

文章编号: 1000-5013(2009)06 0623-05

利用杨氏双缝干涉实验检测涡旋光束的拓扑荷数

廖坤山, 陈子阳, 蒲继雄

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 研究涡旋光束经过杨氏双缝干涉后的干涉条纹, 发现不同于平面波的竖直干涉条纹, 涡旋光束的干涉条纹出现扭曲. 从条纹的上部往下看, 涡旋光束的干涉条纹出现横向的移动, 而移动的方向和大小分别取决于涡旋光束拓扑荷数的符号和数值大小. 对干涉条纹进行观察发现, 实验观察结果和理论结果基本上保持一致, 可以通过观察涡旋光束的干涉条纹来判断涡旋光束的轨道角动量.

关键词: 杨氏双缝干涉实验; 涡旋光束; 拓扑荷数; 轨道角动量

中图分类号: O 436.1 文献标识码: A

1992 年, Allen 等^[1]指出具有螺线型波前相位分布(即 $\exp(il\varphi)$ 相位因子)的光束中, 每个光子都携带有 lh 的轨道角动量, 这种光束也称为涡旋光束. 其中, l 称为拓扑荷数^[2]. 由于涡旋光束携带有轨道角动量, 因而在粒子囚禁与操控等方面具有很重要的用途^[3-4]. 研究人员还发现, 可以利用涡旋光束的轨道角动量对信息进行编码, 并可进一步应用于自由空间光通信等领域^[5-6]. 由于光束的轨道角动量可以取 1, 2, 3 等整数, 也可以取分数, 这大大地加大了信息编码的容量, 并且基于涡旋光束的信息编码还具有更高的保密性^[6]. 因此, 如何测量涡旋光束的轨道角动量成为了研究的重点. 文[7-9]研究基于涡旋光束与其镜像所形成的干涉图, 测量出涡旋光束的轨道角动量; 文[10]从理论上研究了利用杨氏双缝干涉实验测量涡旋光束轨道角动量的可能性. 本文研究不同拓扑荷数的涡旋光束经杨氏双缝干涉实验后的干涉条纹.

1 计算全息法产生涡旋光束

采用计算全息法^[11]来得到涡旋光束, 其中全息图由涡旋光束和平面波干涉得到, 如图 1 所示. 涡旋光束表示为

$$E_{ov} = E_1 \exp(il\varphi), \tag{1}$$

式中, E_1 为涡旋光束的振幅, 简单起见, 令其为常数; l 为与轨道角动量相关的拓扑荷数. 平面波表示为

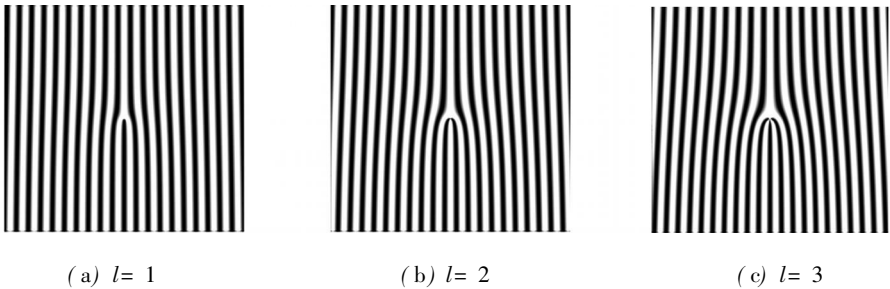


图 1 涡旋光束与平面波的干涉全息图

Fig. 1 Interference holograms of vortex beams with plane wave

收稿日期: 2008-09-21

通信作者: 廖坤山(1964), 男, 实验师, 主要从事物理光学研究. E-mail: lkshxzzb@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2007H0027); 福建省自然科学基金资助项目(A0810012); 华侨大学科研基金资助项目(08HZR14)

$$E_{pl} = E_2 \exp(-i2\pi x/\Lambda), \tag{2}$$

式(2)中, E_2 为振幅, Λ 为平面波的空间周期. 令 $E_1 = E_2 = E_0$, 最终可以得到干涉后的光强, 有

$$I = |E_{ov} + E_{pl}|^2 = 2E_0^2[1 + \cos(2\pi x/\Lambda - l\varphi)]. \tag{3}$$

利用式(3), 可以得到平面波和涡旋光束的干涉全息图.

