

利用光束的轨道角动量实现高密度 数据存储的机理研究^{*}

刘义东 高春清 高明伟 李 丰

(北京理工大学信息科学技术学院光电工程系 北京 100081)

(2006 年 5 月 15 日收到 2006 年 8 月 15 日收到修改稿)

光束的轨道角动量本征态可以构建高维 Hilbert 空间, 将之应用于数据存储中, 可以实现比传统方法更高的数据存储密度. 提出了一种用光束轨道角动量实现高密度数据存储的方法, 对存储区域进行相位编码, 通过探测透射光束轨道角动量谱(螺旋谱)的特征来区分由相位编码形成的不同数据态. 四台阶结构相位编码可以实现 57 个不同的数据态, 有望将数据密度提高为传统方法的近 6 倍.

关键词: 光束轨道角动量, 光学存储, 高密度存储

PACC: 4250, 4280T

1. 引 言

在光学存储领域, 提高存储密度是一个重要的技术问题. 传统的提高存储空间密度的方法有两个^[1]: 一是减小 λ/N_A 的数值, 其中 λ 是激光的波长, N_A 是数值孔径; 二是在系统可以承受的信噪比许可的范围内, 减小凹坑的大小, 以降低信噪比为代价来提高数据密度. 由于波长极短的紫外(UV)光源非常昂贵而且不易获得, 数值孔径又不能做得很大, 第一种方法受到很大的限制. 又因为系统的精度和对材料的苛刻要求, 第二种方法也受到很大限制, 由此寻找一种非传统的方法来提高数据的空间密度成为人们关心的一个重要问题.

1992 年 Allen 等人发现具有 $\exp(i l \varphi)$ (l 为整数)形式相位结构的光束的每个光子的平均轨道角动量为 $l\hbar$ ^[2], 这种光束的一个典型实例是拉盖尔-高斯光束. 理论上来说, 所有拉盖尔-高斯光束可以构成无穷维 Hilbert 空间, 使得一个光子可以承载无穷多位数据, 因此利用轨道角动量本征态实现多位数据进而实现高密度数据存储成为一种发展方向. 2004 年 Voogd 等人提出了一种可以实现高密度数据存储的方法^[1], 其主要利用含有轨道角动量的光束具有光学漩涡的特点和衍射成像随着传播距离的旋

转来实现不同数据态的区分, 但是这种方法受调节精度等影响比较严重, 而且需要面阵电荷耦合器件(CCD)探测器测多个位置的图样, 系统较复杂. 本文提出一种新的利用轨道角动量实现高密度数据存储的方法, 通过对四台阶结构(QSS)相位编码, 不同的台阶结构可以改变入射光束的轨道角动量, 探测轨道角动量谱(螺旋谱)可以实现对不同 QSS 的区分, 从而实现高密度数据存储.

2. 轨道角动量谱(螺旋谱)的概念

光束在经过具有一定结构的物体的反射或透射作用后, 会由于其表面或内部的不均匀物理性质而发生幅度和相位的变化, 而这种变化往往会影响光束的轨道角动量, 通过分析反射光或者透射光的轨道角动量, 可以得到物体的一些性质. Molina-Terriza 等人将光束展开成螺旋谐波函数 $\exp(i n \varphi)$ 的线性叠加^[3,4], 形成轨道角动量谱. Torner 等人采用这种方法试图通过分析具有特定的轨道角动量的光束(如轨道角动量为 0 的高斯光束)经目标反射或透射后的各轨道角动量态上的成分来分析目标的性质, 并将轨道角动量谱称作螺旋谱^[5]. 在他们的工作中, 用几个典型的实验, 研究了经过相位突变、相位梯度、幅度梯度的情况下的螺旋谱的特征.

^{*} 教育部博士点基金(批准号 20050007027)和教育部“新世纪优秀人才”计划资助的课题.

