

螺旋相位光束轨道角动量态测量的实验研究*

齐晓庆 高春清†

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

(2010年3月1日收到; 2010年3月22日收到修改稿)

对螺旋光束的轨道角动量态的测量技术进行了实验研究. 建立了一套利用 Mach-Zehnder 干涉仪测量光束轨道角动量态的系统, 对利用空间光调制器生成的携带不同轨道角动量的光束进行了测量, 通过 Mach-Zehnder 干涉仪分离出了具有不同角量子数的螺旋光束.

关键词: 轨道角动量, 空间光调制器, Mach-Zehnder 干涉仪

PACS: 42.25. Kb, 42.50. Ex, 42.87. Bg

1. 引言

轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 是光的一个重要物理参数. 1992 年, Allen 等人通过实验研究了光束的轨道角动量, 发现具有 $\exp(-il\varphi)$ 形式相位因子的光束的每个光子携带的轨道角动量为 lh (l 为轨道角动量量子数)^[1]. 这种具有相位因子 $\exp(-il\varphi)$ 的光束的典型特征为光束中心存在相位奇点, 其波前为螺旋形, 因此也称为螺旋光束. 螺旋光束所携带的轨道角动量在许多领域具有非常重要的应用前景^[2-9].

由于光的轨道角动量可以取 $(-\infty, +\infty)$ 内的任意值, 因此其有可能被用于进行信息的传输. 近年来轨道角动量态的生成^[10-13]、调制和信息加载^[2, 14-16]、信息解调和轨道角动量检测^[17-20]等方面的研究都受到人们的重视. 国外已有一些研究小组搭建了利用轨道角动量进行数据传输的系统^[2, 21, 22]; 国内我们实现了光束轨道角动量态的叠加复用系统, 采用二元振幅光栅检测轨道角动量态^[15, 16]. 当一束角量子数 $l = m$ 的光束入射到中心有 m 个位错的二元振幅光栅时, 其 -1 级衍射将退化为 $l = 0$ 的高斯光束, 即在 -1 衍射级中心出现一个亮斑, 这样便可以根据检测所用光栅中心位错数和衍射光场中亮斑出现位置来判断光束的轨道角动量态, 这种方法简单方便, 但只能用于标定单个

轨道角动量态或者互不相干的多个轨道角动量态. 此外, 由于使用光栅时被测光束的能量将分散分布在多个衍射级上, 难以确定光束中各个螺旋分量的能量特征. 除了衍射光栅测量方法外, 还有其他一些测量光束轨道角动量的方法, 如利用二阶强度矩测量^[17], 或利用机械作用产生扭矩测量^[18], 或利用 Mach-Zehnder (M-Z) 干涉仪测量^[19, 20]等, 其中 M-Z 干涉仪测量法在 2002 年由 Leach 等提出, 其能够分离出多个轨道角动量态, 但目前所见报道中, 只有分离单一角量子数的螺旋光束的实验结果, 尚未见同轴叠加多个轨道角动量态的分离结果. 本文中, 我们搭建了一套轨道角动量检测系统, 利用一个两臂上带有 Dove 棱镜的 M-Z 干涉仪分离出了角量子数为奇数和偶数的轨道角动量态, 分别对整数角量子数的螺旋光束和同轴叠加的两个不同整数角量子数螺旋光束进行了轨道角动量态测量, 并给出了相应的实验结果.

2. 光束的轨道角动量的测量原理

利用两臂带有 Dove 棱镜的 M-Z 干涉仪能够分离出携带不同轨道角动量的螺旋光束, 测量装置如图 1 所示, 图中坐标系 z 轴始终沿光束传播方向, x 轴和 y 轴分别垂直和平行于纸面. 两块分光比为 50:50 的分光平片 S_1, S_2 与两块 45° 全反射镜 R_1, R_2 的四个镜面相互平行, 为保证 M-Z 干涉仪

* 国家自然科学基金 (批准号: 60778002) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: gao@bit.edu.cn

两臂光程的对称性分光平片 S_1, S_2 的分光面位置是不同的. Dove 棱镜 D_1 相对于 Dove 棱镜 D_2 旋转过 $\pi/2$ 的角度, 这意味着光束传输经过 Dove 棱镜 D_2 时垂直于 z 轴截面内的光场分布将相对 x 轴翻转, 而相同的光束传输经过 Dove 棱镜 D_1 时垂直于 z 轴截面内的光场分布将相对 x 轴翻转并旋转

过 π 的角度. 由于角量子数为 l 的螺旋光束包含相位因子 $\exp(-il\varphi)$, 传输经过 D_2 时螺旋相位因子变为 $\exp(-il(-\varphi))$, 而传输经过 D_1 时螺旋相位因子变为 $\exp(-il(\pi - \varphi))$, 也即相同角量子数 l 的螺旋光束分别传输经过 Dove 棱镜 D_1 和 D_2 时将产生 $l\pi$ 的相位差.

