

文章编号:1004-4213(2010)08-1487-4

晶体锥折射空心光束的位相差及偏振特性

武志超, 董渊, 梁柱

(长春理工大学 理学院 激光技术研究所, 长春 130022)

摘要:根据双轴晶体内锥折射效应产生空心光环的基本原理, 推导出空心光环上各点相对于光环最低点的位相差分布规律解析式. 通过模拟得到了位相差分布规律, 证明了光环上各点的偏振方向变化具有连续性. 实验采用非偏振的 He-Ne 激光准直后经小孔光阑垂直照射 KNbO₃ 晶体获得了空心光束, 对其偏振特性进行了测试, 结果与理论分析相吻合, 很好的验证了理论分析的正确性.

关键词:双轴晶体; 位相差分布; 锥折射; 空心光环; 偏振特性

中图分类号: O734

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103908.1487

0 引言

近年来, 随着空心光束的应用领域越来越广泛^[1-3], 国内外已经在实验上获得了多种产生空心光束的方法, 如横模选择法、几何光学法、光学全息法和旋转棱镜法^[4-9]. 然而, 利用双轴晶体的锥折射效应产生空心光束的方法, 自哈密顿提出锥面折射现象之后的近 170 年里, 国内几乎没有进行过深入的理论与应用研究, 直到 1997 年, 宁国斌、梁柱等人利用双轴晶体获得了空心光束并拓宽了其应用领域^[10-11]. 国外也是近些年才越来越多的关注这方面的研究^[12-14].

本文根据双轴晶体内锥折射效应产生空心光束的基本原理及空心光束的各种变量几何关系, 首次分析了空心光束的位相差分布规律, 也证明了光环上各点的偏振方向变化具有一定的规律性. 通过对空心光束上各点偏振特性的实验测试, 很好的验证了理论分析的正确性, 这将为进一步研究空间偏振扫描定位技术提供理论依据.

1 空心光束的位相差及偏振特性分析

1.1 内锥折射空心光束产生的原理

一束很窄的非偏振平行光从各向同性介质垂直入射到晶片上, 并且与晶体中一个光轴 k 重合, 这时, 在晶体中传播的波矢方向沿着光轴方向与电位移矢量的偏振方向无关, 但是光线的传播方向 S 与电矢量的偏振方向有关. 由于入射光波由许多电矢量沿着不同方向的平面波组成, 因此, 电矢量方向不同的光波, 光线的传播方向也不同, 这些光线分布在

一个锥面上. 最终, 从晶体中透射出来的光将形成一个空心圆筒, 称为内锥折射, 如图 1.

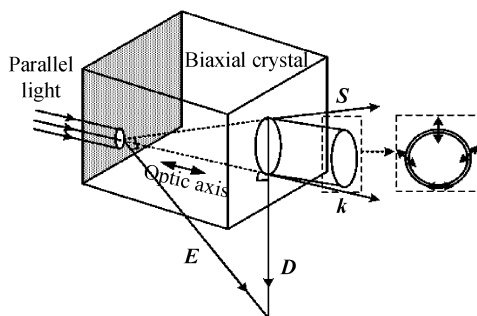


图 1 双轴晶体内锥形折射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of conical refraction effect in biaxial crystal

1.2 空心光束位相差分布的理论计算

双轴晶体产生的空心光束位相差分布的各种变量几何关系如图 2.

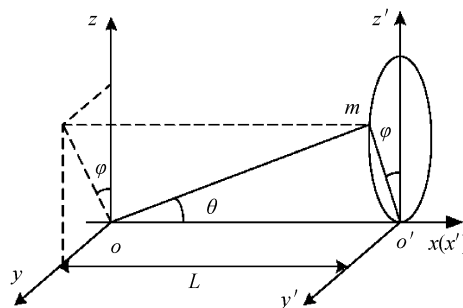


图 2 空心光束位相差计算原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the computing principle distribution of phase difference of hollow beams

设 $yo z$ 面为双轴晶体的左端面, $y'o'z'$ 面为双轴晶体的右端面, 且两面的间距为 L , 即双轴晶体的通光长度为 L .