设入射光束为基模高斯光束 $u_{00}(\rho, z)$, 目标物体对其的变化为函数 $h(\rho, \varphi)$, 经过作用后的场为 $u(\rho, \varphi, z) = u_{00}(\rho, z)h(\rho, \varphi)$. 将之按螺旋谐波函数 $\exp(in\varphi)$ (n 为整数) 展开可以得到

$$u(\rho, \varphi, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n(\rho, z) \exp(in\varphi), \quad (1)$$

其中展开系数为

$$a_n(\rho, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{2\pi} u(\rho, \varphi, z) \times \exp(-in\varphi) d\varphi, \quad (2)$$

对径向积分可以得到

$$C_n = \int_0^{\infty} |a_n(\rho, z)|^2 \rho d\rho, \quad (3)$$

需要注意的是, 其值不依赖于 z 坐标. 进而可以求得螺旋谱

$$P_n = C_n / \sum_{q=-\infty}^{+\infty} C_q, \quad (4)$$

其中, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$. 如果 C_n 的积分上限有限, 并不影响螺旋谱结构. 本文将通过分析 P_n 来判断目标 $h(\rho, \varphi)$ 的特征, 具体确定目标的状态, 实现同一存储单元上的多位数据.

3. QSS 函数 $h(\rho, \varphi)$ 的构建

Voogd 等人让光束通过具有 QSS 结构产生具有光学漩涡的光束, 通过测量光束的像平面附近的图像, 判断光束的旋转方向和图像形状, 实现多位数据^[1]. 这样的 QSS 的典型尺寸为 $0.6\lambda/N_A$. 本文对 QSS 的四个台阶进行编码, 测量作用后光束的螺旋谱结构. 图 1 是 QSS 的示意图. 其中的 ABCD 四个台阶对入射光产生不同的相位延迟, 对于反射型和透射型的结构, 可以直接用各自产生的相位延迟来描述, 而不具体考察其几何结构. 设 QSS 的四个台阶对入射光的作用都只是相位延迟, 没有幅度的变化, 其作用只是相位变化. 考虑每个台阶能实现 $\pi/4$ 的

整数倍的相位延迟, 其对入射光的变化函数可以表示成如下的形式:

$$h(\rho, \varphi) = \begin{cases} \exp(-im_A\pi/4) & A: 0 \leq \varphi < \pi/2, \\ \exp(-im_B\pi/4) & B: \pi/2 \leq \varphi < \pi, \\ \exp(-im_C\pi/4) & C: \pi \leq \varphi < 3\pi/2, \\ \exp(-im_D\pi/4) & D: 3\pi/2 \leq \varphi < 2\pi, \end{cases} \quad (5)$$

其中 m_A, m_B, m_C 和 m_D 的取值为 $0, 1, 2, 3$ 或 4 之一, 反映相位延迟程度.

将 (5) 式结合 (2) (3) 和 (4) 式可以得到螺旋谱表达式

$$P_n = \frac{1}{16} \text{sinc}^2\left(\frac{\pi}{4}n\right) \left| \exp\left[-i\frac{\pi}{4}(m_A+n)\right] + \exp\left[-i\frac{\pi}{4}(m_B+3n)\right] + \exp\left[-i\frac{\pi}{4}(m_C+5n)\right] + \exp\left[-i\frac{\pi}{4}(m_D+7n)\right] \right|^2. \quad (6)$$

要实现应用螺旋谱区分不同的 QSS, 必须考查台阶结构与螺旋谱的对应关系. 根据入射高斯光束强度与相位的绕轴旋转分布和沿传播方向的周期性分布特征, 可以得到 QSS 台阶参数的排列 (m_A, m_B, m_C, m_D) 的规则, 以实现台阶结构与螺旋谱的一一对应关系:

1) 台阶参数顺序旋转 ($A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$) 任意次数后不得与原来的台阶相同.

2) 台阶参数同时增加或减少整数后再对 4 求模, 得到的结果必须满足条件 1).

3) 台阶参数的对偶再翻转一次即 ($4-m_A, 4-m_B, 4-m_C, 4-m_D$) 必须满足条件 2).

4) 如经上述三点得到 $(0, 0, 4, 0)$ ($0, 1, 4, 1$), $(0, 2, 4, 2)$ ($0, 3, 4, 3$) 和 $(0, 4, 4, 4)$, 则被视为同一排列.

经过上述的规则约束, 可以得到满足条件的排列共有 57 个, 即四个台阶可以形成 57 个不同的可以由螺旋谱区分的排列. 经分析知, 可以取 $m_A = 0$ 的台阶为四个台阶的参考零相位面, 其他的几个台阶的相位延迟都从这个相位开始计算. 当高斯光束照射这 57 种排列的 QSS 的时候, 将会得到 57 种不同的螺旋谱形式, 进而实现对 57 个态的完全探测.

