

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0251-06

# 腔外相干叠加产生径向偏振光

林惠川 刘 辉 蒲继雄

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 基于径向偏振光的广泛应用,从理论与实验上研究了径向偏振光的产生与传输。实验上,得用阶跃型相位跃变器在腔外将两束偏振正交的  $TEM_{00}$  模光束分别转化为偏振正交的  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束,利用马赫-曾德尔干涉仪将产生的  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束进行相干叠加得到径向偏振光。理论上,用标量衍射积分对  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束的产生,以及通过相干叠加得到的径向偏振光进行数值模拟。同时指出实验上的误差对产生径向偏振光的影响,以及研究了传输过程中实验上所获得的径向偏振光光斑的变化。聚焦径向偏振光可产生极小的焦斑以及纵向场分量,因此有望在粒子加速、高分辨显微镜以及材料加工等方面得到广泛应用。

**关键词** 物理光学; 径向偏振; 相位跃变器; 马赫-曾德尔干涉仪; 相干叠加

**中图分类号** O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s1.0251

## Extra Cavity Coherent Superposition for Generation of Radially Polarized Beam

Lin Huichuan Liu Hui Pu Jixiong

(Department of Electronic Science & Technology, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)

**Abstract** Due to the extensive application of radially polarized beams, the generation and propagation of this kind of beam are investigated theoretically and experimentally in this paper. In theory, the generation of  $TEM_{01}$  and  $TEM_{10}$  beams and radially polarized light beam are simulated by the integral of scalar diffraction. In experiment, by the use of phase step, two orthogonally polarized  $TEM_{00}$  beams are converted to  $TEM_{01}$  and  $TEM_{10}$  beams with orthogonal polarization respectively outside the cavity. Then the radially polarized light beam is obtained by coherent superposition of  $TEM_{01}$  and  $TEM_{10}$  beams. The influence of experimental error on the generation of radially polarized light beam, and the change of the light spot of radially polarized light beam in propagation are investigated. A longitudinal electric field and teeny focal spot can be generated by focusing the radially polarized light beam, therefore, it may have extensive application in many fields, such as particle acceleration, high-resolution microscopy and material processing etc.

**Key words** physical optics; radially polarized; phase step; Mach-Zehnder interferometer; coherent superposition

## 1 引 言

偏振是光束的重要特性之一,而对光束偏振特性的研究也已经从传统的线偏振以及圆偏振发展到空间矢量偏振,例如径向或者角向偏振。近年来,由于其独特的偏振特性以及聚焦特性<sup>[1,2]</sup>,径向偏振光在粒子加速、粒子囚禁、高分辨率显微技术及材料加工中获得了广泛的研究与应用<sup>[3~9]</sup>。因此,从实验上产生径向偏振光具有重要的理论与实际意义。

产生径向偏振光可用不同的方法,大致可分为

两大类,一类是在激光谐振腔内直接产生径向偏振光<sup>[10]</sup>,另外一类是腔外间接产生<sup>[11]</sup>。本文采用腔外相干叠加的方法在实验上产生了径向偏振光。首先,从理论上对相干叠加  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  光束产生径向偏振光的可行性进行模拟研究;然后给出实验装置与光路图并对其进行分析,给出了实验上所获得的光斑,将实验结果与理论光斑进行比较分析,并且检验实验光斑的偏振特性;最后指出实验上的误差对实验结果的影响。

**基金项目**: 福建省科技计划重点项目(2007H0027)和福建省自然科学基金(A0810012)资助课题。

**作者简介**: 林惠川(1984—),男,硕士研究生,主要从事光束传输与变换等方面的研究。E-mail: lhc703@hqu.edu.cn

**导师简介**: 蒲继雄(1962),男,教授,主要从事光束传输与非线性光学等方面的研究。

E-mail: jixiong@hqu.edu.cn(通信联系人)