2 涡旋光束的杨氏双缝干涉条纹

图 2 为涡旋光束杨氏双缝干涉实验示意图. 图 2 中, 氦氖激光器发出的激光, 经扩束后照射到全息图上, 产生涡旋光束. 当激光照射到全息图上, 沿着不同的衍射方向将出现不同的衍射光束. 然后, 让特定的涡旋光束通过杨氏双缝, 并最终用电荷耦合器件(CCD)来记录干涉条纹.

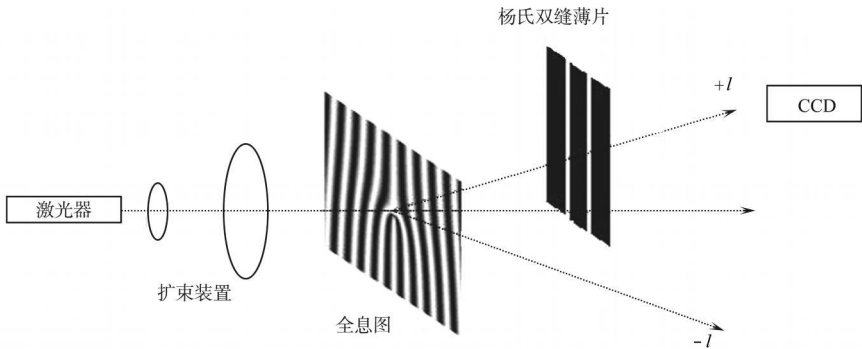


图 2 涡旋光束杨氏双缝干涉实验示意图

Fig. 2 Experimental setup of Young's double slit experiment with vortex beams

当平面波照射到杨氏双缝上, 观察屏上干涉后的光强分布^[12], 有

$$I(x) \propto \begin{cases} \cos^2(\frac{\delta}{2}), \\ \cos^2(\frac{\pi 2ax}{\lambda d}). \end{cases} \tag{4}$$

式(4)中, δ 为相位差, 该相位差取决于两个缝到屏上观察点之间距离的差值; $2a$ 为两个缝之间的距离; d 为双缝所在位置同观察屏之间的距离; λ 为入射光的波长.

当照射到双缝上的光束为涡旋光束时(假设光束的中心恰好落在双缝的中心处), 由于涡旋光束在垂直于光束传输方向的横截面的相位不是一个常数, 因而在双缝平面上, 还将出现一个附加相位差. 该相位差表示为

$$\Delta\varphi(y) = \varphi_2(y) - \varphi_1(y), \tag{5}$$

式(5)中, $\varphi_1(y)$ 为沿着一个缝的相位变化, $\varphi_2(y)$ 为沿着另外一个缝的相位变化. 当涡旋光束照射到双缝上时, 观察屏上的干涉条纹的光强^[13], 有

$$I(x, y) \propto \begin{cases} \cos^2[\delta/2 + \Delta\varphi(y)/2], \\ \cos^2[\pi 2ax/\lambda d + \Delta\varphi(y)/2]. \end{cases} \tag{6}$$

从式(4)中可以看出, 除了一些常数之外, 平面波的干涉后的光强分布仅仅跟 x 方向有关, 而与 y 方向无关; 而涡旋光束干涉后的光强分布则不仅是 x 方向的函数, 同时也是 y 方向的函数.

图 3 为平面波的双缝干涉图样. 图 3(a) 为由式(4)所计算出来的理论结果, 图 3(b) 为实验观察结果. 从图 3 可以看出, 干涉图样是由一系列相互平行的等间隔的亮暗条纹所组成.

当拓扑荷数(l)分别为 ± 1 , ± 2 和 ± 3 时, 涡旋光束经双缝实验干涉后的干涉条纹, 如图 4 所示. 从图 4(a), (b) 可以看出, 对于拓扑荷数 $l = 1$ 涡旋光束的干涉条纹, 从条纹的顶部到底部, 条纹沿着横向出现了从左到右的移动; 而对于 $l = -1$ 涡旋光束的干涉条纹, 从条纹顶部往下看, 条纹的移动方向相反, 沿着横向从右边移动到左边. 利用相同的实验装置, 对涡旋光束的干涉条纹进行了实验研究. 从图 4(c), (d) 可以看出, 实验上所得到的结果和理论结果基本上保持一致.