根据双轴晶体内锥孔径角公式

$$\tan \theta_{\max} = \sqrt{(n_z^2 - n_y^2)(n_y^2 - n_x^2)} / n_x n_z \quad (1)$$

在不考虑光环宽度的前提下, 由双轴晶体内锥

折射所产生的锥面激光在出射面(即上图中的 $y'o'z'$ 面)内的空心光束的直径为

$$D = L \tan \theta_{\max} = \frac{\sqrt{(n_z^2 - n_y^2)(n_y^2 - n_x^2)}}{n_x n_z} L \quad (2)$$

以波矢方向 om 为研究对象, m 为出射端面光环上的任一点. 令 m 点的坐标为 $m(x, y, z)$, 波矢方向 om 与光轴 x 的夹角为 θ , 在 yoz 面上的投影与 z 轴的夹角为 φ . 根据图 2 中的几何关系有

$$\begin{cases} z = D \cos^2 \varphi \\ y = D \cos \varphi \sin \varphi \\ x = L \end{cases} \quad (3)$$

则

$$om = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{D^2 \cos^2 \varphi + L^2} \quad (4)$$

$$\theta = \arctan \sqrt{z^2 + y^2} / L = D \cos \varphi / L \quad (5)$$

于是, 在光环上 m 点与 o' 点的位相差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (|om| n_m - |oo'| n_x) \quad (6)$$

式中 n_m 为与 x 轴成 θ 角的 om 方向的折射率, 可由式(7)~(9)求出.

双轴晶体中波矢方向为 (θ, φ) 的光波的折射率为^[15]

$$n(\omega) = \left(\frac{2}{-B + \sqrt{B^2 - 4C}} \right)^{1/2} \quad (7)$$

$$B = -\sin^2 \theta \cos^2 \varphi [n_y^{-2}(\omega) + n_z^{-2}(\omega)] - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi [n_x^{-2}(\omega) + n_z^{-2}(\omega)] - \cos^2 \theta [n_y^{-2}(\omega) + n_x^{-2}(\omega)] \quad (8)$$

$$C = \sin^2 \theta \cos^2 \varphi n_y^{-2}(\omega) n_z^{-2}(\omega) + \sin^2 \theta \sin^2 \varphi n_x^{-2}(\omega) (\omega) n_z^{-2}(\omega) + \cos^2 \theta n_y^{-2}(\omega) n_x^{-2}(\omega) \quad (9)$$

式中 θ 为波矢 k 与光轴的夹角, φ 为波矢 k 在 yoz 面上的投影与 z 轴的夹角.

综上, 可以得到在光环上 m 点与 o' 点的位相差表达式为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_m \sqrt{D^2 \cos^2 \varphi + L^2} - n_x L) \quad (10)$$

对于给定的某种双轴晶体(即已知 n_x, n_y, n_z)及其通光长度 L , 能够通过式(10)确定锥环上各点相对于光环与 x 轴交点的位相差分布.

1.3 空心光束的位相差分布计算模拟及其偏振特性分析

采用非偏振的 He-Ne 激光垂直照射 KNbO₃ 晶体, 已知该晶体主轴折射率分别为: $n_x = 2.16, n_y = 2.28, n_z = 2.32$. 根据式(10)可以得到不同通光长度晶体所产生的空心光束的位相差分布规律如图 3, 对应图 3 的光程差分布规律如图 4.