## 2 理论分析

相干叠加  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束产生径向偏振光的思想可追溯到 1966<sup>[12]</sup> 年, 线偏振的  $TEM_{01}$  模光束横向场可表示为

$$\mathbf{E}_{01}(x, y) = \frac{E_0}{2} \frac{x}{w} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2}\right) \mathbf{u}_y, \quad (1)$$

而线偏振的  $TEM_{10}$  模光束为

$$\mathbf{E}_{10}(x, y) = \frac{E_0}{2} \frac{x}{w} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2}\right) \mathbf{u}_x, \quad (2)$$

式中  $w$  为光束的束腰半径,  $\mathbf{u}_y$  与  $\mathbf{u}_x$  为沿着  $y$  轴与  $x$

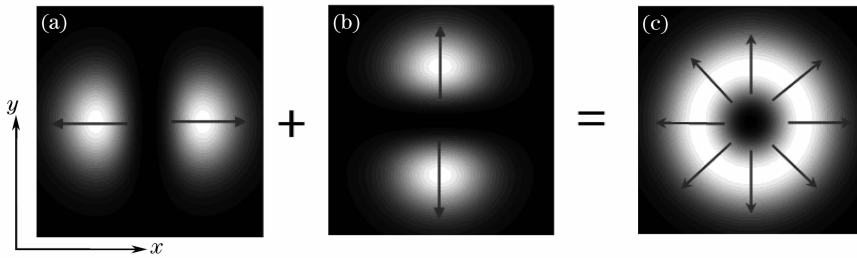


图 1 相干叠加产生径向偏振光的光强分布。(a)  $TEM_{10}$  模光束的光强分布; (b)  $TEM_{01}$  模光束的光强分布; (c) 相干叠加后所得到的径向偏振光的光强分布。箭头为光束的偏振方向

Fig. 1 Intensity distributions of the radially polarization beam that was generated by coherent superposition of  $TEM_{01}$  and  $TEM_{10}$ . (a) Intensity distributions of  $TEM_{10}$ ; (b) intensity distributions of  $TEM_{01}$ ; (c) radially polarized light beam. Arrow indicate the direction of the polarization of the beam

由(3)式以及图 1 可以看出, 相干叠加  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束产生径向偏振光的方法是可行的, 因此从实验上得到  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束是实现径向偏振光的一个关键。

在实现线偏振的  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束中, 本文采用了阶跃型的相位跃变器, 即通过阶跃型的相位跃变器将线偏振的基模高斯光束  $TEM_{00}$  分别转化为  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束。

图 2 为阶跃型相位跃变器, 其传输函数为

$$\tau(x, y) = \begin{cases} 1, & x > x_0 \\ \exp(-i\pi), & x \leq x_0 \end{cases} \quad (4)$$

$TEM_{00}$  模光束的横向电磁场为

$$E_{in}(x, y) = E_0 \exp[-(x^2 + y^2)/w^2], \quad (5)$$

(5) 式中  $w$  为  $TEM_{00}$  模光束的光斑半径, 且假设光束沿着  $z$  轴方向传播。当线偏振的  $TEM_{00}$  模光束通过相位跃变器传输时, 且光束的偏振方向沿着跃变器的跃变边, 则由相位跃变器的传输函数可以看出, 在跃变边  $x_0$  左右光斑存在  $\pi$  的相位差, 因此, 在通过跃变器后光斑沿着跃变边存在一个奇点边, 光斑被分成了两部分, 奇点边光强为零。并且由于  $\pi$

轴的单位矢量, 假定坐标原点位于光斑中心。对  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束进行相干叠加可得到

$$\mathbf{E}(x, y) = \mathbf{E}_{01} + \mathbf{E}_{10} = \frac{E_0}{w} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2}\right) (x\mathbf{u}_x + y\mathbf{u}_y). \quad (3)$$

从(3)式可以看出, 在权重因子  $(x, y)$  以及单位矢量  $(\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y)$  的共同作用下光束的偏振矢量在光斑上处处沿着径向, 而光束的光强分布则由  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$  决定。对(1)式~(3)式进行数值模拟得到的光束的光强分布如图 1 所示。