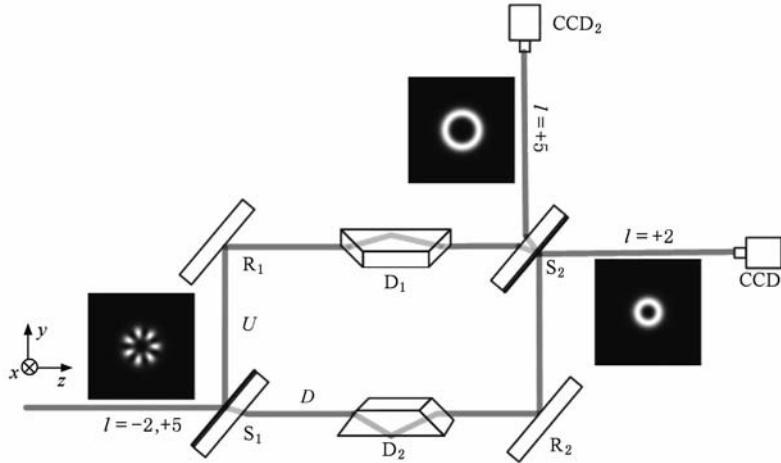


图1 利用 M-Z 干涉仪测量光束轨道角动量原理图(S_1, S_2 为分光平片; R_1, R_2 为 45° 全反射镜; D_1, D_2 为 Dove 棱镜)

若用 U 和 D 表示 M-Z 干涉仪的上行光路($S_1 \rightarrow R_1 \rightarrow D_1 \rightarrow S_2$) 和下行光路($S_1 \rightarrow D_2 \rightarrow R_2 \rightarrow S_2$). 进入 CCD_1 的两束光在各自光程中发生如下相变: 上行光路 U 中, 入射光被分光平片 S_1 反射产生 π 的相变, 被全反镜 R_1 反射产生 π 的相变, 传输经过 Dove 棱镜 D_1 产生一个固定相变 δ 和一个相位延迟 $l\pi$, 之后透过分光平片 S_2 产生一个固定相变 σ ; 下行光路 D 中, 入射光透射经过分光平片 S_1 产生一个固定相变 σ , 传输经过 Dove 棱镜 D_2 产生一个固定相变 δ , 被全反镜 R_2 反射产生 π 的相变, 被分光平片 S_2 反射产生 π 的相变. 可以看出通过上行光路 U 和下行光路 D 进入 CCD_1 的两束光相位差为 $l\pi$. 类似的, 对于进入 CCD_2 的两束光在各自光程中发生如下相变: 上行光路 U 中, 入射光被分光平片 S_1 反射产生 π 的相变, 被全反镜 R_1 反射产生 π 的相变, 传输经过 Dove 棱镜 D_1 产生一个固定相变 δ 和一个相位延迟 $l\pi$, 透射经过分光平片 S_2 产生一个固定相变 σ , 被分光平片 S_2 反射不产生相变, 第二次穿过分光平片 S_2 产生一个固定的相变 σ ; 下行光路 D 中, 入射光穿透分光平片 S_1 产生一个固定相变 σ , 传输经过 Dove 棱镜 D_2 产生一个固定相变 δ , 被全反镜 R_2 反

射产生 π 的相变, 穿过分光平片 S_2 产生一个固定相变 σ . 可以看出通过上行光路 U 和下行光路 D 进入 CCD_2 的两束光相位正好相差 $(l+1)\pi$. 由以上分析不难看出, 对于角量子数 l 为偶数的螺旋光束能量将从 CCD_1 端输出, 角量子数 l 为奇数的螺旋光束能量从 CCD_2 端输出. 值得注意的是, 从 CCD_1 端出射的 U 和 D 光路中均发生三次全反射, 光场相对于 x 轴对称翻转三次, 光束携带的轨道角动量符号变反; 而从 CCD_2 端出射的 U 和 D 光路中分别发生四次和两次全反射, 出射光束携带的轨道角动量不变.