从图 4(e)~(h) 中可以看出, 对于 $l = 2$ 涡旋光束的干涉条纹, 从条纹上部往下看, 条纹出现了从左

到右的横向移动. 但是, 同 $l=1$ 涡旋光束的干涉条纹相比较, 条纹移动的幅度变大. $l=-2$ 涡旋光束的

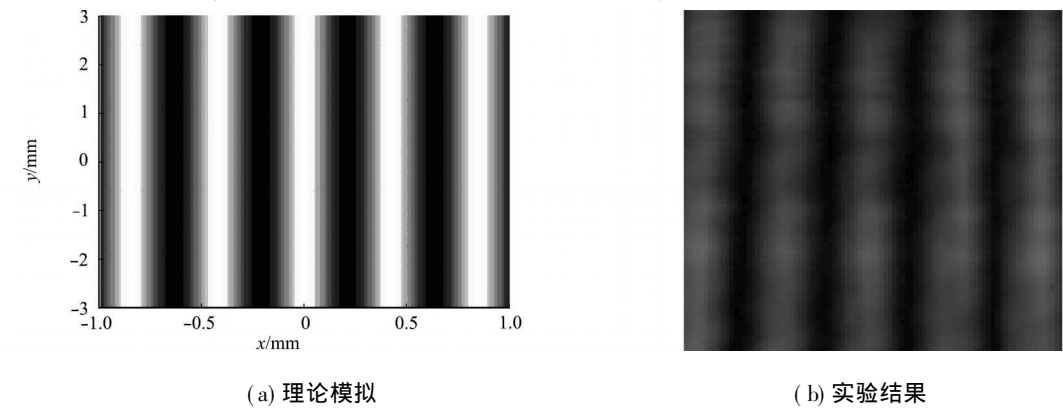
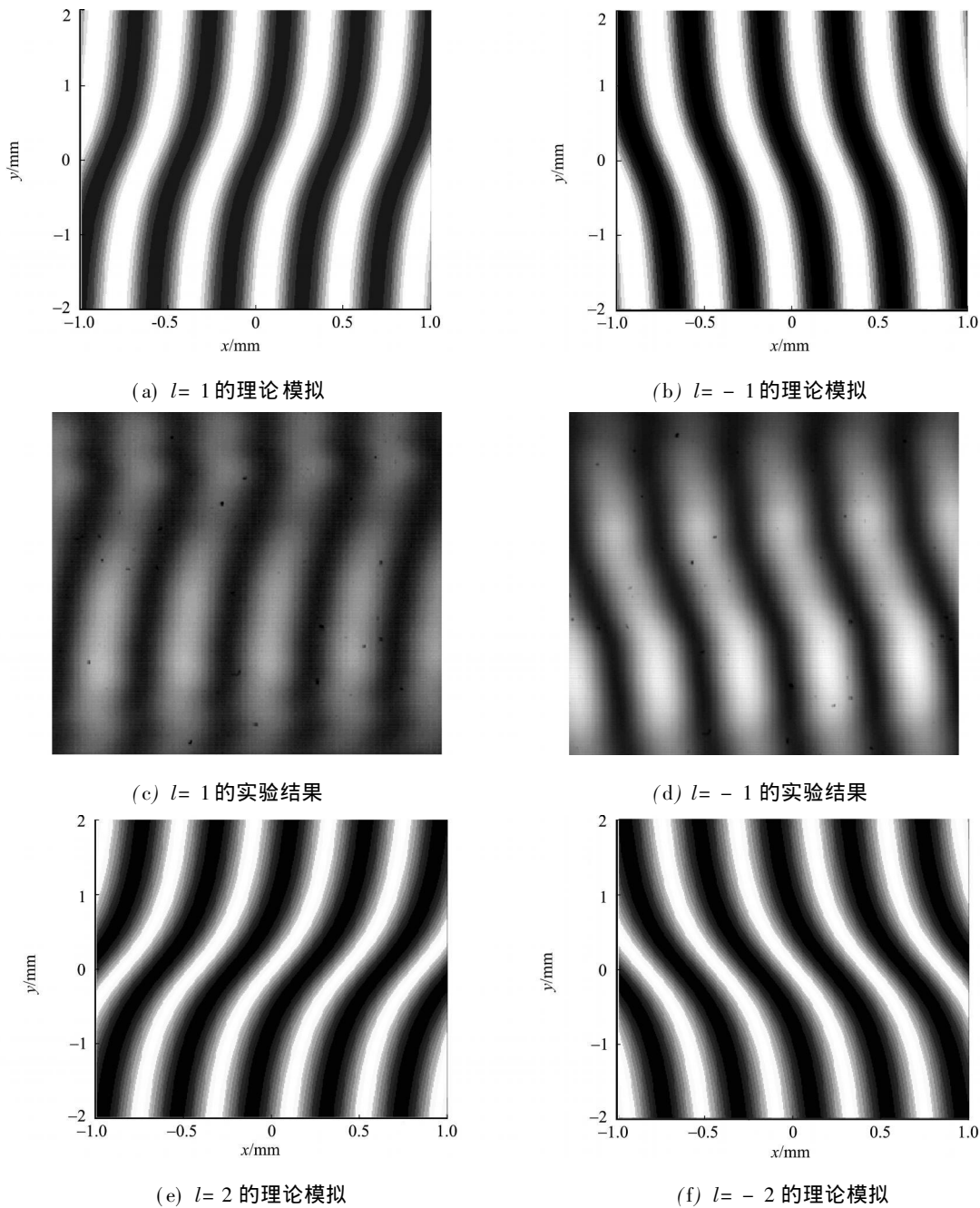


