

文章编号: 0258-7025(2008)07-1063-05

杨氏双缝干涉实验测量涡旋光束的轨道角动量

陈子阳 张国文 饶连周 蒲继雄

(华侨大学电子科学与技术系, 福建 泉州 362021)

摘要 研究了平面波经过螺旋型相位板后产生的涡旋光束,经双缝干涉后在干涉场中干涉条纹的分布情况。详细介绍了涡旋光束的拓扑荷数对干涉条纹分布的影响。发现同平面波的竖直干涉条纹相比较,涡旋光束的干涉条纹,从顶部向底部看去,沿着横向出现移动,并且移动的大小和方向与拓扑荷数的取值有关。通过观测干涉条纹,可以得到涡旋光束的拓扑荷数。涡旋光束由于携带轨道角动量可应用于新型的光信息编码与传输,研究结果可望在这种新型的光信息编码与传输中得到应用。

关键词 物理光学;涡旋光束;杨氏双缝干涉实验;拓扑荷数;干涉条纹

中图分类号 O 436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083507.1063

Determining the Orbital Angular Momentum of Vortex Beam by Young's Double-Slit Interference Experiment

Chen Ziyang Zhang Guowen Rao Lianzhou Pu Jixiong

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

Abstract The distribution of interference pattern in Young's double-slit experiment of vortex beam, which was generated by passing a plane beam through a spiral phase plate, was investigated. It is found that topological charge of vortex beam influences the interference pattern, i. e., by compared with the straight interference pattern of plane wave, the interference pattern of vortex beam is shifted in the transverse direction as we look from the top of the interference to the bottom, and the magnitude and direction of shift are related to the topological charge. The topological charge of vortex beam can be derived from the interference pattern. Vortex beams carrying orbital angular momentum may find applications in information encoding and transmission. Therefore our research results may be applied to this new kind of information encoding and transmission.

Key words physical optics; vortex beam; Young's double-slit interference experiment; topological charge; interference pattern

1 引 言

涡旋光束由于其独特的物理性质和应用领域,引起了研究人员的广泛关注^[1~3],许多研究小组对这种光束的产生、传输特性及潜在的应用进行了大量的研究^[4~7]。由于涡旋光束带有轨道角动量^[2],因此在量子信息处理^[8,9]、粒子囚禁与操纵^[3,10]等领域都有潜在的应用。Allen等^[2]指出拉盖尔-高斯光束带有由 $\exp(i l \theta)$ 描述的螺旋型相位分布,能使光

子带上 $l\hbar$ 的轨道角动量。其中 l 为拓扑荷数,描述了绕涡旋点一周的相位变化,是涡旋光束的一个关键参数,对拓扑荷数的测定具有很重要的意义。Gibson等^[11]研究了利用涡旋光束的轨道角动量进行信息传输的可能性,并进行了相关的实验,研究结果表明利用轨道角动量进行信息编码具有更高的保密性。

杨氏双缝干涉实验是物理学中最重要最基本的

收稿日期:2007-09-01;收到修改稿日期:2007-11-02

基金项目:国家自然科学基金(60477041),福建省科技计划重点项目(2007H0027)和福建省自然科学基金(2006J0237)资助课题。

作者简介:陈子阳(1983—),男,福建人,硕士研究生,主要从事激光与光电子学方面的研究。E-mail:ajiamchen@126.com

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

E-mail:jixiong@hqu.edu.cn (通信作者)

实验之一,在物理光学以及原子物理中有着广泛的应用^[12,13]。近年来,研究人员对杨氏双缝干涉实验的干涉条纹进行了深入的研究^[14,15]。然而到目前为止,对于涡旋光束经过杨氏双缝干涉后,干涉条纹的变化情况还没有系统的研究。本文研究了涡旋光束经双缝干涉后,在干涉场中的干涉条纹。

2 理论模型

涡旋光束的获得可以让单色平面波通过一个螺旋型相位板来实现。螺旋型相位板的作用可以使入射光斑产生一个随方位角变化的相位延迟。图1所示为一螺旋型相位板,沿着方位角转过 2π (一个周期)的高度差 s ,可表示为 $s = (n-1)l$,其中 n 为相位板的折射率, λ 为入射光的波长, l 为涡旋光束的拓扑荷数。