3. 光束轨道角动量测量实验及讨论

我们搭建了一套光束轨道角动量的生成和检测系统, 如图 2 所示. 实验所用光源为波长 632.8nm 的 He-Ne 激光器, 使用 LC-R 2500 型空间光调制器对激光器的出射光进行实时相位调制. 借助衍射光学设计中的迭代算法计算相位调制函数^[23], 我们生成了单一轨道角动量态的螺旋光束和包含两个同轴叠加轨道角动量分量的螺旋光束, 利用 M-Z 干涉仪成功分离了角量子数为奇数和偶数的螺旋光束.

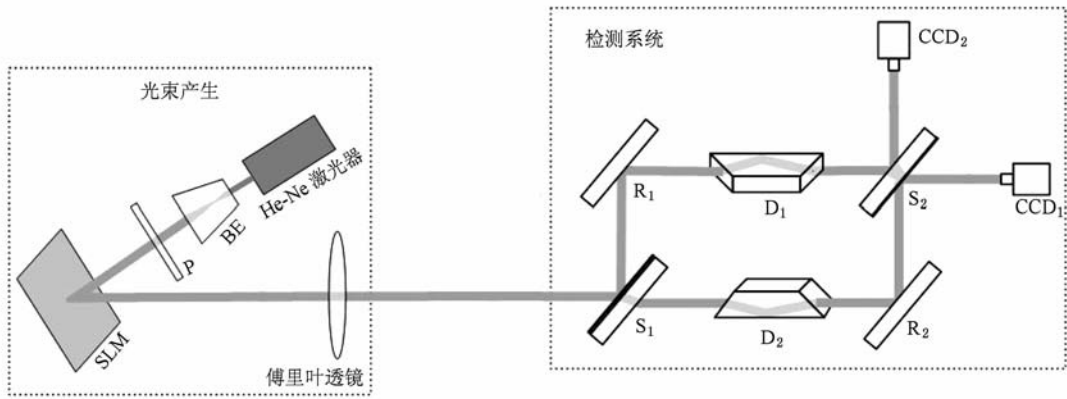


图2 光束轨道角动量的生成和检测实验系统结构图

3.1. 利用 M-Z 干涉仪分离单一轨道角动量态的螺旋光束

根据相位调制函数的优化算法设计相位调制板^[23],利用空间光调制器生成了单一轨道角动量态

的螺旋光束,如图3所示.

图2所示测量装置中,将分光平片 S_2 安装在一个二维精密平移台上以调节 M-Z 干涉仪两臂光程,通过 CCD_1 和 CCD_2 监测 M-Z 干涉仪两个输出端的出射光如图4所示.