结合图 2、图 3 可以发现, 空心光束的左半部分

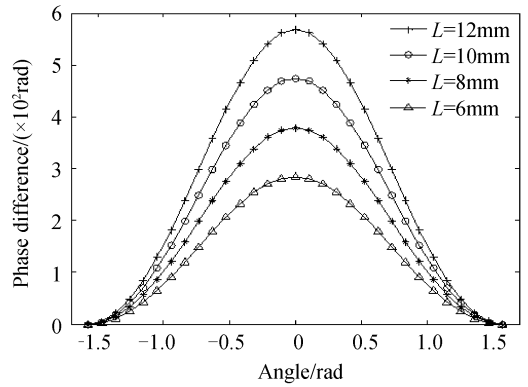


图 3 空心光环的位相差分布规律
Fig. 3 The distribution regularity of phase difference in the hollow ring

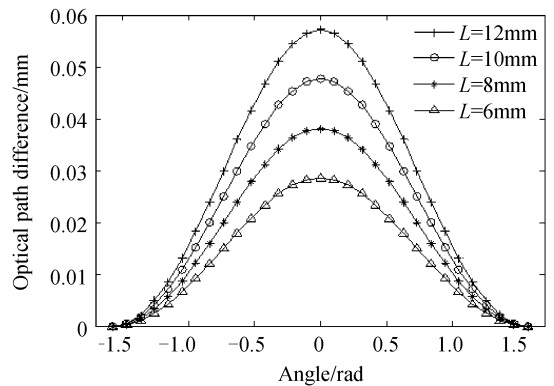


图 4 空心光环的光程差分布规律
Fig. 4 The distribution regularity of optical path difference in the hollow ring

($0 \leq \varphi \leq \pi/2$) 和右半部分 ($-\pi/2 \leq \varphi \leq 0$) 相对于空心光环上的最低点 o' 点的位相差关于 z 轴对称; 而且位相差分布随着 φ 角的绝对值增加都呈现出减小的规律, 在 $\varphi=0$ 值处出现峰值, 此时该两点间距为双轴晶体锥光折射空心光环的直径; 在 $\varphi = \pm \pi/2$ 值处, $\theta=0$, 位相差为 0. 当 φ 值从 $-\pi/2$ 到 $\pi/2$ 变化一个周期时, 空心光束的位相差分布也连续变化一个周期. 此时, 由图 4 得到, 对应的光程差也变化一个周期, 最大光程差随着晶体通光长度的增加而增加, 并且光程差分布关于 z 轴对称.

光环上光点的偏振特性可根据参考文献[16]来推知, 如图 5.

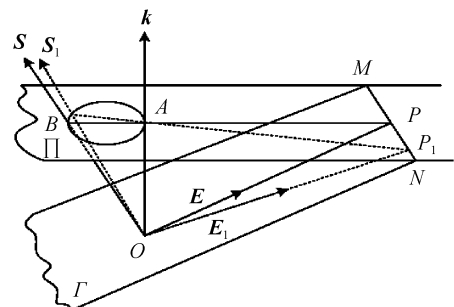


图 5 空心光环中各矢量示意图
Fig. 5 Schematic diagram of vectors in the hollow ring

图中矢量 S, k, E 必定在同一平面内, 且 $S \perp E$, E 的方向与空心光环上的点是一一对应的, 光环上不同的点对应着直线 MN 上不同的 P 点, 同时对应着不同的 E 的方向, 当光环上光点沿光环运动一个空间周期时, 相对应的各点的电场方向也发生连续变化, 也可以说空心光环上各点的偏振方向变化具有连续性.

2 实验结果与分析

采用非偏振的 He-Ne 激光准直后经小孔光阑垂直照射 $KNbO_3$ 晶体, 光阑的孔径为 0.5 mm, 且 $KNbO_3$ 晶体的光轴方向与入射的激光同向, 经双轴晶体内锥折射后在该晶体的后表面得到的空心光环如图 6.

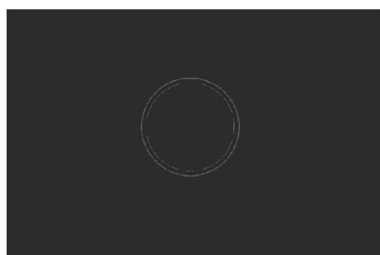


图 6 双轴晶体内锥折射后的空心光环
Fig. 6 Hollow ring by conical refraction effect in biaxial crystal

为了检测光环上各点光的偏振方向, 实验受到条件所限, 只能在现有器件基础上, 采用简单的装置加以验证, 如图 7.

