

涡旋光束的产生与干涉^{*}

李阳月 陈子阳 刘 辉 蒲继雄[†]

(华侨大学信息科学与工程学院物理电子系, 泉州 362021)

(2009 年 5 月 25 日收到; 2009 年 7 月 6 日收到修改稿)

分别从理论上和实验上研究了涡旋光束的产生和干涉现象. 理论上分析了分数阶和整数阶涡旋光束同球面波以及平面波的干涉情况, 并从实验上得出了其干涉图形. 实验结果和理论模拟基本上一致. 研究表明, 随着涡旋光束拓扑荷数的变化, 干涉图形也会产生变化. 这一现象可用于测定分数阶涡旋光束的拓扑荷数.

关键词: 物理光学, 涡旋光束, 拓扑电荷数, 干涉

PACC: 4225, 4225G, 4225K

1. 引 言

涡旋光束是具有螺旋形相位分布的光束, 其表达式中带有相位因子 $\exp(i l \theta)$, 光束中的每个光子携带 $l \hbar$ 的轨道角动量, 其中 l 称为拓扑荷数^[1-4]. 由于涡旋光束具有轨道角动量 $l \hbar$, 所携带的轨道角动量可以传递给微粒, 以驱动微粒旋转^[5,6], 还可实现对微米、亚微米微粒的俘获、平移, 人们形象地把这种工具称为“光学扳手”^[7,8]. 另外涡旋光束在信息编码上也有较大的应用前景, 利用涡旋光束的轨道角动量可对信息进行编码与传输^[9-11]. 这种新型的编码方式具有很多独特的优点: 1) 由于拓扑电荷数 l 的取值可以为整数, 零, 甚至分数, 所以具有更高的编码能力. 2) 具有更高的保密性^[9]. 因而对涡旋光束拓扑荷数的测量具有很重要的意义.

目前关于涡旋光束拓扑荷数测量的研究主要局限于整数阶的涡旋光束, 然而对分数阶涡旋光束的研究也具有很重要的意义. 因为涡旋光束的分数阶取值可以使其具有更强的编码能力; 不同于整数阶涡旋光束圆对称光强分布, 分数阶涡旋光束的亮环上会出现缺口, 这有望在微粒子的操纵方面得到应用. 因此, 本文分别从理论和实验上研究了平面波及球面波和涡旋光束的干涉, 不仅研究了整数阶涡旋光束的干涉, 还分析了分数阶的干涉情况.

2. 理论分析

2.1. 平面波与涡旋光束的干涉

涡旋光束的电场表达式为 $E_1 = A_1 \exp(i l \theta)$, 其中 A_1 为振幅, 简单起见, 令其为一常数, l 为涡旋光束的拓扑荷数. 平面波的表达式为 $E_2 = A_2 \exp(i 2 \pi x / \lambda)$, A_2 为常数. 令 $A_1 = A_2 = E_0$, 则干涉后的光强分布为

$$I = E E^* = E_0^2 [2 + 2 \cos(i l \theta + i 2 \pi x / \lambda)]. \quad (1)$$

根据以上公式可以模拟出平面波和涡旋光束的干涉图, 如图 1 所示. 涡旋光束与平面波干涉条纹不再是亮暗相间的竖直条纹, 而是发生了移动, 并且改变拓扑电荷数 l 后干涉条纹也相对发生变化. 图 1(a) 和 (b) 分别为拓扑荷数为 1 和 2 的涡旋光束与平面波的干涉结果. 与整数阶干涉结果的连续条纹不同的是, 分数阶的干涉条纹会出现位错, 并且位错的大小与涡旋光束的拓扑荷数有关. 图 1(c) 的干涉图条纹移动过 0.5 个条纹, (d) 的干涉图条纹移动过 4/3 个条纹.

图 2 是拓扑荷数分别取负值时的情况, 由图可知, 叉口方向与图 1 相反而其他变化情况与图 1 相同.

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 60977068), 福建省自然科学基金 (批准号: A0810012), 华侨大学科研基金 (批准号: 08HZR14) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: jixiong@hqu.edu.cn