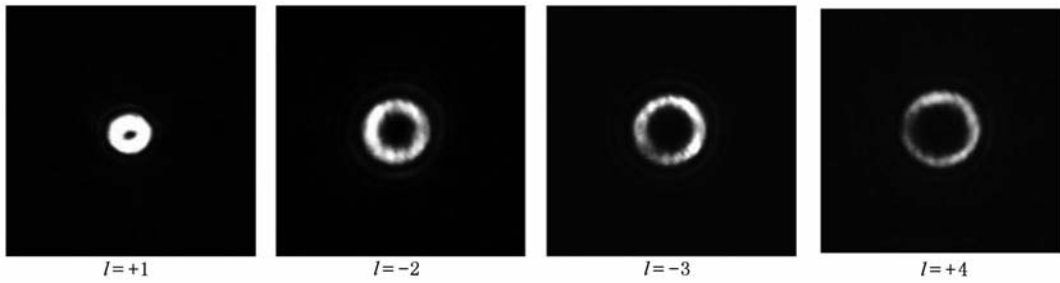


图3 单一轨道角动量态的螺旋光束能量分布图

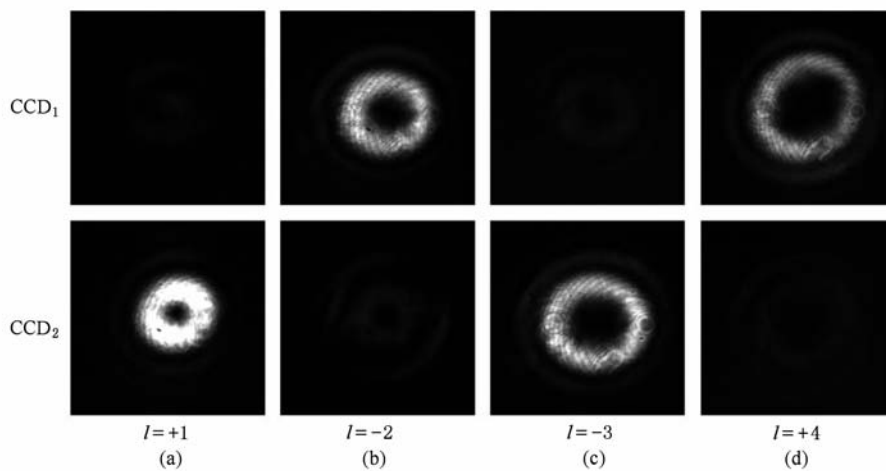


图4 M-Z 干涉仪分离单一轨道角动量态螺旋光束的实验结果

由图4(b),(d)能够看出,当入射螺旋光束角量子数为-2和+4时,经过 M-Z 干涉仪后主要光

束能量主要从 CCD_1 端口输出;由图4(a),(c)能够看出,当入射螺旋光束角量子数为+1和-3时,经

过 M-Z 干涉仪后光束能量主要从 CCD₂ 端口输出. 即采用该装置分离出了角量子数为奇数和偶数的螺旋光束.

3.2. 利用 M-Z 干涉仪分离两个同轴叠加螺旋光束

在实验中我们还通过设计相位调制板生成了包含两个螺旋光束同轴叠加的光束, 图 5(a) 中分别给出了实验中生成的包含角量子数为 +1, +4 和 -2, +5 两个螺旋光束同轴叠加的光强分布图样. 该光束经 M-Z 干涉仪后, 在 CCD₁ 和 CCD₂ 上同时

采集到了输出图样, 如图 5(b), (c) 所示.

由图 5 可以看出, 当待测光束中包含角量子数为 +1, +4 两个同轴叠加螺旋光束时, 角量子数为 +4 螺旋光分量经 M-Z 干涉仪后能量主要从 CCD₁ 端口输出且轨道角动量符号变反, 角量子数为 +1 的螺旋光分量经 M-Z 干涉仪后能量主要从 CCD₂ 端口输出; 当待测光束中包含角量子数为 -2, +5 两个同轴叠加螺旋光束时, 角量子数为 -2 螺旋光分量经 M-Z 干涉仪后能量主要从 CCD₁ 端口输出且轨道角动量符号变反, 角量子数为 +5 的螺旋光分量经

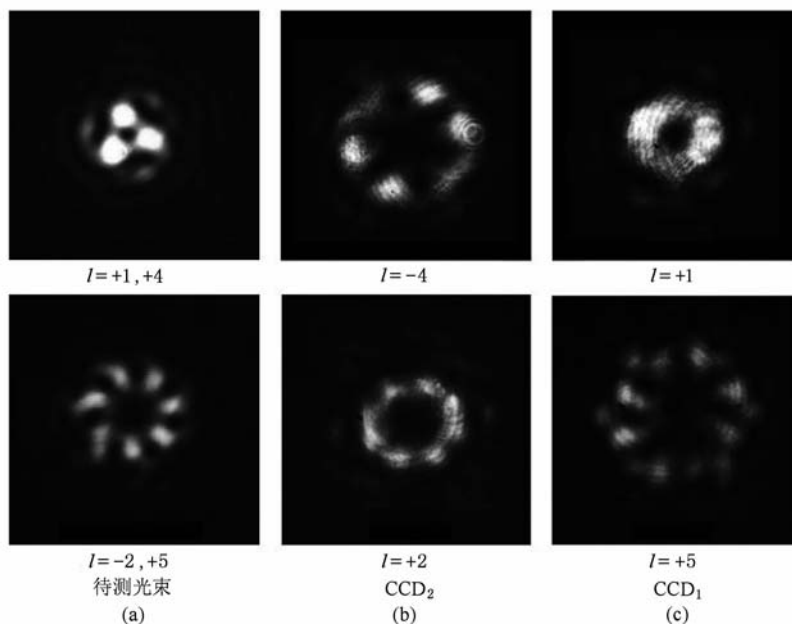


图5 M-Z 干涉仪分离同轴叠加螺旋光束的实验结果

M-Z 干涉仪后能量主要从 CCD₂ 端口输出. 采用该测量装置能够分离出光场中同轴叠加的角量子数为奇数和偶数的螺旋光束.