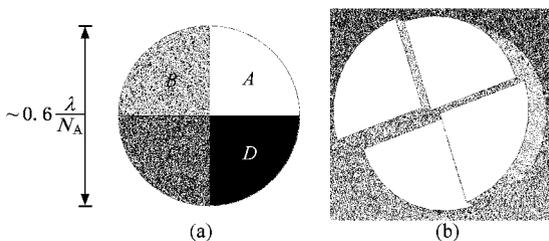


图 1 QSS 示意图 (a) 灰度表示不同相位延迟 (b) 为立体图

由此可以在同一个存储单元上存储多位数据(近 6 bits $2^6 = 64$),而传统的光存储方式在同一个存储单元上只能实现 1 位数据,即两个态,因此这将使得存储密度将是传统方法的近 6 倍.而该方法的实现取决于如何区分这 57 个态,这四点规则可以通过(6)式加以检验.

4. 系统光学结构和螺旋谱的探测

为了应用轨道角动量实现这 57 种结构的区分,本文设计如下光学系统.图 2 是系统原理图.会聚透镜 L_1 将基模高斯光束会聚到 QSS 上,形成直径约为 $0.6\lambda/N_A$ 的光斑,经过 QSS 作用 $h(\rho, \varphi)$ 使光束获得轨道角动量,再经过准直透镜 L_2 准直后照射到复合相位光栅上,在其后的不同位置上形成相应的光斑,使用面阵 CCD 探测器测量不同位置的光强分布,由此得到轨道角动量谱分布.与文献[1]的图 1 的对比可以看出,本方法具有结构简单,除了调节 QSS 的位置外不需要其他的调节, QSS 的旋转对探测结果没有影响.

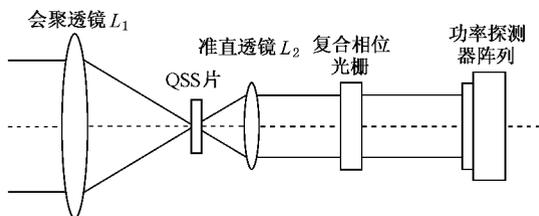


图 2 光学系统示意图

目前测量光束轨道角动量的方法有多种,如干涉法、光栅法、光束二阶矩法等^[6-9],其中区分轨道角动量谱的方法主要的有两种:一种是 Leach 等人提出的干涉法^[6],用级联的 Mach-Zehnder 干涉仪对不同的轨道角动量的成分进行分离;另一种方法是采用 Gibson 等人的复合光栅方法的复杂的全息光栅进行分离^[7].由于复合光栅的结构紧凑,易于调节,可以用计算机生成,因此本文采用复合光栅来对具有不同轨道角动量的分量进行区分.图 3 是复合光栅示意图.当光束照射复合光栅的中心的时候,具有相应的轨道角动量的成分将在相应的位置上出现光点,光点的强度就是该分量的强度,由此可以得到光束的轨道角动量谱.例如,当轨道角动量量子数为 2 的光束照射到光栅上的时候,将会在图 3 中 -2 的位置的中心出现亮斑,而别的位置的中心均为暗斑.

配合针孔可以测定各位置上的光强来获得光束的轨道角动量谱.这种复合光栅的详细构建方法在 Gibson 的工作^[7]和文献[10]等文献中有详细的阐述.

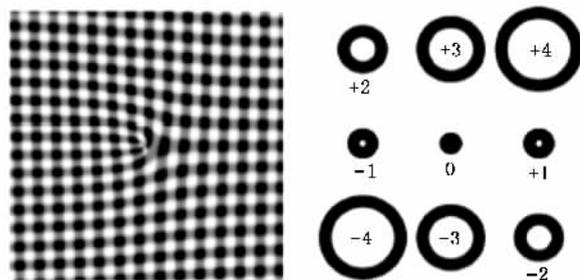


图 3 复合相位光栅^[7]

5. 螺旋谱的讨论和分析

图 4 是 (m_A, m_B, m_C, m_D) 为 $(0, 0, 0, 1)$, $(0, 0, 0, 2)$, $(0, 0, 0, 3)$ 和 $(0, 0, 0, 4)$ 时的螺旋谱,这是一种对称结构,形成 4 种不同的螺旋谱图样.图 5 是一种非对称结构的螺旋谱 (m_A, m_B, m_C, m_D) 为 $(0, 1, 2, 3)$, $(0, 3, 2, 1)$, $(0, 1, 2, 4)$ 和 $(0, 4, 2, 1)$,可以看出通过调整台阶的组合,可以从测得的螺旋谱获知左旋和右旋的信息,而且台阶变化的缓急表现在螺旋谱上的非零级次和零级的强度对比.通过分析这些谱线的特征,可以判断 QSS 的台阶结构.