图 3 平面波的双缝干涉条纹

Fig. 3 Interference fringes of plane wave in Young's double slit experiment



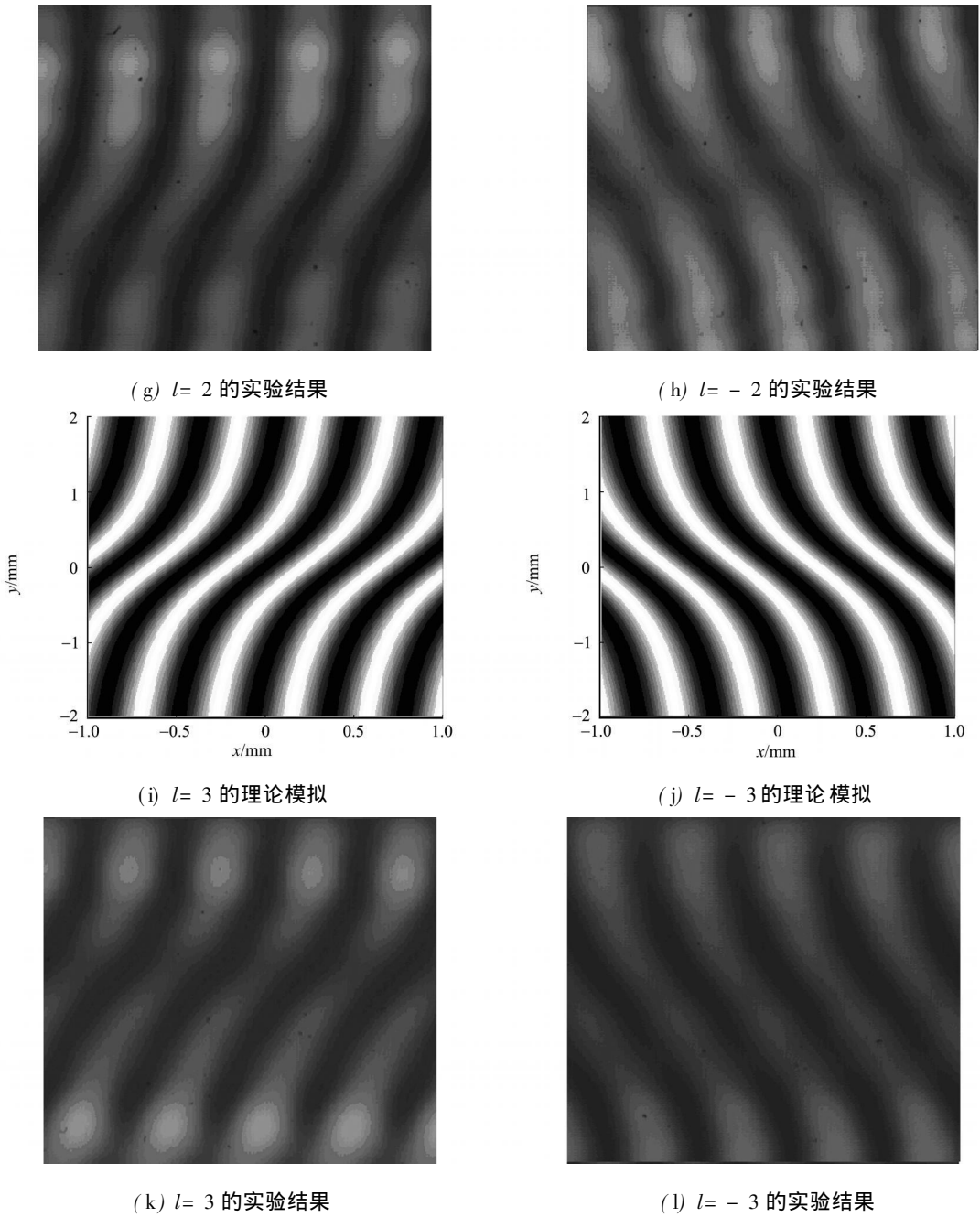


图 4 涡旋光束的双缝干涉条纹

Fig. 4 Interference fringes of Young's double slit interference experiment formed by vortex beam