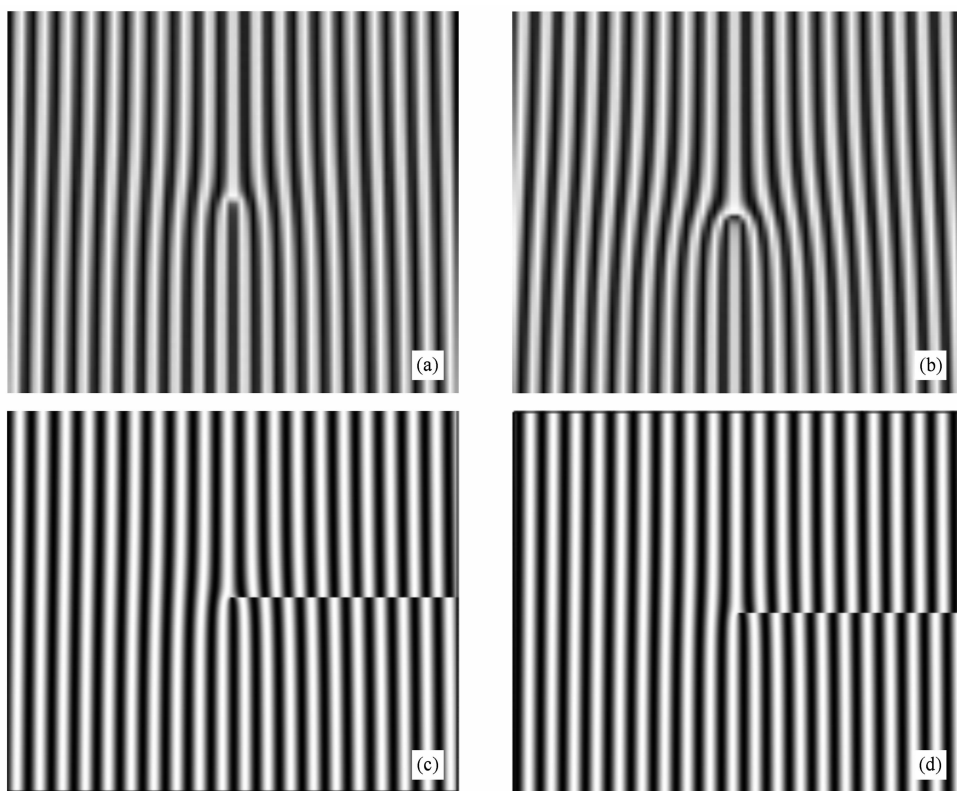


图1 平面波与涡旋光束干涉的理论模拟图 (a) $l=1$; (b) $l=2$; (c) $l=0.5$; (d) $l=1.33$

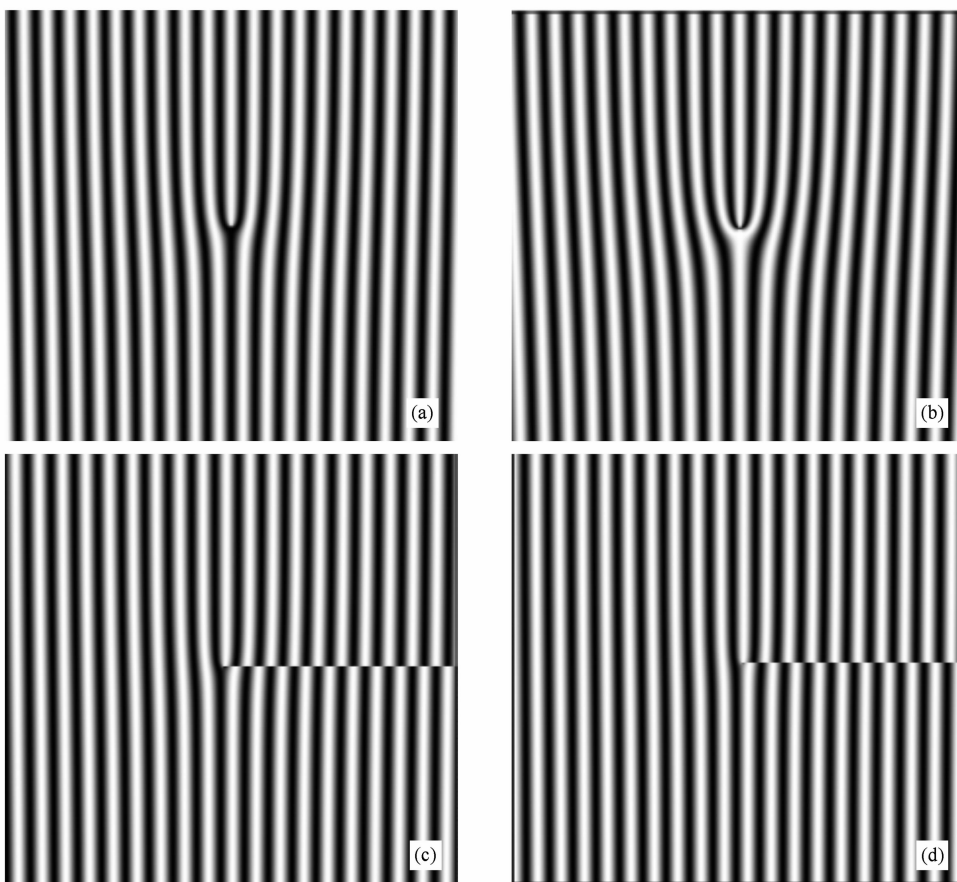


图2 平面波与涡旋光束干涉的理论模拟图 (a) $l=-1$; (b) $l=-2$; (c) $l=-0.5$; (d) $l=-1.33$

2.2. 球面波与涡旋光束的干涉

除了研究平面波与涡旋光束的干涉,我们还分析了球面波与涡旋光束的干涉. 球面波的表达式为

$$E_3 = A_3 \exp\left[-ikz\left(1 + \frac{1}{2}\frac{x^2}{z^2} + \frac{1}{2}\frac{y^2}{z^2}\right)\right] \quad (2)$$

A_3 和 z 为常数. 平面波的表达式如上所述, 令 $A_2 =$

$A_3 = E_0$, 则干涉后得到的光强分布为

$$I = EE^* = 2E_0^2 \left\{ 1 + \cos\left[il\theta - ik\left(1 + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{2}y^2\right)\right]\right\} \quad (3)$$

根据以上公式可以模拟出球面波和涡旋光束的干涉图. 如图 3 和图 4 所示.