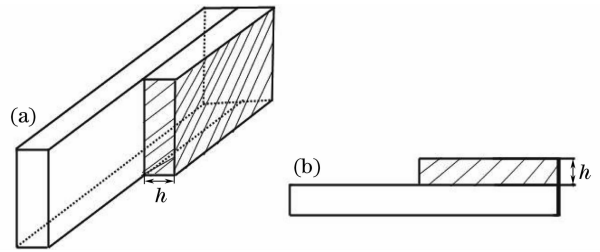


图 2 阶跃型相位跃变器,  $h$  为玻璃底板上所镀的增透膜的厚度,  $h$  满足  $\pi = 2\pi h(n-1)/\lambda$ ; (b) 为其截面图

Fig. 2 Schematic of the phase step, the antireflection coating produce a phase shift  $\pi = 2\pi h(n-1)/\lambda$ ;

(b) section of phase step

的相位差的存在, 奇点边左右光束的偏振虽然方向相同但是不同步, 这样也便实现了如图 1(a), (b) 中箭头所示的偏振模式。进一步采用标量衍射积分, 对  $TEM_{00}$  模光束经跃变器的传输进行数值计算。把相位跃变器的传输函数代入菲涅耳衍射积分, 则可得经相位跃变器后  $TEM_{00}$  模光束的场分布。假设  $TEM_{00}$  模光束沿着  $z$  轴传播, 相位板所在的位置为坐标原点, 则衍射场的场分布为

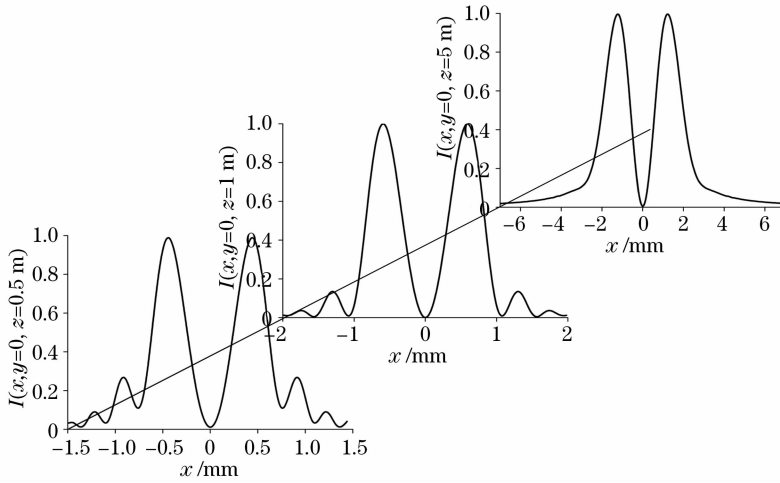


图3 TEM<sub>00</sub>模光束经相位跃变器后在不同传输距离下的光强分布曲线

Fig. 3 Curve of the intensity distribution of TEM<sub>00</sub> beams that passed through the phase step in different propagation distance

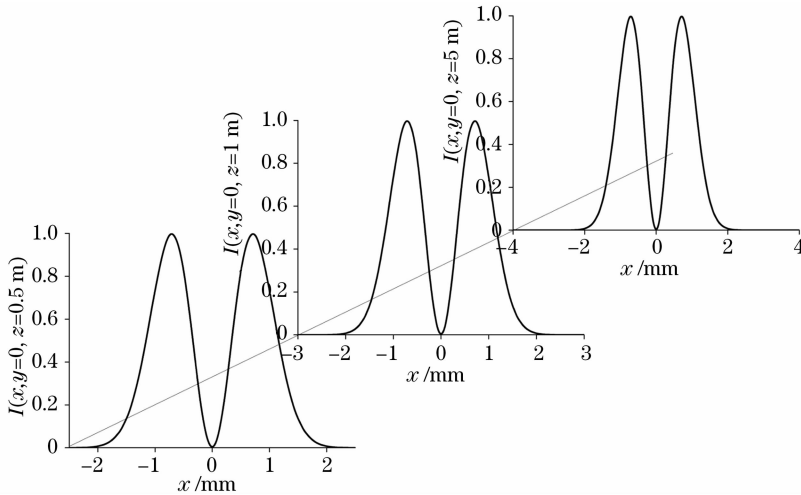


图4 TEM<sub>01</sub>模光束经自由空间传输后在不同传输距离下的光强分布曲线

Fig. 4 Curve of the intensity distribution of TEM<sub>01</sub> beams in different propagation distance that propagated through the free space