要获得 QSS 的状态,需要 3 个独立的参数 m_B , m_C 和 m_D 确定,可以通过三个对应不同的 P_n 的方程(6)联立求解得到.进一步分析(6)式可以得到,螺旋谱谱线中只有三条是独立的.由于螺旋谱主瓣内的 $0, \pm 1, \pm 2$ 和 ± 3 级谱线的值相对比较大,有利于探测,因此可以在其中选择三条独立的谱线进行探测.因此可以直接采用图 3 所示的复合相位光栅,在 $0, \pm 1, \pm 2$ 和 ± 3 级对应的位置放置功率探测器,通过选择其中值最大的三条进行判断,可以对 (m_A, m_B, m_C, m_D) 的 57 种组合进行区分.如在图 4 中可以通过探测 0 级, ± 1 级来判断 QSS 结构,这三条谱线相对比较强而且相互独立.注意到只有三条是独立的,因此有望通过其他没有应用的谱线进行分析实现纠错.

由于螺旋谱的结构复杂,本文还没有找到简单的方法对螺旋谱进行编码,从而得到螺旋谱的编码与台阶的编码的对应方式.在这种情况下可以将 57 种螺旋谱的结构和数值存储起来,制成表让其与台

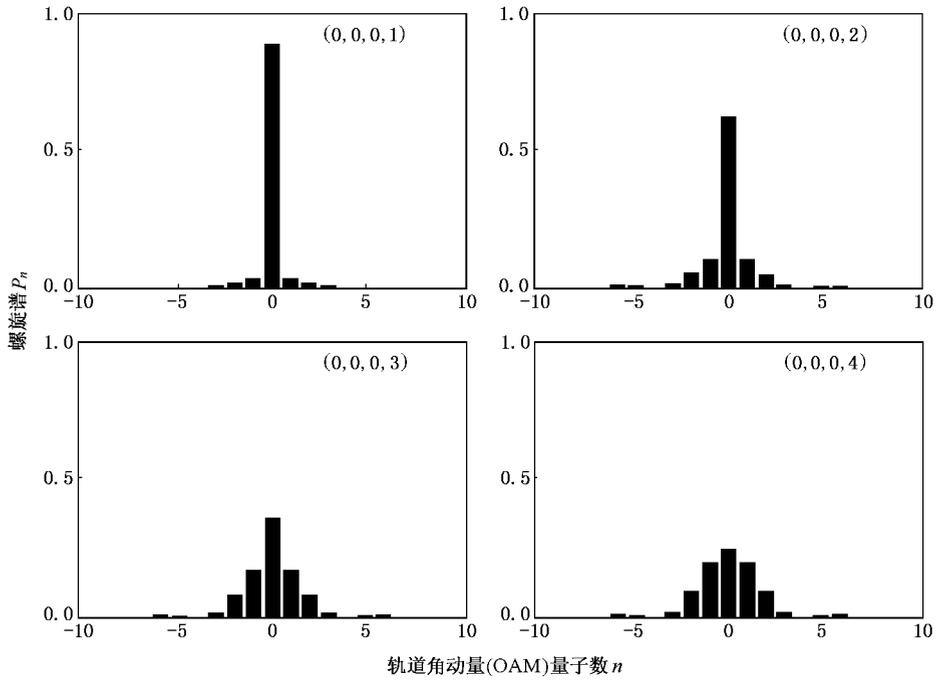


图 4 对称形式的螺旋谱

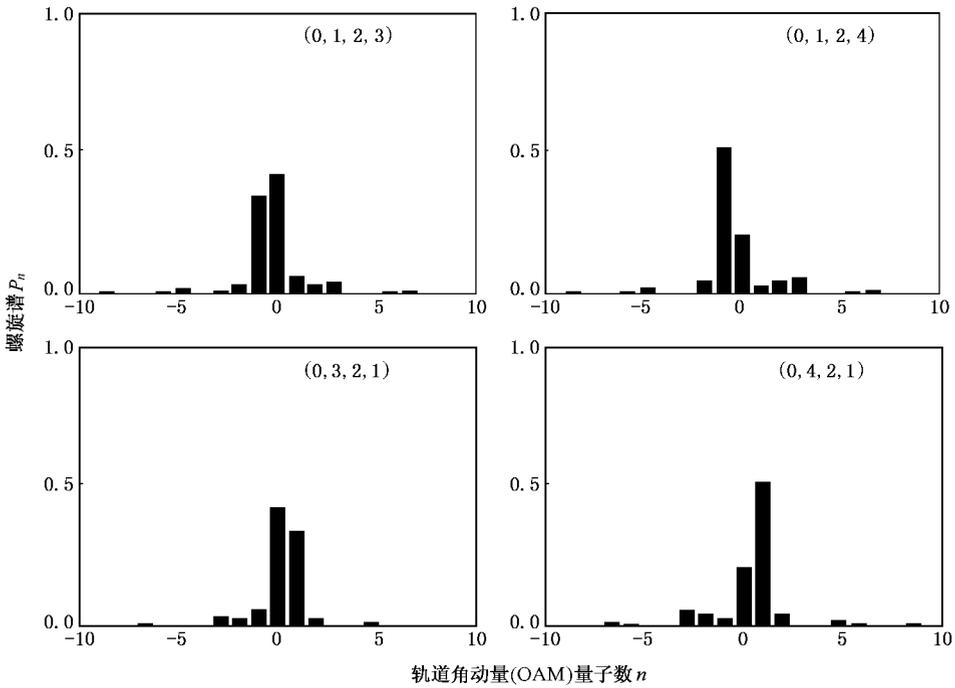


图 5 非对称形式的螺旋谱

阶组合对应.根据接收到的螺旋谱可得到最初的台阶组合,从而实现解码.

6. 结 论

提出一个用光束轨道角动量实现高密度数据存储的方法,对存储区域进行相位编码,通过探测透射

光束轨道角动量谱(螺旋谱)的特征来区分由相位编码形成的不同数据态. 该方法的核心是应用轨道角

动量实现多个态的区分, 而目前常用的其他方法(如应用光的偏振特性)只能实现两个态的区分.

- [1] Voogd R J , Singh M , Braat J J M 2004 *Proc. of SPIE* **5380** 387
- [2] Allen L , Beijerbergen M W , Spreeuw R J C , Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [3] Cohen-Tannoudji C , Diu B , Laloë F 1977 *Quantum Mechanics* (Paris : Wiley and Hermann) p1459
- [4] Molina-Terriza G , Torres J P , Torner L 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 013601
- [5] Torner L , Torres J P , Carrasco S 2005 *Opt. Exp.* **13** 873
- [6] Leach J , Padgett M J , Barnett S M , Franke-Arnold S , Courtial J 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 257901-1
- [7] Gibson G , Courtial J , Vasnetsov M , Barnett S , Franke-Arnold S , Padgett M 2004 *Proc. of SPIE* **5550** 367
- [8] Gao C 1999 *Characterization and Transformation of astigmatic laser beams* (Berlin : Wissenschaft and Technik Verlag) p71