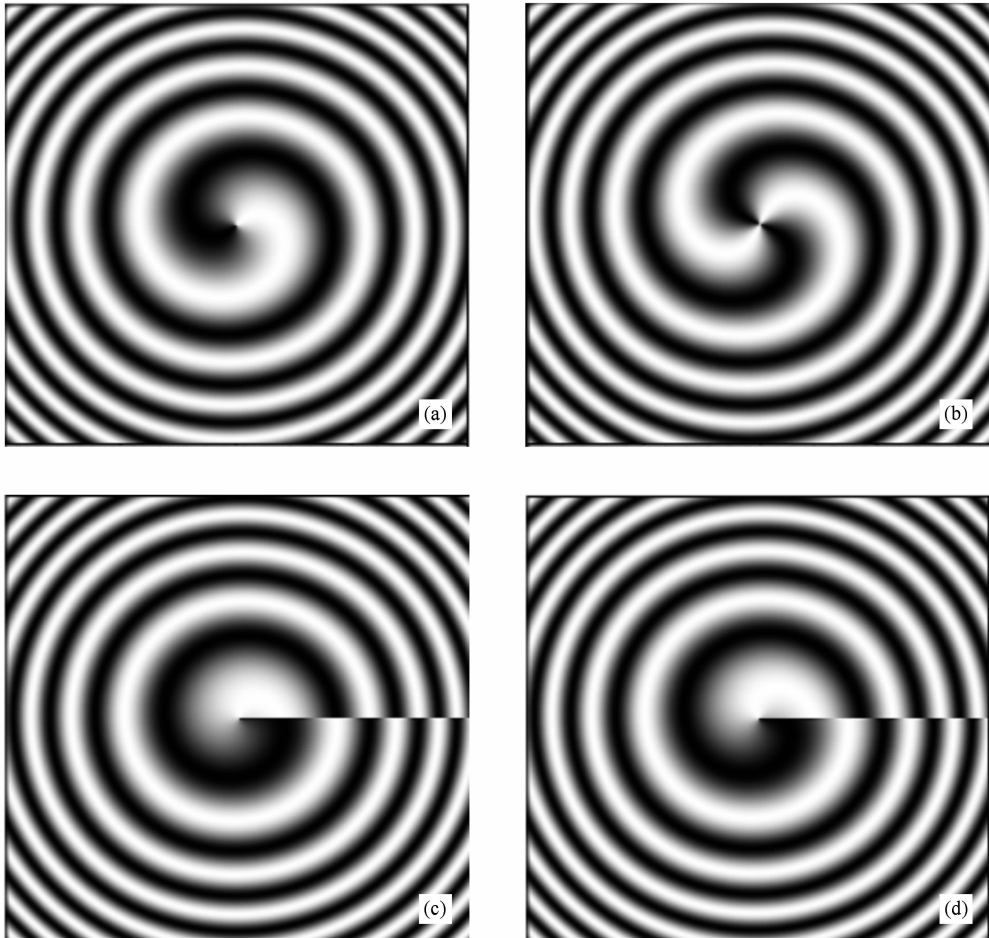


图 3 球面波与涡旋光束干涉的理论模拟图 (a) $l=1$; (b) $l=2$; (c) $l=0.5$; (d) $l=1.33$

由图 3 和图 4 可知, 与平面波与涡旋光束干涉情况不同, 球面波与涡旋光束的干涉条纹不再是亮暗相间的移动条纹, 而是螺线型明暗相间的环形条纹, 改变拓扑电荷数 l 后干涉条纹也相对发生变化. 如上图所示, 与整数阶涡旋光束连续条纹不同

的是, 分数阶涡旋光束的干涉条纹会发生位错, 且位错的程度与拓扑荷数的阶数有关. 图 4 与图 3 不同的是由于拓扑荷数取负值使得环形条纹的旋转方向相反, 即一个为逆时针方向一个为顺时针方向.