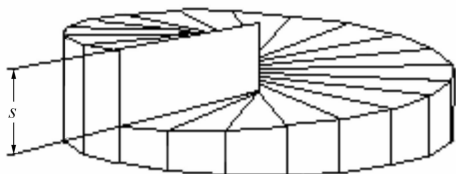


图1 折射率为 n 的螺旋型相位板

Fig. 1 A spiral phase plate of refractive index n

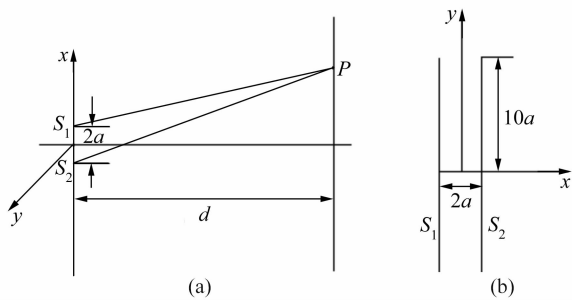


图2 (a) 杨氏双缝干涉实验示意图；

(b) 双缝结构示意图

Fig. 2 (a) Schematic of Young's double-slit interference experiment; (b) structure of double slit

图2所示为杨氏双缝干涉实验示意图。其中双缝之间的间距为 $2a$,双缝所在平面为 $x-y$ 平面,与观察屏之间的距离为 d ,如图2(a)所示。双缝的长度为 $20a$,如图2(b)所示。

当平面波照射到一个标准的双缝上,观察屏上的光强分布为^[16]

$$I(x) \propto \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \propto \cos^2\left(\frac{\pi 2ax}{\lambda d}\right), \quad (1)$$

式中 δ 为双缝 S_2 和 S_1 到达 P 点的相位差。

现在考虑一束平面波经过一个螺旋型相位板后

所得到的涡旋光束照射到双缝的情况。假定涡旋光束的奇点落在双缝的中心位置处。由于这时候的波前分布不再是一个平面,而是一个螺旋型分布,因此双缝平面处两个缝之间还有一个附加的相位差

$$\Delta\phi(y) = \phi_2(y) - \phi_1(y),$$

式中 $\phi_1(y)$, $\phi_2(y)$ 分别为双缝 S_1 和 S_2 的相位。此时,观察屏上光强的分布为^[14]

$$I(x,y) \propto \cos^2\left[\frac{\delta}{2} + \frac{\Delta\phi(y)}{2}\right] \propto \cos^2\left[\frac{\pi 2ax}{\lambda d} + \frac{\Delta\phi(y)}{2}\right]. \quad (2)$$

3 数值模拟及实验观察

在数值模拟计算中,选择: $a = 0.01$ m, $d = 1$ m, $\lambda = 632.8$ nm。首先考虑拓扑荷数 $l = 0$,即平面波直接照射到双缝,而不经螺旋型相位板的情况。这时入射到双缝上的波前分布仍然是一个平面。图3中所示的即为拓扑荷数 $l = 0$ 的光束,经双缝干涉后,在观察屏上的干涉条纹。从图中可以看出,干涉条纹是一系列相互平行成亮暗间隔分布的直线。

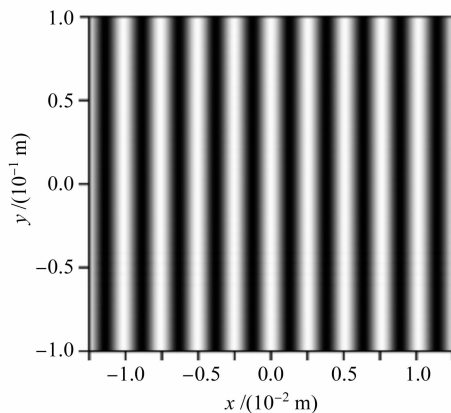


图3 平面波杨氏双缝干涉实验的干涉条纹

Fig. 3 Interference pattern of Young's double-slit interference experiment with plane wave

对于拓扑荷数 $l = +1$ 时的涡旋光束,沿着逆时针方向旋转一周,其垂直于传播方向的某一平面波前的相位分布将从 0 增加到 2π ,如图4(a)所示(黑色表示 0 ,白色表示 2π)。图4(b)中,画出了当 $l = +1$ 的涡旋光束照射在双缝上时,缝 S_1 和缝 S_2 的相位变化 $\phi_1(y)$ 和 $\phi_2(y)$,当 y 由 $10a$ 变化到 $-10a$ 时, ϕ_1 的取值由 0.03π 逐渐升至 0.97π ,而 ϕ_2 的取值则由 1.97π 降至 1.03π 。两个缝之间的附加相位差 $\Delta\phi(y) = \phi_2(y) - \phi_1(y)$,随着 y 由 $-10a$ 变化到 $10a$, $\Delta\phi(y)$ 由 0.06π 变化到 1.94π ,如图4(c)和图4(d)所示。