4. 结 论

本文搭建了一套光束轨道角动量测量系统, 利

用 LC-R 2500 型空间光调制器生成多种具有不同角量子数的光场分布, 对该轨道角动量测量系统的工作情况进行了实验验证. 文中首次报道了利用 M-Z 干涉仪测量系统分离出两个同轴叠加奇偶角量子数螺旋光束的实验结果. 该测量方法可以用于光束轨道角动量信息传输系统中的轨道角动量检测和信息解调.

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
 [2] Bouchal Z, Celechovsky R 2004 *New J. Phys.* **21** 1192
 [3] Liu Y D, Gao C Q, Li F, Gao M W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 854 (in Chinese) [刘义东、高春清、李 丰、高明伟 2007 物理学报 **56** 854]

- [4] Santamato E, Sasso A, Piccirillo B, Vella A 2002 *Opt. Express* **10** 871
 [5] Gao C Q, Gao M W, Weber H 2004 *Optik* **113** 129
 [6] Jeascher A, Fiihrapter S, Maurer C, Bernet S, Ritsch-Marte M 2006 *Opt. Express* **14** 6342
 [7] Morris J E, Carruthers A E, Mazilu M, Reece P J, Cizmar T,

- Fischer P, Dholakia K 2008 *Opt. Express* **16** 10117
- [8] Mair A, Vaziri A, Weihs G, Zeilinger A 2001 *Nature* **412** 313
- [9] Su Z K, Wang F Q, Lu Y Q, Jin R B, Liang R S, Liu S H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3016 (in Chinese) [苏志锷、王发强、路轶群、金锐博、梁瑞生、刘颂豪 2008 物理学报 **57** 3016]
- [10] Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, White A G 1991 *Opt. Lett.* **17** 221
- [11] Gao C Q, Wei G H, Weber H 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 771
- [12] Izdebskaya Y, Shvedov V, Volyar A 2005 *Opt. Lett.* **30** 2472
- [13] Kumar R, Mehta D S, Sachdeva A, Grag A, Senthilkumaran P, Shakher C 2008 *Opt. Express* **281** 3414
- [14] Lin J, Yuan X C, Tao S H, Burge R E 2005 *Opt. Lett.* **30** 3266
- [15] Liu Y D, Gao C Q, Gao M W, Qi X Q, Weber H 2008 *Opt. Commun.* **281** 3636
- [16] Gao C Q, Qi X Q, Liu Y D, Weber H 2010 *Opt. Express* **18** 72
- [17] Gao C Q, Wei G H, Weber H 2000 *Sci. China A* **30** 823 (in Chinese) [高春清、魏光辉、Weber H 2000 中国科学 A **30** 823]
- [18] Beijersbergen M W, Woerdman J P 2005 *Proc of SPIE* **5736** 111
- [19] Leach J, Padgett M J, Barnett S M, Franke-Arnold S, Courtial J 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 257901
- [20] Jassemnejad B, Bohannan A, Lekkl J, Welland K, 2008 *Opt. Eng.* **47** 053001
- [21] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, Vasnetsov M, Paško V, Barnett S M, Franke-Arnold S 2004 *Opt. Express* **12** 5448
- [22] Celechovsky R, Bouchal Z 2007 *New J. Phys.* **9** 328
- [23] Qi X Q, Gao C Q, Liu Y D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 264 (in Chinese) [齐晓庆、高春清、刘义东 2010 物理学报 **59** 264]

Experimental study of detecting orbital angular momentum states of spiral phase beams*

Qi Xiao-Qing Gao Chun-Qing[†]

(School of Optical-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 1 March 2010; revised manuscript received 22 March 2010)

Abstract

An experimental setup was built to detect orbital angular momentum (OAM) states of light beams. The helical beams with different OAM states were generated by using a spatial light modulator. A Mach-Zehnder (M-Z) interferometer was used to detect helical beams with odd or even OAM number. Sorting of coaxial helical beams was also experimentally realized.

Keywords: orbital angular momentum, spiral beams, Mach-Zehnder interferometer

PACS: 42.25. Kb, 42.50. Ex, 42.87. Bg

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60778002).

[†] Corresponding author. E-mail: gao@bit.edu.cn