$$E(x_z, y_z, z) = -\frac{ik \exp(ikz)}{2\pi z} E_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2}\right) \tau(x, y) \exp\left[-ik \frac{(x_z - x)^2 + (y_z - y)^2}{2z}\right] dx dy, \quad (6)$$

由(6)式可知，TEM<sub>00</sub>模光束经过相位板之后其横向场分布是跟传输距离  $z$  有关的，因此通过相位跃变器要想实现较理想的 TEM<sub>01</sub> 与 TEM<sub>10</sub> 模光束，需对传输距离做出选择。

从图3与图4的比较中也能看出，由相位跃变器转化而来的近似 TEM<sub>01</sub> 模光束只有当传输距离大于某一值时，光束的光强分布才接近于 TEM<sub>01</sub> 模光束。从图中可看出，只有传输距离为 5 m 时由 TEM<sub>00</sub> 模光束转化而来的 TEM<sub>01</sub> 模光束才最接近于实际的 TEM<sub>01</sub> 模光束。

### 3 实验装置与实验分析

#### 3.1 实验装置

采用马赫-曾德尔干涉仪对用图2所示的相位跃变器得到的近似 TEM<sub>01</sub> 与 TEM<sub>10</sub> 模光束进行相干叠加得到径向偏振光，其光路如图5所示。图5中 P 为偏振片，T 为望远镜系统，PBS 为 5:5 分束器，G 为  $\lambda/2$  波片，PS 为相位跃变器， $\ominus$  为偏振方向在水平方向上； $\otimes$  为偏振方向垂直于水平面，向下； $\odot$  为偏振方向垂直于水平面，向上。

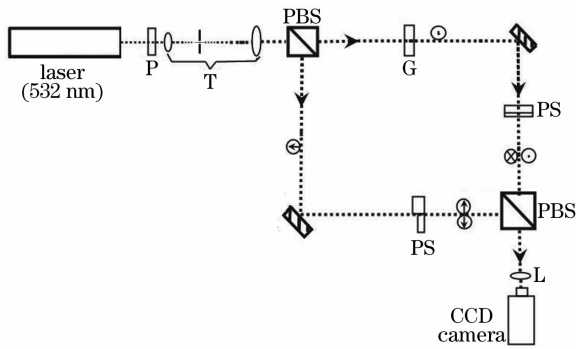


图 5 马赫-曾德尔干涉仪实现相干叠加产生径向偏振光  
Fig. 5 Coherent superposition to generate radially polarized light beam by Mach-Zehnder interferometer

入射光束在经过偏振片与望远镜系统后,得到线偏振的  $TEM_{00}$  模光束,而在经过第一个分束器后,  $TEM_{00}$  模光束分成两路偏振方向相同的线偏振  $TEM_{00}$  模光束;由于  $\lambda/2$  波片的作用,两路线偏振  $TEM_{00}$  模光束在入射到相位跃变器时,其偏振方向是正交的,如光路图中所示,一路偏振方向在水平面上,一路偏振方向垂直于水平面;偏振正交的两束  $TEM_{00}$  模光束分别通过相位跃变器,而相位跃变器的跃变边分别与入射光束的偏振方向平行,且光束是垂直入射

到相位跃变器上的。最后,两路由相位跃变器得到的  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束,经第二个分束器相干叠加得到径向偏振光。实验中用 CCD 相机对得到的光斑以及出射光束进行检验。

