

# 利用具有轨道角动量的光束实现微粒的旋转\*

高明伟 高春清† 何晓燕 李家泽 魏光辉

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

(2003 年 2 月 10 日收到, 2003 年 4 月 16 日收到修改稿)

采用扭转柱面镜光学系统将半导体激光抽运固体激光器产生的厄米高斯光束变换成为具有轨道角动量的扭转对称光束. 利用该光束具有的轨道角动量特性研制成功了“光学扳手”, 利用“光学扳手”实现了对微米量级微粒的俘获和旋转.

关键词: 轨道角动量, 扭转对称光束, 光学扳手, 光束变换

PACC: 3280P, 6180P

## 1. 引 言

20 世纪 70 年代 Ashkin 在实验中观察到光镊现象. 这一现象引起了物理学者和生物学者的极大兴趣. 人们在利用光镊实现了对微米、亚微米微粒的俘获、平移后正在进行更深入的研究<sup>[1-3]</sup>. 20 世纪 90 年代人们又发现环形光场分布的光束不仅可以提高光镊中光束对微粒的俘获效率, 而且某些环形光束(如拉盖尔高斯光束)所携带的轨道角动量可以传递给吸收性的微粒, 驱动微粒旋转<sup>[4,5]</sup>. 这一发现为生物技术、材料科学以及原子物理的诸多应用领域提供了一种新的实验工具. 它显示某些光束不仅可以实现对微粒的无接触俘获和平移, 而且还可实现对微粒的无接触旋转. 这种利用光束的角动量实现对微粒的无接触旋转同我们生活中使用的扳手很相似. 因此人们形象地把这种工具称为“光学扳手”. 本文利用光学变换的方法将半导体激光抽运固体激光器产生的厄米高斯光束变换成为具有轨道角动量的环形扭转对称光束, 研制成功了“光学扳手”, 并利用该光学扳手实现了对直径  $8\mu\text{m}$  左右的微粒的俘获和无接触旋转.

## 2. 光束的轨道角动量

近年来的研究表明, 光束的角动量有两种: 一种

是由于光束的偏振特性产生的角动量; 另一种由于光束具有螺旋形相位结构(扭转位相)而产生的轨道角动量<sup>[6-8]</sup>. 1936 年 Beth<sup>[6]</sup>使圆偏振光通过一个用石英光纤悬挂的半波带板, 首先观察到了由于光束的圆偏振特性引起的角动量, 并通过精确测量光纤的扭矩发现此角动量与量子自旋有关. 而光束的轨道角动量一直被人们所忽略, 只是近年来才发现当光束含有角向相关的位相分布时(扭转位相或螺旋位相), 此类光束具有与角向位相分布有关的角动量, 被称为轨道角动量. 如果该光束的光场函数为

$$u(r, \phi) = f(r) \cdot \exp[i g(\phi)], \quad (1)$$

则该光束的轨道角动量为<sup>[7,8]</sup>

$$J_{z, \text{orb}} = -\frac{2P}{\omega} \frac{\partial g(\phi)}{\partial \phi}, \quad (2)$$

其中  $r$  为位置矢量,  $g(\phi)$  表示光束的扭转位相,  $\omega$  是光场的角频率,  $P$  为光束的功率.

一种典型的具有轨道角动量的光束是拉盖尔高斯光束, 其在极坐标下的光场形式可以表示为

$$\begin{aligned} E_{pl}(r, \phi, z) = & c_{pl} \frac{\omega_0}{\omega(z)} \left( \frac{\sqrt{2}r}{\omega(z)} \right)^l L_p^l \left( \frac{2r^2}{\omega^2(z)} \right) \\ & \times \exp(-il\phi) \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right] \\ & \times \exp\left\{-i\left[kz + \frac{kr^2}{2R(z)}\right.\right. \\ & \left.\left. - (2p + l + 1)\varphi(z)\right]\right\}, \quad (3) \end{aligned}$$

其中  $L_p^l$  为拉盖尔多项式,  $p$  表示沿径向的节线圆的

\* 国家自然科学基金(批准号 69908001), 国家自然科学基金对外合作项目和教育部优秀青年教师资助计划资助的课题.