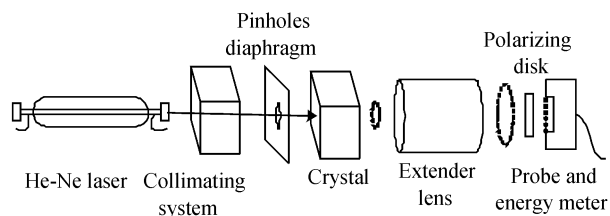


图 7 实验装置示意图
Fig. 7 Schematic diagram of experimental facilities

实验采用的关键器件是偏振片. 放置偏振片使其光轴方向与光环最低点的偏振方向相同, 用针孔探头的能量计接收光强, 此时透光光强最大, 沿左半圆光环平移偏振片, 发现光强由强变弱, 当平移到光环顶点时, 接收器接收不到光强. 偏振片沿光环右半圆继续平移到光环底部, 光强又由弱变到强, 通过这种现象可以初步验证光环上各点光的偏振方向具有连续性, 设光环顶点为原点, 以光环上最高点沿直径向最低点运动的方向为正方向, 得到的实验结果如图 8.

为了进一步验证光环上各点的偏振方向变化具有连续性, 本文把偏振片不仅平移而且同时旋转一定角度, 发现光环上各点总会找到光强最大值, 而且

随着

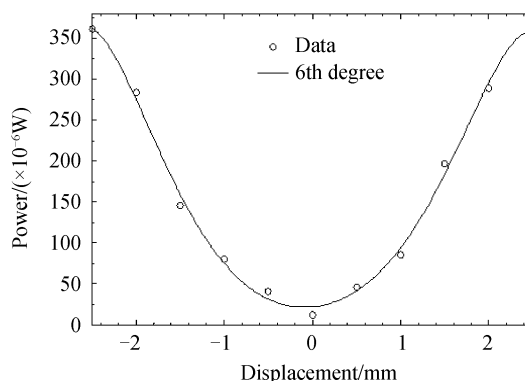


图 8 位移与功率的关系图
Fig. 8 Relationship between displacement and power

光环上探测点的依次改变, 偏振片发生同方向连续转动. 偏振片的位移与其旋转角度的关系如图 9 (坐标系的建立与图 8 同), 因此验证了光环上各点的偏振方向变化具有连续性. 实验结论与前文的理论分析结果完全吻合.

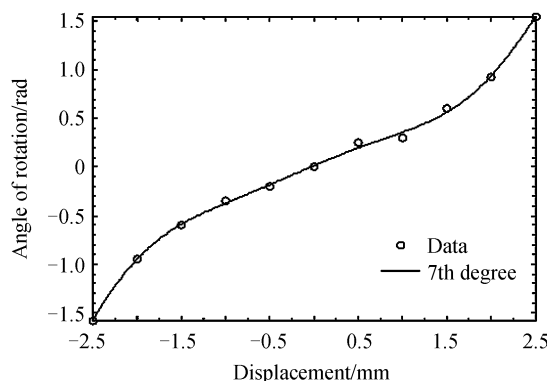


图 9 位移与旋转角度关系
Fig. 9 Relationship between displacement and angle of rotation

3 结论

本文推导出了空心光环上各点相对于光环最低点的位相差分布规律解析式. 通过计算模拟得出位相差分布具有轴对称性, 在空心光环的左、右半圆, 位相差随着 φ 角的绝对值增加都呈现出减小的现象. 而且, 空心光环上各点的偏振方向变化具有连续性, 以上结论与实验现象完全吻合. 本文为空间偏振扫描定位技术研究提供了理论依据, 随着偏振光复眼接收器的进一步完善, 利用双轴晶体内锥折射所获得的空心光束实现空间偏振扫描定位技术成为了可能.