相干叠加在本实验中是很重要的,在理论分析中对  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束的描述只给出了横向的场振幅分布,而对其相位因子进行了省略,这种省略在研究光束横向场传输变化中是正确的。但由波动光学可知,光的叠加有相干与非相干叠加,而在用电场对光束叠加进行描述时,对进行叠加的两光束的相干性是有要求的,在同时省略掉相位因子的前提下,只有保证两路光束的相干性才能确保理论对场叠加描述的正确性,因此在本实验中要求相叠加的两束  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束必须是相干的。首先调整好马赫-曾德尔干涉光路,即先去掉  $\lambda/2$  波片与相位跃变器,在调出清晰的干涉条纹后放入  $\lambda/2$  波片,旋转波片可看到干涉条纹的可见度在发生变化。当干涉条纹消失时即两路光束是相干的,但由于偏振方向的正交性使得干涉条纹消失;最后,在两路相干而不干涉的光束中分别放入相位跃变器,则可得到两束相干的  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束的叠加。

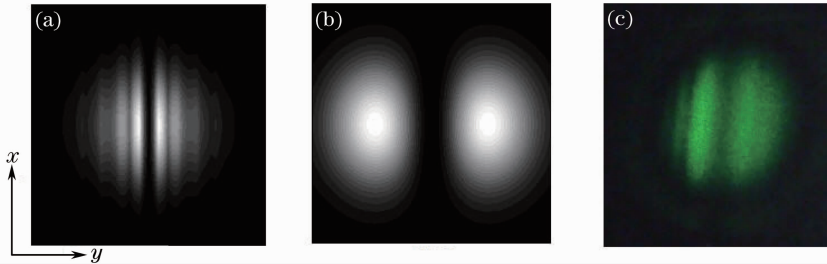


图 6  $TEM_{10}$  模光束的光强分布。(a) 理论上通过相位跃变器后所得到的  $TEM_{10}$  模光束,传输距离为 0.5 m; (b)  $TEM_{10}$  模光束; (c) 实验上所得的  $TEM_{10}$  模光束,传输距离为 0.5 m

Fig. 6 Intensity distribution of  $TEM_{10}$  beams. (a) Intensity distribution of  $TEM_{00}$  beams that passed through the phase step in 0.5 m; (b) intensity distribution of  $TEM_{10}$  beams in theory; (c) intensity distribution of  $TEM_{10}$  beams in experiment, the propagation distance is 0.5 m

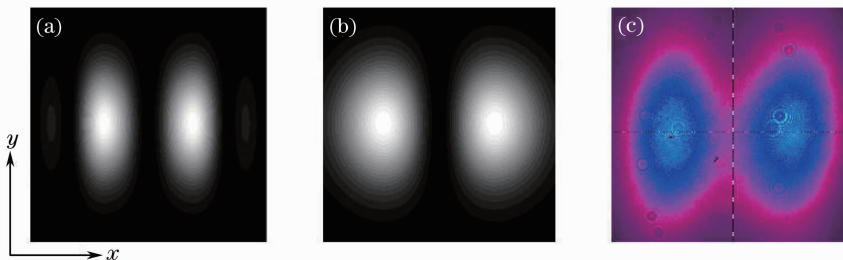


图 7  $TEM_{10}$  模光束的光强分布。(a) 理论上通过相位跃变器后所得到的  $TEM_{10}$  模光束,传输距离为 10 m; (b)  $TEM_{10}$  模光束; (c) 实验上所得的  $TEM_{10}$  模光束,传输距离为 10 m

Fig. 7 Intensity distribution of  $TEM_{10}$  beams. (a) Intensity distribution of  $TEM_{00}$  beams that passed through the phase step in 10 m; (b) intensity distribution of  $TEM_{10}$  beams in theory; (c) intensity distribution of  $TEM_{10}$  beams in experiment, the propagation distance is 10 m