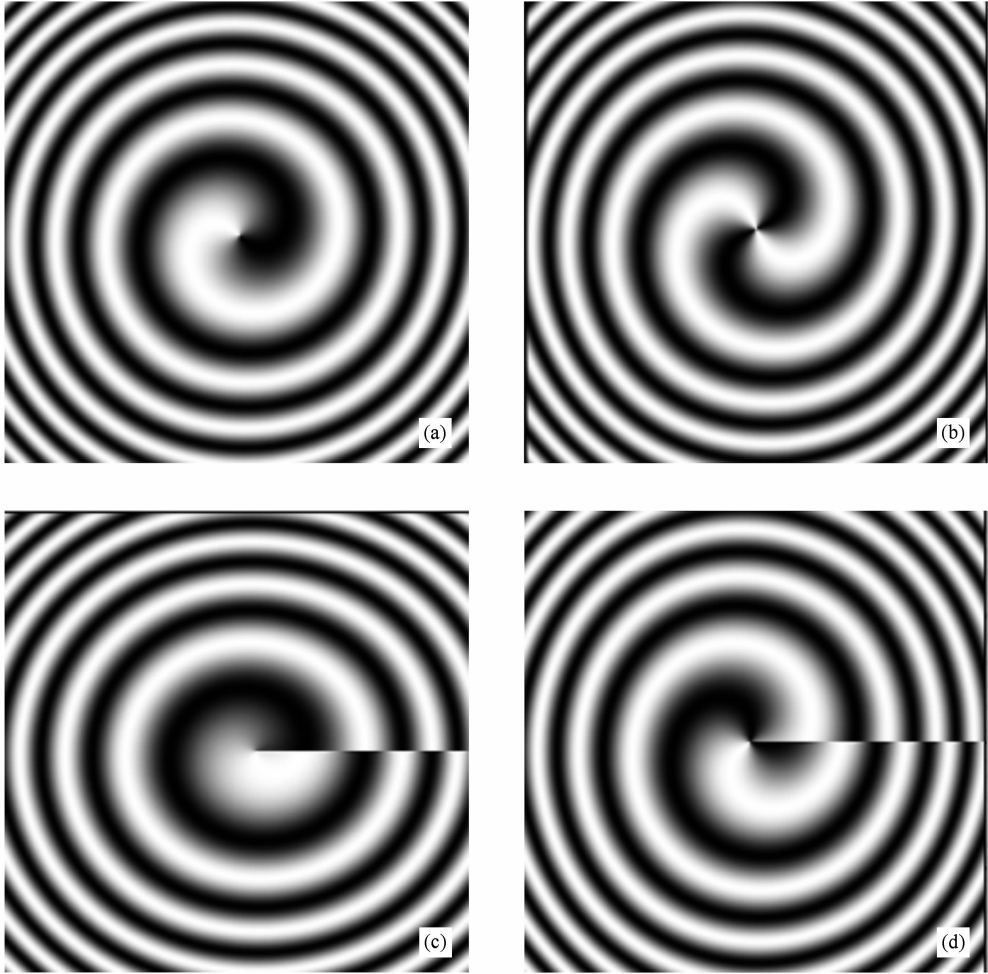


图4 球面波与涡旋光束干涉的理论模拟图 (a) $l = -1$; (b) $l = -2$; (c) $l = -0.5$; (d) $l = -1.33$

3. 实验装置及分析

3.1. 实验原理图

如图5所示, He-Ne激光器发出的光(近似可看成平面波)经过分束器后分成两束,其中一束经过透镜之后变成球面波;另外一束经过空间光调制器后变成涡旋光束,然后经过光阑取出实验所需的涡旋光束.最后这两束光在合束器上干涉,通过 CCD 观察干涉图形.可以通过电脑控制空间光调制器从而实现不同涡旋光束的输出.平面波与涡旋光束干涉的实验装置图即在图3的基础上撤掉透镜.

图6所示为实验上所得到的涡旋光束的光强分布.从图中可以看出,随着涡旋光束拓扑荷数的增

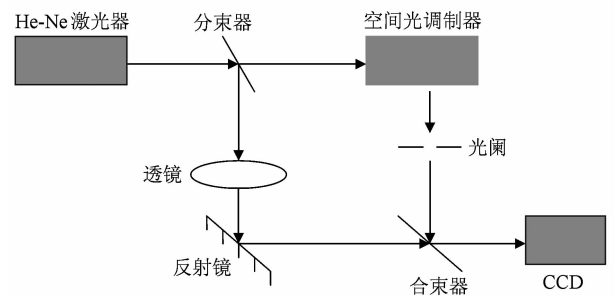


图5 球面波与涡旋光束干涉装置图

加, 涡旋光束的空心大小也随之变大. 同整数阶涡旋光束圆对称的光强分布不同, 分数阶的涡旋光束的光强不再是圆对称, 而是会出现缺口, 并且缺口的大小和形状随着拓扑荷数的改变会出现相应的变化.