参考文献

[1] GRIER D G. A revolution in optical manipulation [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 810-816.
[2] MACDONALD M P, PATERSON L, VOLKE-SEPULVEDA K, *et al.* Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures[J]. *Science*, 2002, **296**(1101): 1101-1103.

- [3] YIN Jian-ping, LIU Nan-chun, XIA Yong, *et al.* Generation of hollow laser beams and their applications in modern optics [J]. *Progress in Physics*, 2004, **24**(3): 337-380.
- [4] WANG X, LITTMAN M G. Laser cavity for generation of variable - radius rings of light[J]. *Opt Lett*, 1993, **18**(10): 767-768.
- [5] CACCIAPUOTI L, De ANGELIS M, PIERATTINI G, *et al.* Single-beam optical bottle for cold atoms using a conical lens [J]. *Eur Phys J*, 2001, **D14**(3): 373-376.
- [6] LEE H S, STEWART B W, CHOI K, *et al.* Holographic nondiverging hollow beam[J]. *Phys Rev A*, 1994, **49**(6): 4922-4927.
- [7] PATERSON C, SMITH R. High-order Bessel waves produced by axicon-type computer-generated holograms [J]. *Opt Commun*, 1996, **124**(1): 121-130.
- [8] OZERI R, KHAYKOVICH L, FRIDMAN N, *et al.* Large-volume single-beam dark optical trap for atoms using binary phase elements[J]. *JOSA B*, 2000, **17**(7): 1113-1116.
- [9] ARLT J, PADGETT M J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity; the optical bottle beam[J]. *Opt Lett*, 2000, **25**(4): 191-193.
- [10] NING G B, LIANG Z. Dynamic laser outer conical refraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10): 1399-1403.
- [11] NING Guo-bin, LIANG Zhu. Conic scanning of biaxial crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(12): 1704-1706.
- [12] BERRY. Conical diffraction asymptotics; fine structure of Poggendorff rings and axial spike[J]. *J Opt A Pure Appl Opt*, 2004, **6**(4): 289-300.
- [13] BERRY V, JEFFREY M R. Conical diffraction; Hamilton's diabolical point at the heart of crystal optics[J]. *Prog Opt*, 2007, **50**: 13-50.
- [14] BERRY V, JEFFREY M R, LUNNEY J G. Conical diffraction; Observations and theory[J]. *Proc R Soc A*, 2006, **462**(2070): 1629-1642.
- [15] YAO Jian-quan, XU De-gang. All solid state laser and nonlinear optical frequency conversion technology [M]. 姚建铨,徐德刚.全固态激光及非线性光学频率变换技术[M].北京:科学出版社,2007:664.
- [16] LIANG Zhu. Course of theory of optics [M]. Beijing: Beihang University Press, 2005: 48-50. 梁柱.学原理教程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005:48-50.

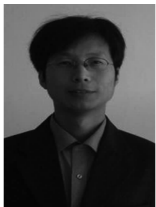
Phase Difference and Polarization Characteristic of Hollow Beams Achieved by Conical Refraction Effect

WU Zhi-chao, DONG Yuan, LIANG Zhu

(Laser Technology Institute, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on the principle of hollow ring achieved by conical refraction effect in biaxial crystal, the formula of phase difference distribution between every point and the minimal point in the hollow ring are deduced, and the regularity of phase difference distribution is obtained by means of simulations. The continuity in the circumference of polarization direction variation of each point in the hollow ring is proved. In the experiment, un-polarized He-Ne laser is adopted to perpendicular radiate KNbO₃ crystal, then polarization characteristic of hollow beams achieved by conical refraction effect in biaxial crystal is tested. The result of theoretical analysis agrees well with experiment.

Key words: Biaxial crystal; Distribution of phase difference; Conical refraction; Hollow ring; Polarization properties



WU Zhi-chao was born in 1979. He is pursuing the Ph. D. degree, and his research interests focus on laser technology and application.



LIANG Zhu was born in 1938. Now he is a professor, and his research interests focus on laser theory, technology and application.