### 3.2 实验结果与分析

图 6 与图 7 是  $TEM_{10}$  模光束的光强比较,可以看出,由相位跃变器产生近似  $TEM_{10}$  模光束时存在一个传输距离的选择问题,即欲使近似  $TEM_{10}$  模光束的光强分布更加符合实际的  $TEM_{10}$  模光束,传输距离存在一个最小值,当大于这个值时近似的  $TEM_{10}$  模光束更加符合实际的  $TEM_{10}$  模光束的光强分布。这一结论与图 3、图 4 比较所得的结论相同。比较图 6 与图 7(a),图 7(c)可知,通过相位跃变器后所得到的近似  $TEM_{10}$  或  $TEM_{01}$  模光束实验

与理论结果基本吻合。

图 8 与 9 是不同传输距离下径向偏振光的光强分布比较,可以看出,实现径向偏振光传输距离是有要求的,只有当大于某一值时才能符合径向偏振光的光强分布。图 8 与图 9(a),(c)也基本吻合。

图 10 是叠加后的光束通过偏振片后的光强分布,图中箭头表示了偏振片的起偏方向,而通过偏振片的检验也可以得出结论,就是实验上所得到的空心光束确实是径向偏振光。

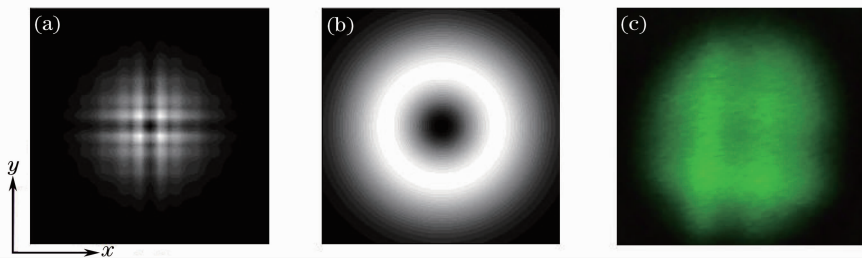


图 8 径向偏振光的光强分布。(a) 理论上通过相位跃变器得到的径向偏振光,传输距离为 0.5 m; (b)  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束叠加后的径向偏振光; (c) 实验上所得的径向偏振光,传输距离为 0.5 m

Fig. 8 Intensity distribution of the radially polarization beam. (a) Intensity distribution of the radially polarization beam that got by use of phase step in theory, propagation distance is 0.5 m; (b) intensity distribution of the radially polarization beam that got by use of the superposition of  $TEM_{01}$  and  $TEM_{10}$  beam in theory; (c) intensity distribution of the radially polarization beam in experiment, the propagation distance is 0.5 m

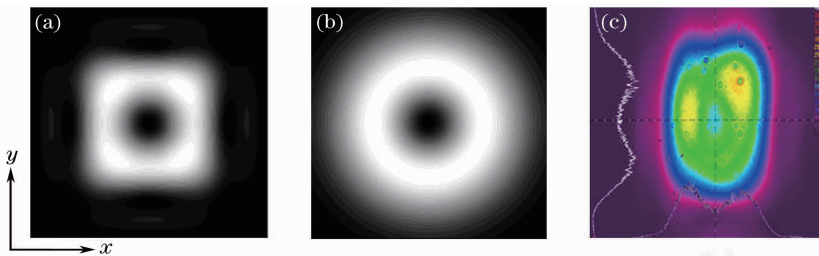


图 9 径向偏振光的光强分布。(a) 理论上通过相位跃变器得到的径向偏振光,传输距离为 10 m; (b)  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束叠加后的径向偏振光; (c) 实验上所得的径向偏振光,传输距离为 10 m

Fig. 9 Intensity distribution of the radially polarization beam. (a) Intensity distribution of the radially polarization beam that got by use of phase step in theory, propagation distance is 10 m; (b) intensity distribution of the radially polarization beam that got by use of the superposition of  $TEM_{01}$  and  $TEM_{10}$  beam in theory; (c) intensity distribution of the radially polarization beam in experiment, the propagation distance is 10 m