† E-mail: gao@bit.edu.cn, Tel: (010) 68912574

数目,  $l$  表示沿辐角方向的节线的数目,  $\omega_0$  为光束的束腰半径,  $\omega(z)$  为光束沿传输方向位置  $z$  处的光斑半径,  $R(z)$  是光束的波前曲率半径,  $\phi$  是光束传输时产生的附加相移. 由于  $l \neq 0$  的拉盖尔高斯光束含有角向位相项  $\exp(-i\phi)$ , 因此其具有轨道角动量

$$J_{z,L} = -\frac{2lP}{\omega}. \quad (4)$$

### 3. 具有轨道角动量光束的产生

产生具有轨道角动量(具有扭转位相)的光束一般有以下几种方法: 1) 从激光谐振腔中直接产生. 这种方法可产生拉盖尔高斯光束, 但由于在实验中需要谐振腔具有严格的轴对称性, 因此较难获得稳定的激光输出. 2) 采用螺旋波带板或全息光学转换板将高斯光束变换为拉盖尔高斯光束<sup>[9,10]</sup>, 但螺旋波带板或全息光学转换板需要特殊加工, 光束经过这些光学元件变换损耗也较大. 3) 利用柱面镜构成的非轴对称光学系统将厄米高斯光束变换为扭转对称光束, 如拉盖尔高斯光束, 其优点是可使用柱面镜等常规光学元件, 简单方便, 当所使用的柱面镜表面镀对入射光的增透膜后可忽略柱面镜的反射损耗, 转换效率高. 我们采用第三种方法获得具有轨道角动量的环形对称光束, 所采用的非对称光学系统是由三个焦距依次为  $f/2$ ,  $f$ ,  $f/2$ 、对称轴互相垂直的柱面镜构成的光学系统, 其结构如图 1 所示, 其中各柱面镜之间的间距为  $f/2$ ,  $f$  根据入射的厄米高斯光束的瑞利长度而定, 入射光束的对称轴与非对称柱面镜系统的对称轴成  $45^\circ$ .

当入射的厄米高斯光束通过柱面镜光学系统后出射光束的光场分布可由以下方程计算<sup>[11]</sup>:

$$E_{\text{out}}(x_2, y_2) = \sqrt{\frac{-ik}{2\pi f}} \iint E_{\text{in}}(x_1, y_1)$$

$$\times \exp\left(-\frac{ik}{f}x_2(x_1 \cos\alpha + y_1 \sin\alpha)\right) \\ \times \delta(y_2 + y_1 \cos\alpha - x_1 \sin\alpha) dx_1 dy_1, \quad (5)$$

其中  $x_1, y_1$  为入射光束的对称轴坐标,  $x_2, y_2$  为出射光束的对称轴坐标,  $\alpha$  为两坐标系之间的夹角. 对于厄米高斯光束  $\text{TEM}_{m,0}$ , 其光场分布为

$$E_{\text{in}}(x_1, y_1) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2^m m!} \omega_0} H_m\left(\frac{\sqrt{2}x_1}{\omega_0}\right) \\ \times \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{\omega_0^2}\right), \quad (6)$$

其中  $H_m$  为厄类多项式. 将方程(6)代入方程(5)可得出射光束的光场分布为

$$E_{\text{out}}(r_2, \varphi_2) = \frac{1}{\omega_0} \sqrt{\frac{-i}{\pi m!}} \cdot \left(\frac{\sqrt{2}ir_2}{\omega_0}\right)^m \\ \times \exp\left\{-\frac{r_2^2}{\omega_0^2}\right\} \exp\{-im\varphi_2\}. \quad (7)$$

由方程(7)可知出射光束具有环形的强度分布和角向位相分布, 比较方程(7)与方程(3)发现变换后产生的光束在强度分布和空间位相分布上与拉盖尔高斯光束  $E_{0,m}$  相同. 图 2 是用(7)式计算的两种不同阶次的厄米高斯光束( $\text{TEM}_{2,0}$  和  $\text{TEM}_{4,0}$ )的光斑图形以及经过柱面镜系统变换后得到的光斑图形.