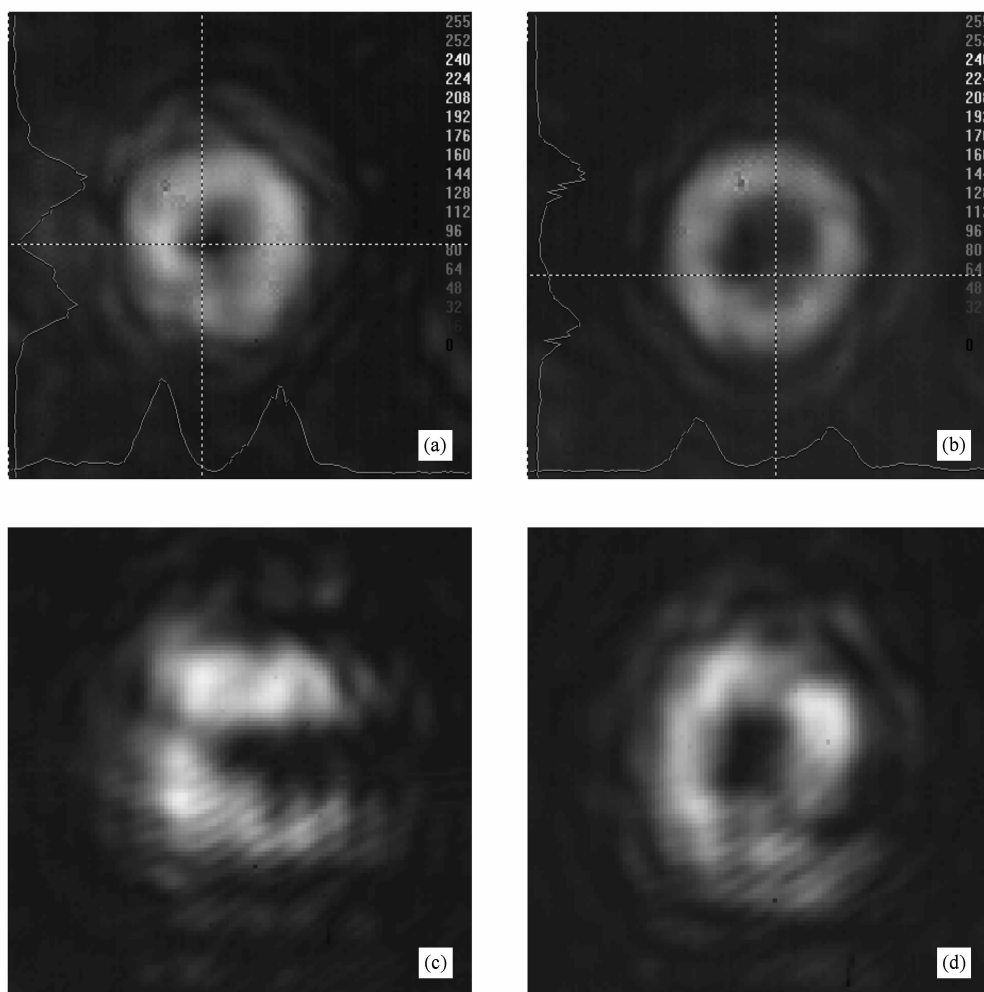


图 6 涡旋光束光强截面图 (a) $l=1$; (b) $l=2$; (c) $l=0.5$; (d) $l=1.33$

图 7 所示为拓扑荷数 $l=1.5$ 的涡旋光束随传输距离 d 的不同的光强分布图. 由图可知随着传输距离的增大, 涡旋光束的光斑逐渐扩大, 其空心 and 缺口也随之增大, 但是缺口的方向不会改变.

3.2. 实验干涉图形

实验拍摄到的平面波与涡旋光束的干涉图形如图 8 所示. 由图 8 可知, 实验拍摄图形与图 1 理论模拟图基本一致, 其干涉条纹为有偏转的直线, 并且随着拓扑电荷数 l 的改变, 干涉条纹也相对发生变化. 如图 8 所示, 图 8(a) 的干涉图条纹可明显看出偏转过一个条纹与图 1(a) 相对应; 图 8(b) 的干涉图条纹可明显看出偏转过两个条纹与图 1(b) 相对应; 分数阶的干涉图形与整数阶不同, 图 8(c) 和 (d) 的干涉图条纹分别偏转过 0.5 个条纹和 4/3 个条纹, 但由于实验拍摄条件的影响及分数阶涡旋光

束的缺口影响, 其效果相对于理论模拟图较差.

图 9 所示为拓扑荷数取负值时的平面波与涡旋光束的干涉图形, 由图可知, 实验拍摄图形与图 2 理论模拟图基本一致, 方向与图 8 刚好相反.

实验拍摄到的球面波与涡旋光束的干涉图形如图 10 所示. 由图 10 可知, 实验拍摄图形与图 3 理论模拟图基本一致, 其干涉条纹为一些明暗相间的螺旋型条纹, 改变拓扑电荷数 l 后干涉条纹也相对发生变化. 如图 10 所示, 图 10(a) 的干涉图条纹为一圈圈明暗相间的环形条纹且中心两个亮条纹; 图 10(b) 的干涉图条纹中心三个亮条纹, 可以看出随着拓扑电荷数的增大图形的中心区域变得不清晰, 这可能是由于拓扑荷数越大, 涡旋光束的中心暗斑越大, 使中心光强较弱的原因; 分数阶的干涉图形与整数阶也不相同, 如图 (c) 和 (d) 的干涉图条纹其

亮暗条纹位错偏转过半个条纹和 $1/3$ 个条纹, 同样由于实验拍摄条件和分数阶涡旋光束缺口的影响, 其效果较差.

图 11 所示为拓扑荷数取负值时的球面波与涡旋光束的干涉图形, 由图可知, 实验拍摄图形与图 4 理论模拟图基本一致, 旋转方向与图 10 刚好相反.