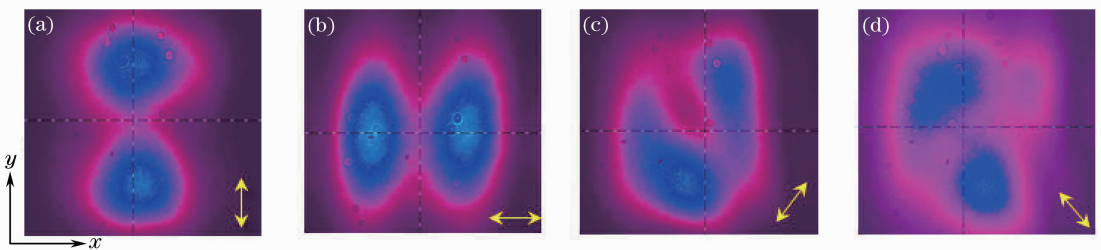


图 10 实验上所获得的径向偏振光通过偏振片后的光强分布,箭头为偏振片的偏振方向

Fig. 10 Intensity distribution of experimental light spot of radially polarized beam after passing polarizers, the arrow indicates the polarize direction of polarizers

## 4 结 论

从理论与实验上对线偏振的高斯光束转变为空心的径向偏振光进行了研究。在理论上采用标量衍射积分的方法对产生  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束进行计算模拟,指出由相位跃变器产生的  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束与光束的传输距离有关,为实验上产生径向偏振光提供指导,即在获得径向偏振光时对光束的传输距离要有一定的要求。在实验上用相位跃变器以及马赫-曾德尔干涉仪,实现了从  $TEM_{00}$  到近似的  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束的转化,并最终通过  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  相干叠加模光束得到径向偏振光束。

由于灰尘的影响,在光斑上出现了一点点的杂斑,影响了所得到的径向偏振光的光束质量。又由于相干叠加产生的径向偏振光的传输距离不够远,以及两路近似的  $TEM_{01}$  与  $TEM_{10}$  模光束传输的距离不是确切相等,因此实验光斑与理论光斑存在一些差异,既空心处并没完全空,通过偏振片后理论上的消光处并没有完全消光。

## 参 考 文 献

- 1 S. Quabis, R. Dorn, M. Eberler *et al.*. The focus of light—theoretical calculation and experimental tomographic reconstruction[J]. *Appl. Phys. B*, 2001, **72**: 109~113
- 2 R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs. Sharper focus for a radially polarized light beam[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**: 233901-1~233901-3
- 3 C. Varin, M. Piche. Acceleration of ultra-relativistic electrons using high-intensity  $TM_{01}$  laser beams[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **74**: s83~s88
- 4 Y. I. Salamin. Acceleration in vacuum of bare nuclei by tightly focused radially polarized laser light[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**: 3462~3464
- 5 T. Kuga, Y. Torii, N. Shiokawa *et al.*. Novel optical trap of atoms with a doughnut beam[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(25): 4713~4717
- 6 K. T. Gahagan, G. A. Swartzlander. Simultaneous trapping of low-index and high-index microparticles observed with an optical-vortex trap[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**: 533~537
- 7 L. Novotny, M. R. Beversluis, K. S. Youngworth *et al.*. Longitudinal field modes probed by single molecules[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(23): 5251~5255
- 8 A. V. Nesterov, V. G. Niziev. Laser beams with axially symmetric polarization[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2000, **33**: 1817~1822
- 9 V. G. Niziev, A. V. Nesterov. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1999, **32**: 1455~1461
- 10 Y. Kozawa, S. Sato. Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(22): 3063~3065
- 11 G. Machavariani, Y. Lumer, I. Moshe *et al.*. Spatially-variable retardation plate for efficient generation of radially- and azimuthally-polarized beams[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**: 732~738
- 12 N. Passilly, R. S. Denis, K. Ait-Ameur. Simple interferometric technique for generation of a radially polarized light beam[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(5): 984~991
- 13 H. Kogelnik, T. Li. Laser beams and resonator[J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(10): 1550~1567