实验中用经过快轴准直的 1W 的半导体激光器作为抽运源(波长 808nm), 通过一个焦距为 10mm 的耦合透镜将抽运光聚焦到 Nd:YAG 晶体上, 晶体尺寸为  $\phi 6\text{mm} \times 5\text{mm}$ , 晶体的前端面镀 808nm 的增透膜和 1064nm 的全反膜, 晶体的后端面镀 1064nm 的增透膜, 输出镜采用曲率半径为 100mm 的凹面镜, 其对 1064nm 的透过率为 3%. 输出镜后采用模式匹配透镜使变换后的激光束的瑞利长度与柱面镜的焦距相匹配. 我们通过改变抽运光束的光轴与 Nd:YAG 激光器的谐振腔光轴的横向相对位置来获得不同阶次的厄米高斯光束. 光束变换系统的三个柱面镜的

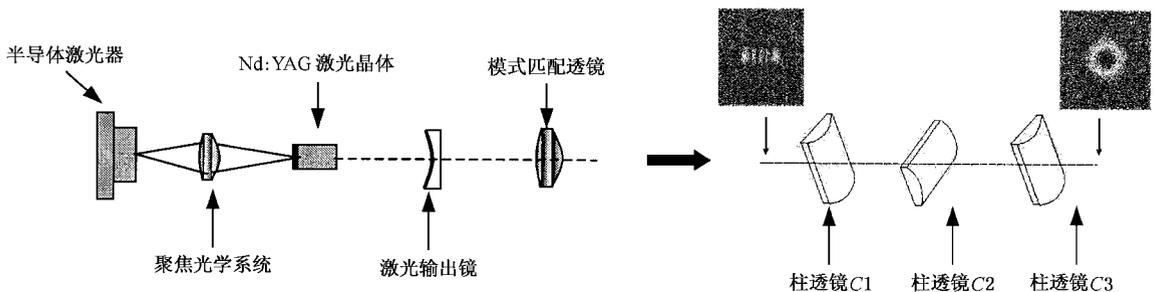


图 1 厄米高斯光束的产生及其光束变换

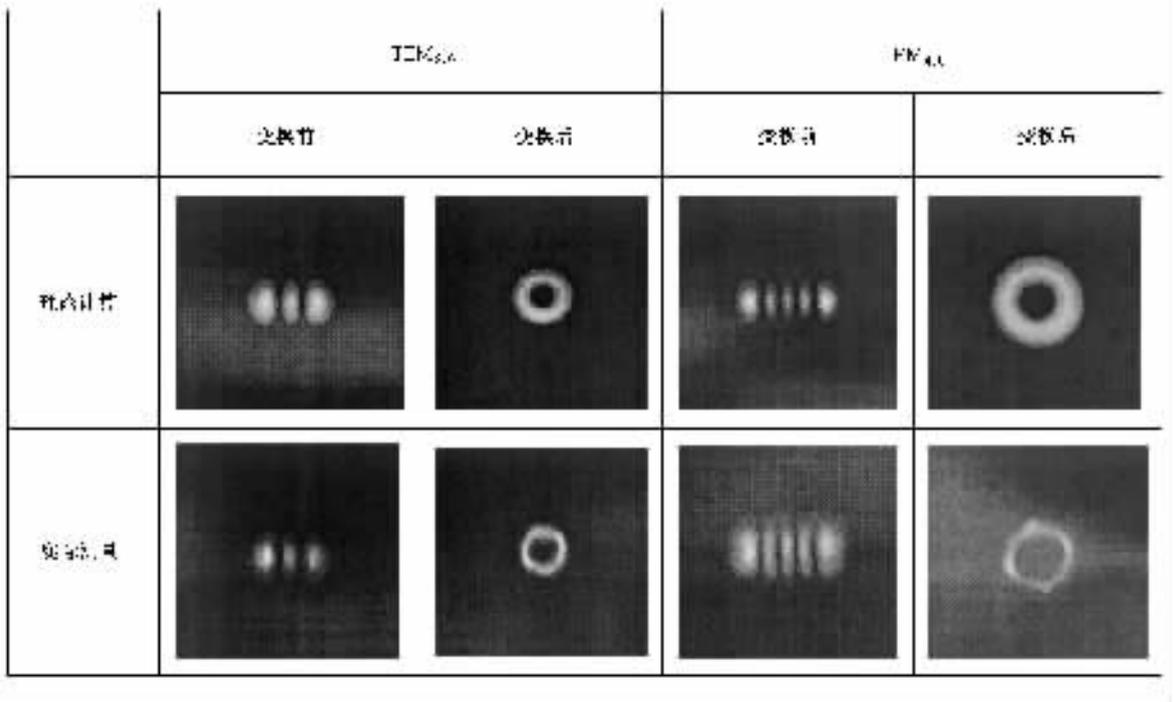


图 2 扭转柱面镜系统变换前后的理论计算光斑与实际测量光斑

焦距分别为 100mm,200mm,100mm,间距为 100mm,柱面镜的对称轴相对于入射的厄米高斯光束的对称轴旋转 45°.