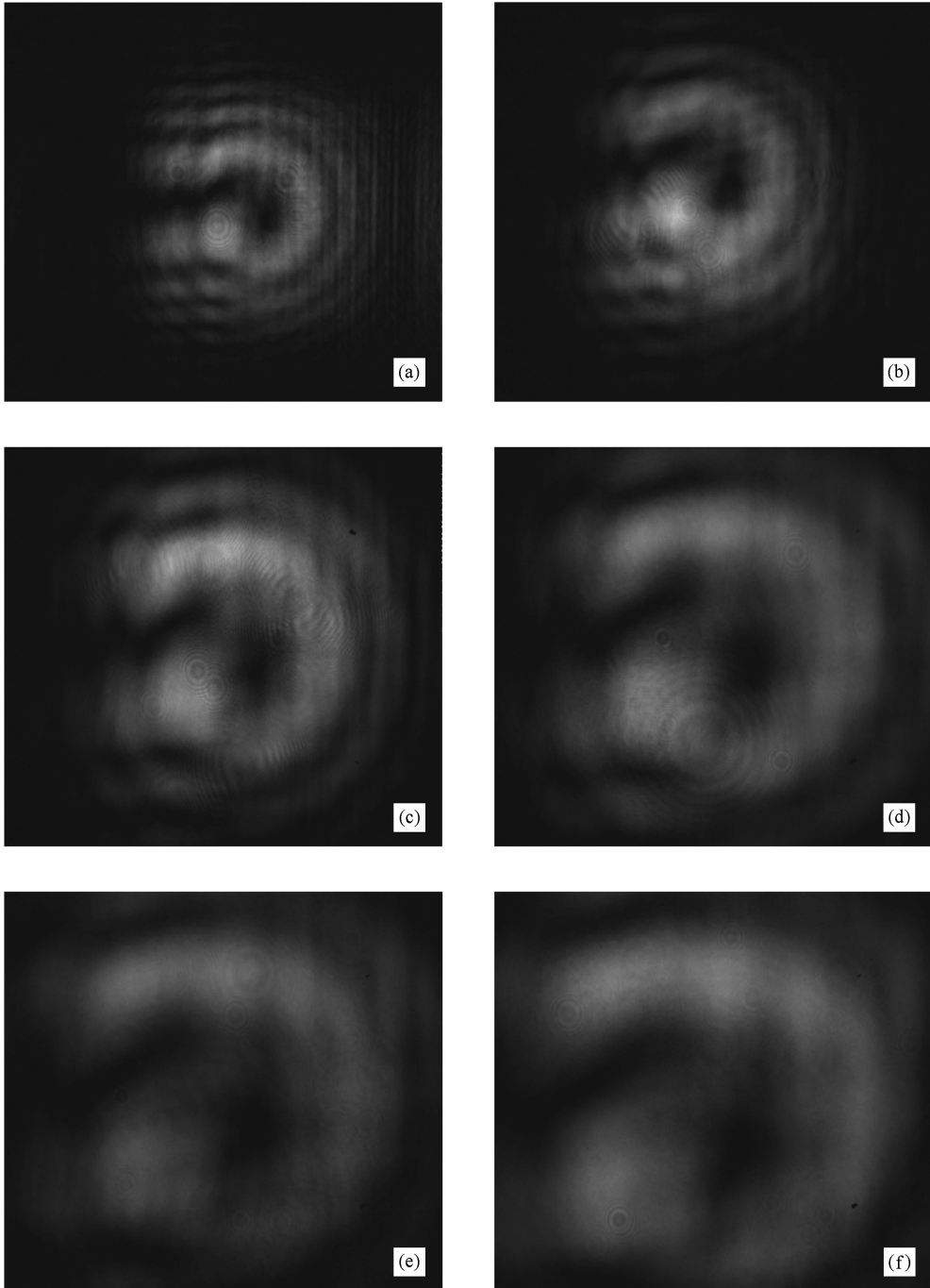


图 7 $l=1.5$ 涡旋光束光强截面图 (a) $d=200$ cm; (b) $d=300$ cm; (c) $d=400$ cm; (d) $d=500$ cm; (e) $d=600$ cm; (f) $d=700$ cm

