarized light has a polarization angle $\theta_0 = \pi/2$

图 5 为具体测得的归一化斯托克斯参数 $s_i = S_i/S_0$ ($i = 1, 2, 3$). s_1 给出了 x 偏振分量和 y 偏振分量的归一化强度差, 根据其正负可以判断光波的 x 线偏振分量占优势还是 y 线偏振分量占优势; s_2 的正负给出了 $+\frac{\pi}{4}$ 和 $-\frac{\pi}{4}$ 线偏振分量的强弱; s_3 则表示光场的左、右旋圆偏振分量的强度. 图 5(a)~(d) 为沿 x 振动的线偏振光入射时测得的输出光束的斯托克斯参数, 而图 5(e)~(h) 是 y 线偏振光入射的实验结果.

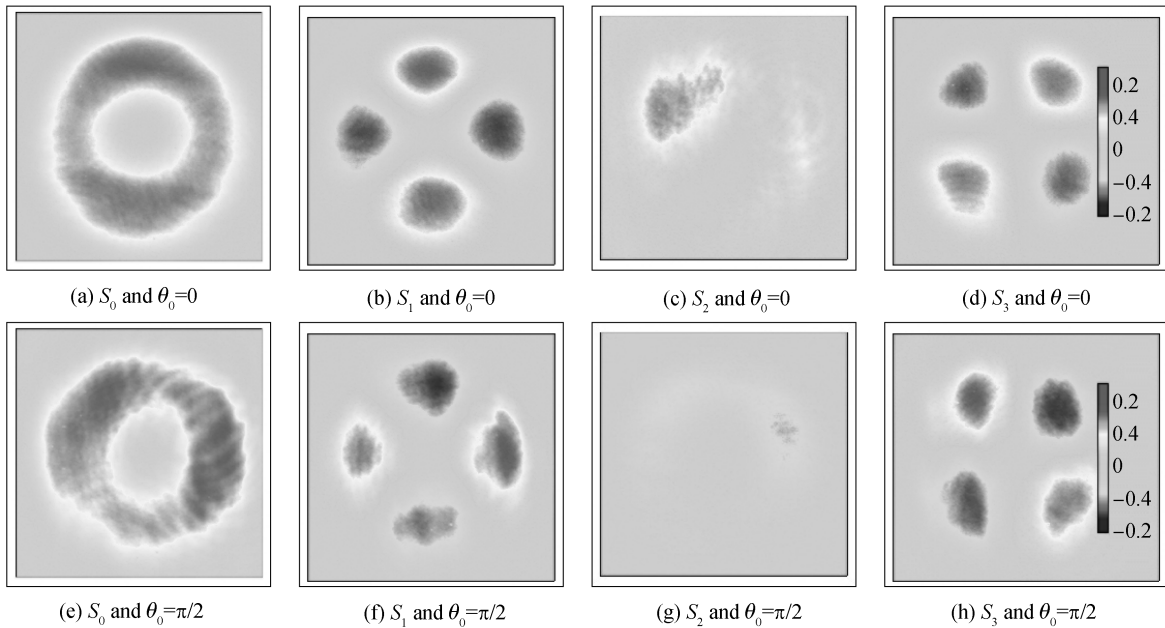


图 5 不同方向线偏振光产生的混合偏振矢量光束的归一化斯托克斯参数的实验结果

Fig.5 Experimental results of the Stokes parameters of the created hybridly polarized vector beams with the different linearly polarized light

根据图 4 中测得的斯托克斯参数,反演输出光束的偏振结构,所得结果如图 5.图 6(a)和(b)分别为 x 线偏振光和 y 线偏振光入射产生的混合偏振矢量光束的偏振结构.由图 6(a)可以看出:当沿 x 方向振动的线偏振光入射时,产生的混合偏振矢量光束在 x 和 y 轴方向仍为线偏振,其中 x 轴方向上光的振动方向与入射光相同,而 y 轴方向上光的振动方向与入射光垂直.所以,当在输出光场后加入一个检偏器再观察光强,可以看到检偏器置于 0° 和 90° 时会存在一个消光方向(如图 3 所示).在 x 和 y 轴之间的偏振态一般为椭圆偏振,其中在 $\pm 45^\circ$ 时为圆偏振.如图 6(b)所示:当沿 y 方向振动的线偏振光入射时,所产生的混合偏振矢量光束的偏振结构也有类似规律.显而易见,当入射线偏振光振动方向转过一定角度时,产生的混合矢量光束的偏振分布也会相应地转过相同的角度.

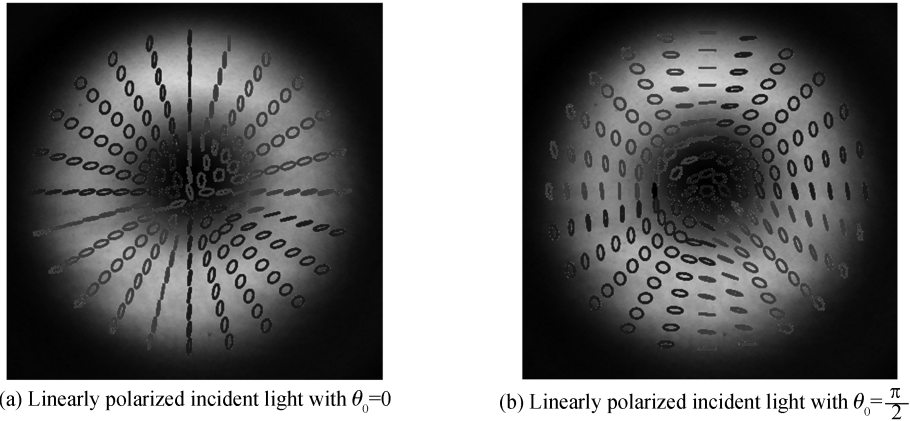


图 6 混合偏振矢量光束的偏振分布

Fig.6 The polarization distribution of the created hybridly polarized vector beams