干涉条纹, 从上往下, 条纹出现同 $l=2$ 反方向的移动, 移动的幅度和 $l=2$ 的涡旋光束相同. 从图 4(i)~(l) 中可以看出, 同 $l=\pm 2$ 涡旋光束的干涉条纹相比, $l=\pm 3$ 涡旋光束的干涉条纹移动的幅度更大, 而方向仍然决定于拓扑电荷数的符号.

对比文中的理论模拟结果和实验观察结果, 可以发现, 实验结果和理论结果基本上一致. 但是, 由于实际上的双缝宽度总是具有一定的宽度, 不可能真正的无穷小. 并且, 由于实验条件限制, 涡旋光束的中心有可能和双缝的中心并不完全一致, 从而使得实验上的观察结果和理论模拟存在一定的差别.

3 结束语

通过对涡旋光束经杨氏双缝干涉后的干涉条纹的研究, 并与平面波的竖直条纹相比较, 发现实验观察结果和理论结果基本上吻合. 基于杨氏双缝干涉实验可以测量涡旋光束的拓扑荷数, 这是一个简便而有效的测量涡旋光束拓扑荷数的方法.

参考文献:

- [1] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M V, SPREEUW R J C. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre Gaussian laser modes[J]. Phys Rev (A), 1992, 45(11): 8185-8189.
- [2] BASISTY I V, SOSKIN M S, VASNETSOV M V. Optical wavefront dislocations and their properties[J]. Opt Commun, 1995, 119(5): 604-612.
- [3] HE H, FRIESE M E, HECKENBERG N R. 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] CURTIS J E, KOSS B A, GRIER D G. Dynamic holographic optical tweezers[J]. Opt Commun, 2002, 207(1/6): 169-175.
- [5] GINSON G, COURTIAL J, PADGETT M J. Free space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. Opt Exp, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [6] BOUCHAL Z, CELECHOVSKY R. Mixed vortex states of light as information carriers[J]. New J Phys, 2004(6): 131.
- [7] HARRIS M, HILL C A, TAPSTER P R. Laser modes with helical wave fronts[J]. Phys Rev (A), 1994, 49(4): 3119-3122.
- [8] PADGETT M J, ARLT J, SIMPSON N B. An experiment to observe the intensity and phase structure of Laguerre Gaussian laser modes[J]. Am J Phys, 1996, 64(1): 77-82.
- [9] LEACH J, PADGETT M J, BARNETT S M. Measuring the orbital angular momentum of a single photon[J]. Phys Rev Lett, 2002, 88(25): 257901-4.
- [10] 陈子阳, 张国文, 饶连周, 等. 杨氏双缝干涉实验测量涡旋光束的轨道角动量[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1063-1067.
- [11] HECKENBERG N R, MCDUFF R, SMITH C P, et al. Generation of optical phase singularities by computer generated holograms[J]. Opt Lett, 1992, 17(3): 221-223.
- [12] BORN M, WOLF E. Principles of optics[M]. 7th ed. New York: Pergamon Press, 2001.
- [13] SZTUL H I, ALFANO R R. Double slit interference with Laguerre Gaussian beams[J]. Opt Lett, 2006, 31(7): 999-1001.

Measuring the Topological Charge of Vortex Beams with Young's Double-Slit Interference Experiment

LIAO Kun-shan, CHEN Zi-yang, PU Ji-xiong

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: The interference fringes of Young's double slit experiment illuminated by vortex beams are studied. Compared with the vertical fringes formed by plane wave, the interference fringes formed by vortex beams are twisted. It can be found as one looks from the top to the bottom of the interference pattern that the fringes are shifted, and the direction and magnitude of the shift depends on the symbol and value of the topological charge of vortex beams. Furthermore, the interference fringes of vortex beam are experimental investigated as well, it is found that the experimental observations are well consistent with the theoretical analysis. Therefore, based on the interference fringes of Young's double slit interference experiment, the topological charge of vortex beams can be measured. This can be a convenient and effective method for measuring the topological charge of vortex beams.

Keywords: Young's double slit interference experiment; vortex beams; topological charge; orbital angular momentum

(责任编辑: 鲁 斌 英文审校: 吴逢铁)