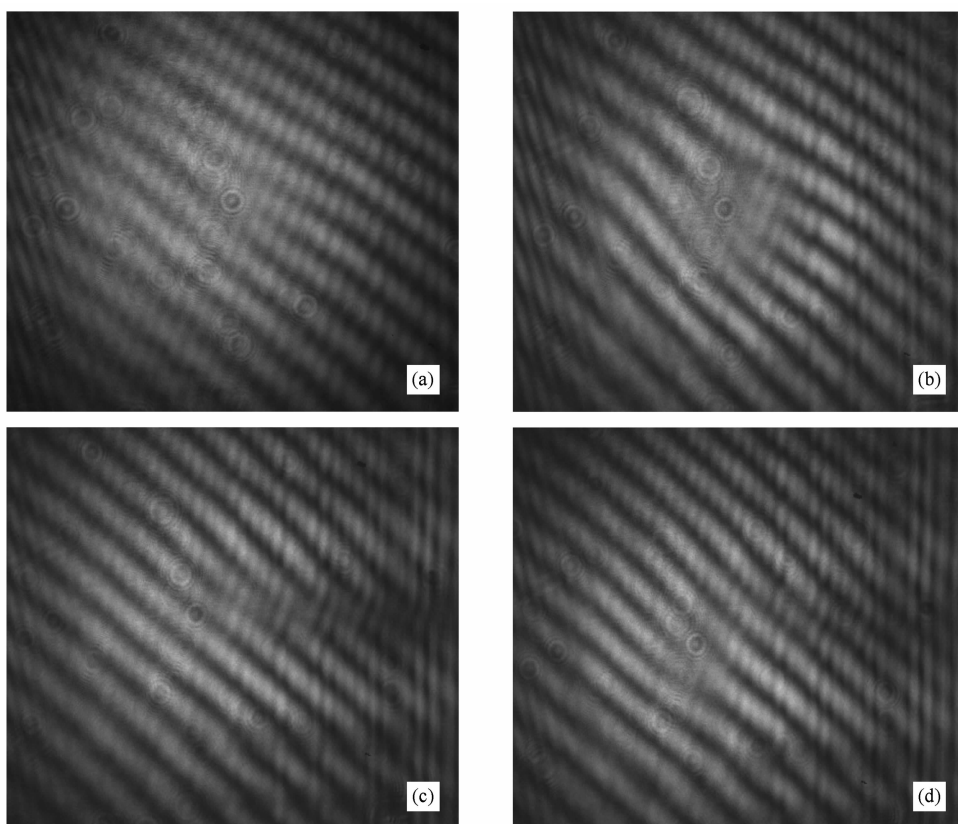


图 8 平面波与涡旋光束干涉的实验光强图 (a) $l=1$; (b) $l=2$; (c) $l=0.5$; (d) $l=1.33$

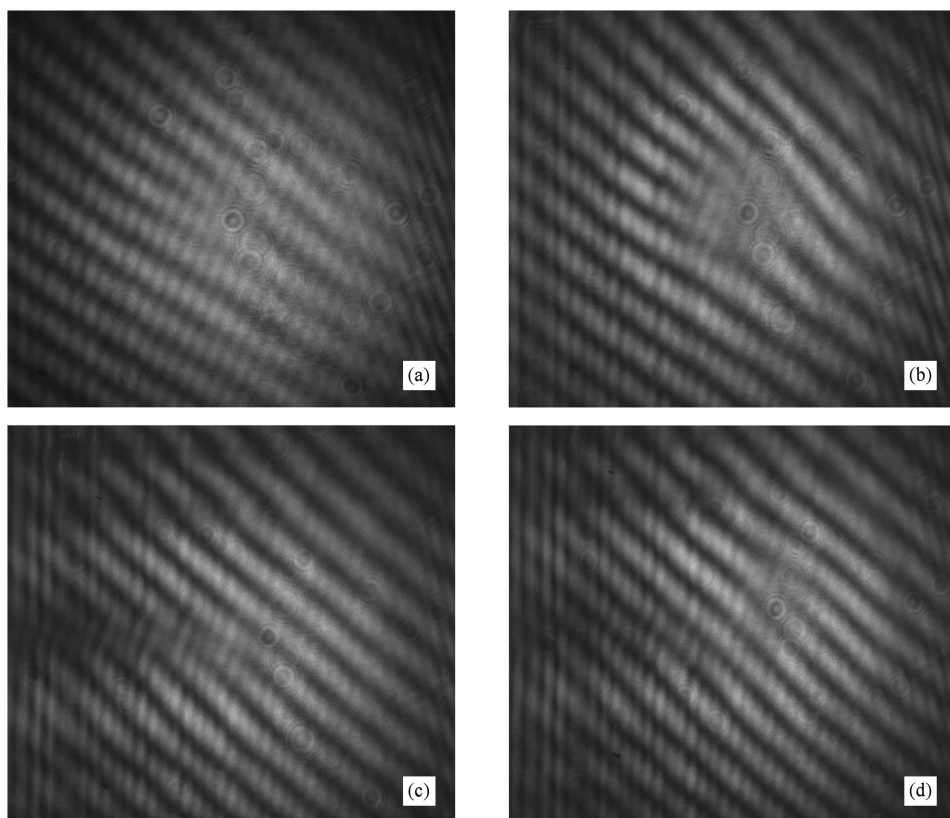


图 9 平面波与涡旋光束干涉的实验光强图 (a) $l=-1$; (b) $l=-2$; (c) $l=-0.5$; (d) $l=-1.33$

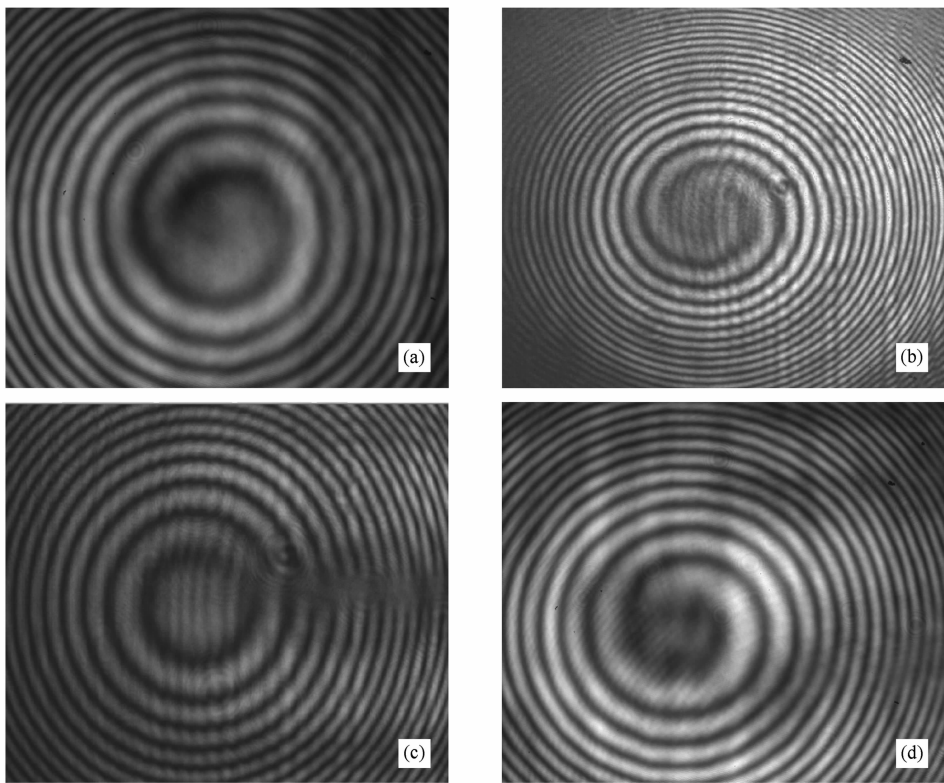


图 10 球面波与涡旋光束干涉的实验光强图 (a) $l=1$; (b) $l=2$; (c) $l=0.5$; (d) $l=1.33$

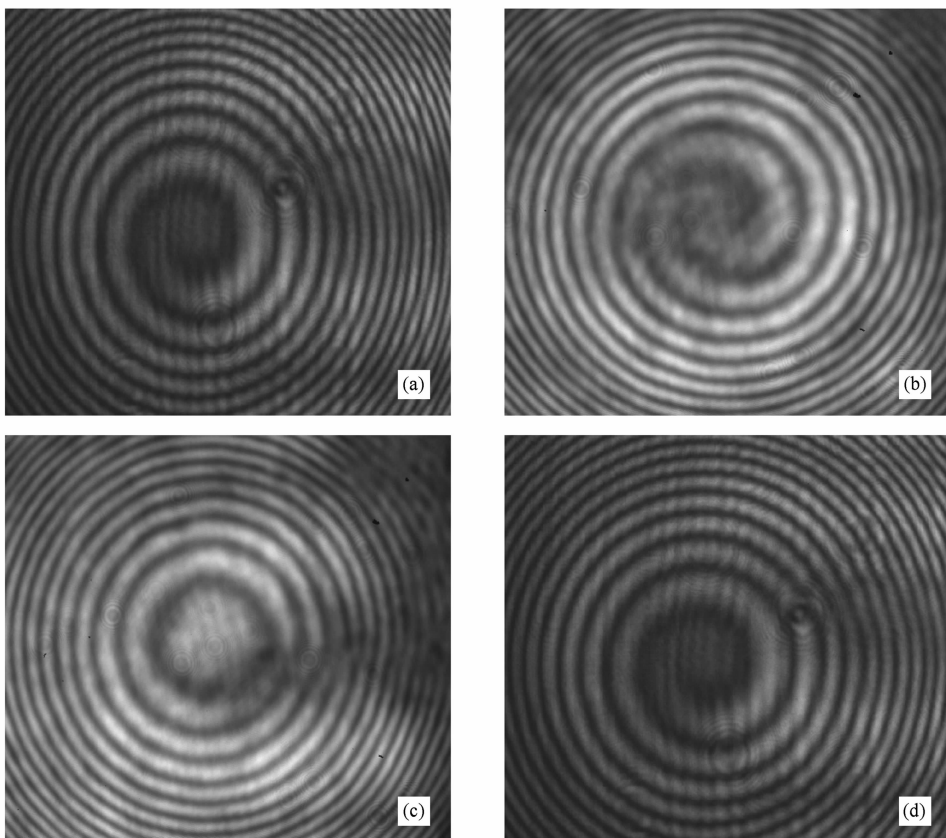


图 11 球面波与涡旋光束干涉的实验光强图 (a) $l=-1$; (b) $l=-2$; (c) $l=-0.5$; (d) $l=-1.33$

4. 结 论

本文主要从理论上分析了球面波和涡旋光束的干涉,并给出平面波与涡旋光束的干涉作为比较,同时根据理论模拟了两者的干涉光强图,并分析了改变拓扑电荷数后产生的变化.得出的结果是相比于平面波与涡旋光束干涉,球面波与涡旋光束

的干涉条纹不再是移动条纹,而是螺线型明暗相间的环形条纹,且分数阶的干涉条纹会随着拓扑电荷数的不同而发生不同程度的位错.通过研究发现,涡旋光束和平面波(或球面波)的干涉结果会随着涡旋光束拓扑荷数的变化而变化,因而可以通过干涉图形来判断涡旋光束的拓扑荷数.拓扑荷数的测定对利用涡旋光束进行信息的编码与传输具有很重要的意义.

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [2] Zhang L, Cai Y J, Lu X H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1778 (in Chinese) [张 蕾、蔡阳健、陆璇辉 2004 物理学报 **53** 1778]
- [3] Liu P S, Lü B D 2007 *Chin. Phys.* **16** 411
- [4] Ashkin A, Dziedzic J 1975 *Sciences* **187** 1073
- [5] Felgner H, Muller O, Schiwa M 1995 *Appl. Opt.* **34** 977
- [6] Wright W, Sonek G, Berns M 1994 *Appl. Opt.* **33** 1735
- [7] Simpson N, Mcgloin N, Dholakia K, Allen L, Padgett M 1998 *J. Mod. Opt.* **45** 1943
- [8] Simpson N, Dholakia K, Allen L, Padgett M 1997 *Opt. Lett.* **22** 52
- [9] Molina-Terriza G, Torres J P, Torner L 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 013601
- [10] Liu Y D, Gao C Q, Gao M W, Li F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 854 (in Chinese) [刘义东、高春清、高明伟、李 丰 2007 物理学报 **56** 854]
- [11] Chen B S, Pu J X 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1034

Generation and interference of vortex beams^{*}

Li Yang-Yue Chen Zi-Yang Liu Hui Pu Ji-Xiong[†]

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

(Received 25 May 2009; revised manuscript received 6 July 2009)

Abstract

The generation and interference of vortex beam have been investigated both theoretically and experimentally in this paper. The interference pattern of fractional and integral vortex beams with vortex beams with spherical wave and plane wave have been studied numerically, and the corresponding experimental results are presented. The experimental results and numerical results are practically consistent. It is found that the interference pattern varies with the topological charge of vortex beams. This phenomenon can be used to detect the topological charge of fractional vortex beam.

Keywords: physical optics, vortex beam, topological charge, interference

PACC: 4225, 4225G, 4225K

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60977068) and the Natural Science Foundation of Fujian Province (Grant No. A0810012) and the Science Foundation of Huaqiao University (Grant No. 08HZR14).

[†] Corresponding author. E-mail: jixiong@hqu.edu.cn