3 结论

提出了一种基于 PB 相位调控产生混合偏振矢量光束的方法.利用光轴随空间坐标变化、相位延迟为 π 的 PB 相位元件,实现 PB 相位的操控,从而获得局域偏振为线偏振的矢量光束,再将此矢量光束入射到四分之一波片,产生混合偏振矢量光束.通过测定斯托克斯参数,反演了输出光场的偏振结构.结果显示:当以 $\theta_0=0$ 的线偏振光入射时,输出光场是包含了庞加莱球上垂直于 S_3 轴的经线圆上的所有偏振态的混合矢量光场;当以 $\theta_0=\pi/2$ 的线偏振光入射时,输出光场为包含庞加莱球上垂直于 S_1 轴的经线圆上的所有偏振态的混合矢量光场.该研究结果对利用 PB 相位进行光场调控具有重要参考价值.

参考文献

- [1] ZHAN Q W. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, **1**: 1-57.
- [2] DORN R, QUABIS S, LEUCHS G. Sharper focus for a radially polarized light beam [J]. *Physical Review Letters*, 2003, **91**: 233901.
- [3] ZHANG F, YU H, FANG J. Efficient generation and tight focusing of radially polarized beam from linearly polarized beam with all-dielectric metasurface [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(6): 6656-6664.
- [4] YOUNGWORTH K S, BROWN T G. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams [J]. *Optics Express*, 2000, **7**(2): 77-87.
- [5] ZHANG Z, PU J, WANG X. Tight focusing of radially and azimuthally polarized vortex beams through a dielectric interface [J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, **25**(5): 1664-1667.
- [6] KOZAWA Y, SATO S. Focusing property of a double-ring-shaped radially polarized beam [J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(6): 820-822.
- [7] TIAN B, PU J. Tight focusing of a double-ring-shaped, azimuthally polarized beam [J]. *Optics Letters*, 2014, **36**(11): 2014-2016.
- [8] YI X, LIU Y, LING X. Hybrid-order Poincaré sphere [J]. *Physical Review A*, 2015, **91**: 023801.
- [9] BECKLEY A M, BROWN T G, ALONSO M A. Full Poincaré beams [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(10): 10777-10785.
- [10] WANG X, LI Y, CHENG J, et al. A new type of vector fields with hybrid states of polarization [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(10): 10786-10795.
- [11] GALVEZ E J, KHADKA S, SCHUBERT W H, et al. Poincaré-beam patterns produced by nonseparable

- superpositions of Laguerre-Gauss and polarization modes of light[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(15): 2925-2934.
- [12] WANG X, LI Y, CHENG J, *et al.* A new type of vector fields with hybrid states of polarization[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(10): 10786-10795
- [13] LERMAN G M, STERN L, LEVY U. Generation and tight focusing of hybridly polarized vector beams[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(26): 27650-27657.
- [14] LIU Hai-gang, YANG Yan-fang, HE Ying, *et al.* Theoretical study about real-time manipulation of optical cage with double-ring-shaped hybridly polarized vector beam[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(3): 0302009.
刘海港, 杨艳芳, 何英, 等. 基于双环混合偏振矢量光束实现光学囚笼实时操纵的理论研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0302009.
- [15] ZHANG Rui-li, CHEN Zi-yang, PU Ji-xiong. Radiation forces on a Rayleigh particle by highly focused hybridly polarized vector beams[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(2): 0214004.
张瑞丽, 陈子阳, 蒲继雄. 强聚焦混合偏振矢量光束在瑞利粒子上产生的辐射力[J]. *光子学报*, 2015, **44**(2): 0214004.
- [16] POHL D. Operation of a ruby laser in the purely transverse electric mode TE_{01} [J]. *Applied Physics Letters*, 1972, **20**: 266-267.
- [17] WANG X, DING J, NI W, *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.
- [18] MAN Z, MIN C, ZHANG Y, *et al.* Arbitrary vector beams with selective polarization states patterned by tailored polarizing films[J]. *Laser Physics*, 2013, **23**(10): 105001.
- [19] WU G, WANG F, CAI Y. Generation and self-healing of a radially polarized Bessel-Gauss beam[J]. *Physical Review A*, 2014, **89**: 043807.
- [20] CHEN S, ZHOU X, LIU Y, *et al.* Generation of arbitrary cylindrical vector beams on the higher order Poincaré sphere [J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(18): 5274-5276.
- [21] COURTIAL J. Wave plates and the Pancharatnam phase[J]. *Optics Communications*, 1999, **171**: 179-183.
- [22] BOMZON Z, KLEINER V, HASMAN E. Pancharatnam-Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings[J]. *Optics Letters*, 2001, **26**(18): 1424-1426.
- [23] KANG M, CHEN J, WANG X, *et al.* Twisted vector field from an inhomogeneous and anisotropic metamaterial[J]. *Journal of the Optical Society of B*, 2012, **29**(4): 572-576.
- [24] LI P, ZHANG Y, LIU S, *et al.* Generation and self-healing of vector Bessel-Gauss beams with variant state of polarizations upon propagation[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(5): 5821-5831.
- [25] LIU Y, LING X, YI X, *et al.* Realization of polarization evolution on higher-order Poincaré sphere with metasurface [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**: 191110.