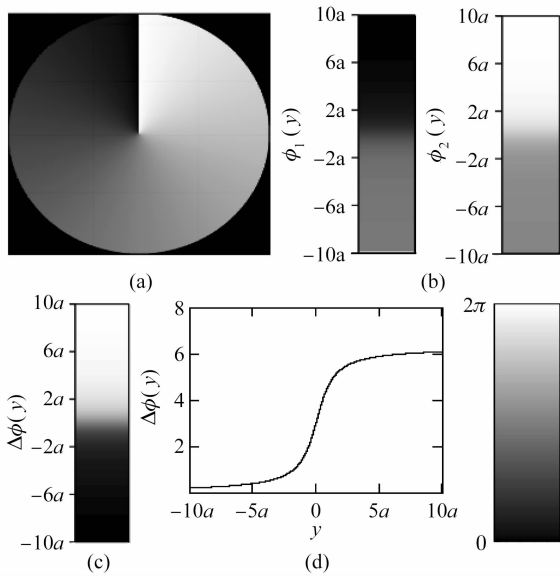


图 4 (a) 拓扑荷数 $l=+1$ 的涡旋光束的波前相位分布；
(b) 双缝处的相位变化；(c) 双缝间的相位差(灰度图)；(d) 双缝间相位差随 y 变化的曲线

Fig. 4 (a) Phase structure of wavefront of the vortex beam with $l=+1$; (b) the phase variation in slit; (c) the phase difference between two slits represented by grey scale; (d) the phase difference between two slits as a function of y

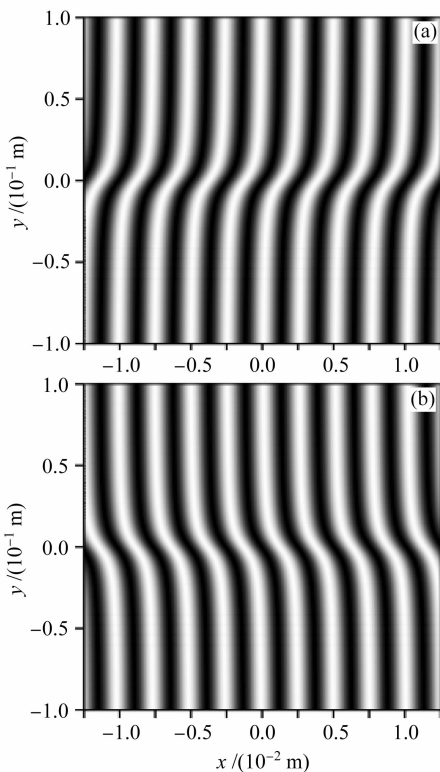


图 5 拓扑荷数为 1 的涡旋光束经杨氏双缝干涉后的干涉图样。(a) $l=+1$; (b) $l=-1$

Fig. 5 Interference pattern from vortex beam with $l=1$ incident on two slits (a) $l=+1$; (b) $l=-1$

图 5 中画出了当拓扑荷数分别为 $l=+1$ 和 $l=-1$ 时,在离双缝 $d=1$ m 处垂直于 z 轴的观察屏上的干涉条纹。其中图 5(a) 对应于 $l=+1$, 从图中可以看出, 对应于同一个 x 值, 当沿着 $-y$ 方向向 $+y$ 方向看去, 可以看到干涉条纹向 x 正方向移动了约一个条纹, 即在底部的亮条纹(或暗条纹)将大致对应于顶部其临近一级的亮条纹(或暗条纹), 但并不是完全对应的, 有一个小小的移动。这可以理解为当 y 由 $-10a$ 增加到 $10a$ 时, 双缝之间的相位差 $\Delta\phi(y)$ 大致由 0 增加到 2π , 而不再是一个常数(不带涡旋时), 从而使得干涉条纹不是平面波入射时的一系列平行的直线, 而是出现了相应的移动。其中的小移动可以理解为 $\Delta\phi(y)$ 并不是严格变化了 2π , 而是接近于 2π (如图 4(c) 和(d) 所示)。图 5(b) 对应于 $l=-1$ 时观察屏上的干涉条纹分布, 其规律和图 5(a) 基本上一样, 不同之处在于, 对应于同一个 x 值, 当沿着 $-y$ 方向向 $+y$ 方向看去, 可以看到干涉条纹向 x 负方向移动了一个条纹(与 $l=+1$ 相反)。这是由于双缝处的波前分布沿着逆时针方向转过一个周期, 其相位将由 2π 减小到 0, 因此相应的相位差 $\Delta\phi(y)$ 大致由 2π 减小到 0。