### 4. 光学扳手及其对微粒的俘获和旋转

光学扳手的实验装置如图 3 所示. 实验中通过调整抽运光的位置,使 Nd:YAG 激光器的输出模式

为 TEM<sub>4,0</sub>. 当 TEM<sub>4,0</sub> 模经过光学变换系统后,获得了如图 2 所示的环形对称光束. 该环形对称光束首先通过一个 10 倍的扩束镜扩束,其目的是减小入射光束的发散角,使扩束后的光束经过高倍显微物镜聚焦后的光斑半径为微米量级,扩束镜倍数应满足扩束后的光束的直径充满显微物镜的通光孔径. 经过扩束镜后的环形激光束由一块 1064nm 的 45°高反镜反射进入显微物镜,实验中采用的显微物镜是 100

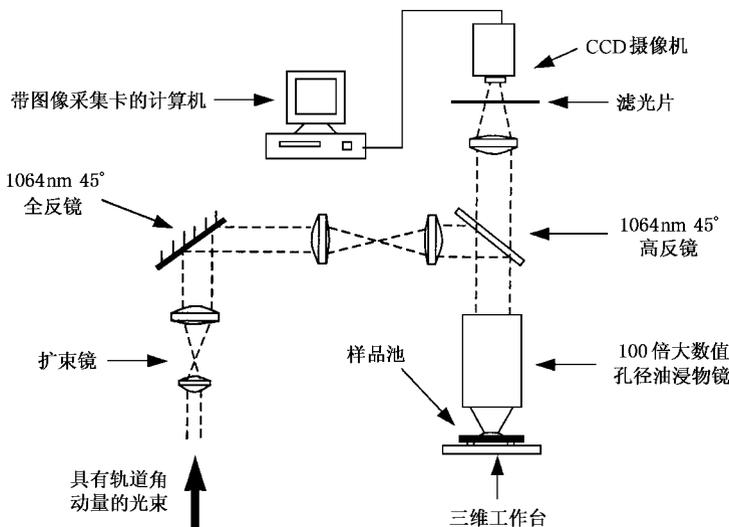


图 3 “光学扳手”实验系统图

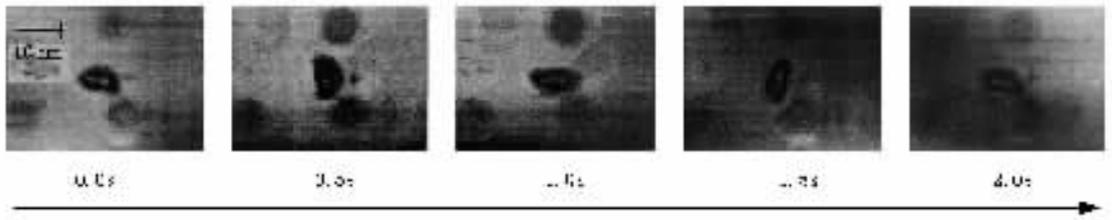


图4 微粒在光学扳手中的旋转情况,微粒沿顺时针方向旋转,旋转的转速为0.5Hz

倍的油浸物镜,其数值孔径是1.25,用以实现对入射环形光束的聚焦.样品池由载玻片与盖玻片之间夹一层 $70\mu\text{m}$ 的薄膜制成,实验中所选定的样品为直径 $8\mu\text{m}$ 左右的微粒,利用蒸馏水作为溶剂.