- [9] Ye F W , Li Y P 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 328 (in Chinese) [叶芳伟、李永平 2003 物理学报 **52** 328]
- [10] Gerchberg R W , Saxton W O 1972 *Optik* **35** 237

Realizing high density optical data storage by using orbital angular momentum of light beam *

Liu Yi-Dong Gao Chun-Qing Gao Ming-Wei Li Feng

(Department of Optical-Electronics , School of Information Science and Technology ,
Beijing Institute of Technology , Beijing 100081 , China)

(Received 15 May 2006 ; revised manuscript received 15 August 2006)

Abstract

The orbital angular momentum (OAM) states can be used to construct a high-dimensional Hilbert space , which implies higher data density when applied in data storage . This work proposes a method to realize high density optical data storage by using OAM of light beam , with the encoded area illuminated by a light beam with certain OAM resulting in distribution of power in the OAM states (the spiral spectrum or OAM spectrum) , and detection of the power distribution conducting to its decoding . A quadrant staircase structure (QSS) used as an encoded element can realize 57 different states , and it is expected to enhance the data density 6 times as high as the conventional method .

Keywords : orbital angular momentum , optical storage , high density storage

PACC : 4250 , 4280T

* Project supported by the Doctoral Fund of Ministry of Education of China (Grant No. 20050007027) and by the Program for New Century Excellent Talents in University (NCET) .