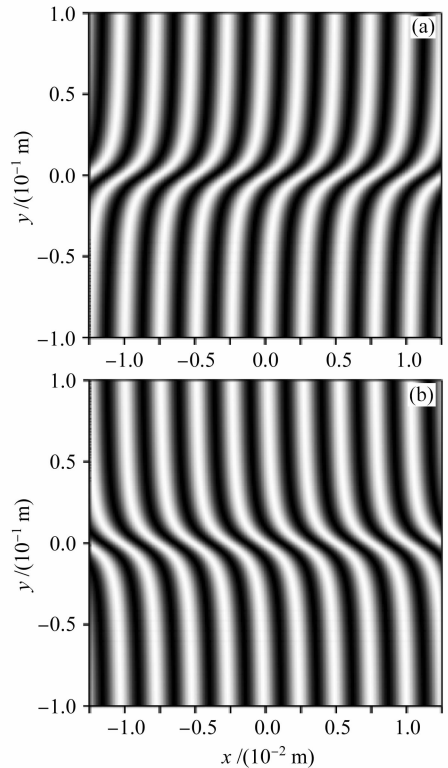


图 6 拓扑荷数为 2 的涡旋光束经杨氏双缝干涉后的干涉图样。(a) $l=+2$; (b) $l=-2$

Fig. 6 Interference pattern from vortex beam with $l=2$ incident on two slits (a) $l=+2$; (b) $l=-2$

图 6(a)和(b)分别画出了 $l=+2$ 和 $l=-2$ 时,观察屏上干涉条纹的分布情况,同图 5 比较,可以看出图 6 中条纹移动的幅度发生了变化。对应于同一个 x 值,当沿着 $-y$ 方向向 $+y$ 方向看去,可以看到干涉条纹向 x 正方向移动了约两个条纹,即在底部的亮条纹(或暗条纹)将大致对应于顶部其临近第二级的亮条纹(或暗条纹)。条纹移动的方向与拓扑荷数取值的符号有关。这可以认为是在双缝处的波前相位分布沿着逆时针方向绕一周,出现了两个周期的变化,因此双缝之间的附加相位差随着 y 取值的变化幅度也随之变大。

图 7(a)和(b)则分别对应于拓扑荷数取值 $l=+3$ 和 $l=-3$ 时观察屏上的干涉图样。从图中可以看出条纹移动的幅度随着拓扑荷数取值的增大而增大,增加到了三个条纹,即对应于同一个 x 值,在底部的亮条纹(或暗条纹)将大致对应于顶部其临近第三级的亮条纹(或暗条纹)。

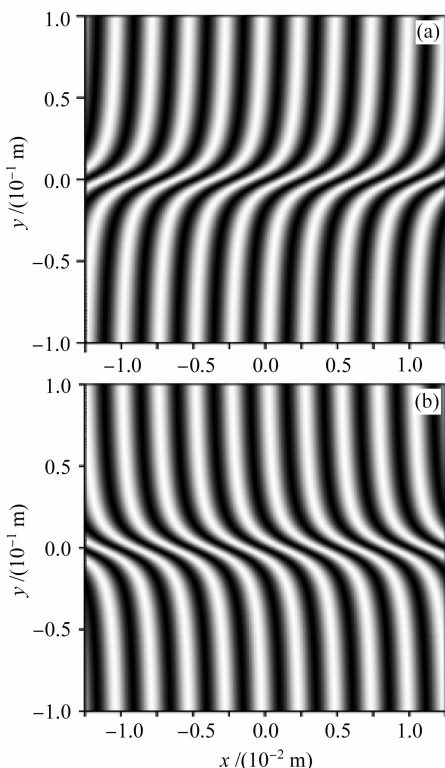


图 7 拓扑荷数为 3 的涡旋光束经杨氏双缝干涉后的干涉图样, (a) $l=+3$; (b) $l=-3$

Fig. 7 Interference pattern from vortex beam with $l=3$ incident on two slits (a) $l=+3$; (b) $l=-3$

从分析中可以看出,涡旋光束中拓扑荷数的取值,对涡旋光束经双缝干涉时所产生的干涉条纹产生显著的影响。当拓扑荷数取值为 $l=0$ 时,其干涉条纹是一系列互相平行的亮暗间隔的直条纹。而当

拓扑荷数取值是不为零的整数时,沿着平行于双缝的方向,可以看到条纹将出现一定量的移动。当 l 的取值分别为 $\pm 1, \pm 2, \pm 3$ 时,对于某一级条纹,随着 y 由观察屏的一端移动到另一端,其条纹将分别移动一个条纹、两个条纹和三个条纹,即在观察屏一端的亮条纹(或暗条纹)将对应于另一端与其临近的第一级、第二级、第三级的亮条纹(暗条纹)。并且其移动的方向取决于拓扑荷数 l 取值的正负号。因此,对于一个未知的拓扑荷数,可以通过观察干涉场的干涉条纹分布,得出拓扑荷数的取值。

在理想条件下,双缝无限接近且双缝缝宽可以忽略的情况下,当拓扑荷数取值为 1 时,从条纹上部到下部将沿着横向移动一个条纹,拓扑荷数为 2 时,将出现两个条纹的横向移动,以此类推。然而由于双缝不可能无限接近,且双缝的宽度不可能真正地无限小,因此实际条纹移动数不可能完全等于拓扑荷数的取值。但通过将相应的参数(如双缝的间距,观察屏与缝的距离等)代入到(2)式,即可得到实际的条纹移动量与拓扑荷数的关系,从而判断拓扑荷数的大小。

目前研究人员正在尝试利用涡旋光束的轨道角动量进行相关的信息编码和传输。研究表明,可以利用涡旋光束的双缝干涉条纹来测得其拓扑荷数,基于上述原理,这一结果有可能应用于信息的编码和传输。当需要传输信息时,在信息的发射源,可以利用不同拓扑荷数取值来加载不同的信息,如以 $l=0$ 代表一种信息,以 $l=1$ 代表第二种信息, $l=2$ 代表第三种信息等等。而在接收端可以通过观察其干涉条纹,判断出拓扑荷数的取值从而提取出其中所携带的信息。同传统的信息编码方法比较,这种信息编码的优点在于,由于拓扑荷数的取值在理论上是无限的,因此可以同时传输很多不同的信息,从而大大地拓展信息的容量。

4 结 论

研究了涡旋光束经过双缝干涉后在干涉场中的干涉条纹分布。结果表明,拓扑荷数取值对干涉条纹产生显著的影响。与平面波的干涉条纹相比较,涡旋光束的干涉条纹出现移动,并且移动的大小与拓扑荷数取值有关,拓扑荷数取值越大条纹移动越明显,而条纹移动的方向则取决于拓扑荷数的符号。研究结果有望应用于信息的编码和传输。

参 考 文 献

- 1 I. V. Basistiy, M. S. Soskin, M. V. Vasnetsov. Optical

- wavefront dislocations and their properties [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **119**:604~612
- 2 L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw *et al.*. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Phys. Rev. A*, 1992, **45**(11):8185~8189
- 3 H. He, M. E. J. Friese, N. R. Heckenberg *et al.*. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(5):826~829
- 4 Lianzhou Rao, Jixiong Pu. Generation of partially coherent vortex bottle beams [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7):379~382
- 5 Mingwei Gao, Chunqing Gao, Zhifeng Lin. Generation and application of the twisted beam with orbital angular momentum [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(2):89~92
- 6 C. S. Guo, Y. Zhang, Y. J. Han *et al.*. Generation of optical vortices with arbitrary shape and array via helical phase spatial filtering [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**:449~454
- 7 C. S. Guo, X. Liu, J. L. He *et al.*. Optimal annulus structures of optical vortices [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(19):4625~4634
- 8 G. Molina-Terriza, J. P. Torres, L. Torner. Management of the angular momentum of light; Preparation of photons in multidimensional vector states of angular momentum [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(1):013601
- 9 L. Leach, M. J. Padgett, S. M. Barnett *et al.*. Measuring the orbital angular momentum of a single photon [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(25):257901
- 10 J. E. Curtis, B. A. Koss, D. G. Grier. Dynamic holographic optical tweezers [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **207**:169~175
- 11 G. Gibson, J. Courtial, M. J. Padgett *et al.*. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(22):5448~5456
- 12 Pan Liuzhan, Lü Baida. Spectral shifts and spectral switches in Young's experiment at the far zone [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6):707~711
潘留占, 吕百达. 杨氏实验远场的光谱位移和光谱开关[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6):707~711
- 13 H. F. Schouten, T. D. Visser, E. Wolf. New effects in Young's interference experiment with partially coherence light [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14):1182~1184
- 14 H. I. Sztul, R. R. Alfano. Double-slit interference with Laguerre-Gaussian beams [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(7):999~1001
- 15 F. Gori, M. Santarsiero, R. Borghi. Maximizing Young's fringe visibility through reversible optical transformations [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(6):588~590
- 16 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. 7th ed.. Cambridge University Press, 1999