在光学扳手实验装置中我们用两种方式对微粒进行观察,一是由显微物镜和目镜组成的目视观察系统,另一个是由显微镜和面阵CCD构成的观察系统.面阵CCD采集的图像由图像采集卡实时采集,操作者在计算机屏幕上观察微粒的状态.为了方便观察我们选择了一个不规则的微粒作为实验对象.图4为图像采集卡记录下的样品微粒旋转的图像,其中位于图像中央的不规则颗粒是所选用的微粒,对应的入射环形扭转对称光束的功率为30mW.由于所采用的光束具有轨道角动量,因此在实验中观察到此微粒在光场的作用下以0.5Hz的转速旋转.实验中每隔0.5s采一幅图像,从采集下来的图像可以看出图像中间的微粒随着时间的变化顺时针旋转,而背景的其他微粒及这些微粒之间的相对位置不发生任何变化.

当增大入射的环形光束的功率时,观察到微粒的旋转速度加快,反之变慢.在保持光束功率不变的情况下,改变入射光束的模阶次,可以看到微粒的旋转速度随光束模阶次的升高而加快,即随着入射激光轨道角动量的增大而变快.在保持环形光束模阶次不变的情况下,微粒的旋转角速度与入射环形光

束的功率之间的关系如图5所示.

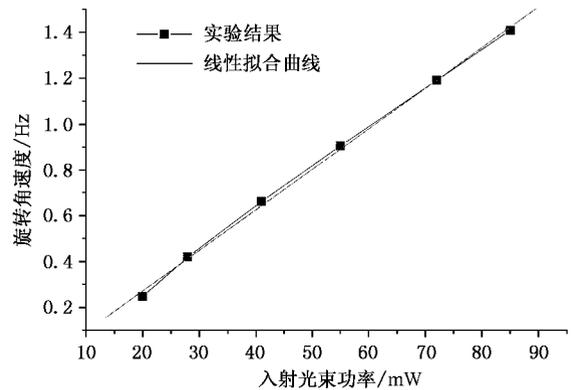


图5 微粒的转速与入射光束功率之间的关系

## 4. 结 论

我们利用非对称柱面镜系统把半导体激光抽运Nd:YAG激光器产生的厄米高斯光束变换为具有轨道角动量的扭转对称环形光束,并利用这种光束研制成功了“光学扳手”,实现了对直径 $8\mu\text{m}$ 左右的微粒的俘获、平移和旋转.此研究在生物医学领域将有重要应用价值.

作者感谢德国研究基金会(DPG)对此项目中所进行的国际合作研究工作的支持.

[1] Ashkin A and Dziedzic J 1975 *Sciences* **187** 1073  
 [2] Felgner H, Müller O and Schiwa M 1995 *Appl. Opt.* **34** 977  
 [3] Wright W, Sonek G and Berns M 1994 *Appl. Opt.* **33** 1735  
 [4] Simpson N, Mcgloin N, Dholakia K, Allen L and Padgett M 1998 *J. Mod. Opt.* **45** 1943

[5] Simpson N, Dholakia K, Allen L and Padgett M 1997 *Opt. Lett.* **22** 52  
 [6] Beth R A 1936 *Phys. Rev.* **50** 115  
 [7] Gao C, Wei G and Weber H 2000 *Science in China (A)* **30** 823  
 [8] Padgett M and Allen L 1999 *Opt. Quan. Elec.* **31** 1

- [ 9 ] Beijersbergen M , Coerwinkel R , Kristensen M and Woerdman J Wegener M 1992 *Opt. Quan. Elec.* **24** 951  
1994 *Opt. Comm.* **112** 321 [ 11 ] Gao C , Wei G and Weber H 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 771
- [ 10 ] Heckenberg N , McDuff R , Smith C , Rubinsztein-Dunlop H and

## Rotation of particles by using the beam with orbital angular momentum \*

Gao Ming-Wei Gao Chun-Qing<sup>†</sup> He Xiao-Yan Li Jia-Ze Wei Guang-Hui

( Department of Opto-electronics , Beijing Institute of Technology , Beijing 100081 , China )

( Received 10 February 2003 ; revised manuscript received 16 April 2003 )

### Abstract

The twisted stigmatic beam with an orbital angular momentum was generated by transforming the Hermitian-Gaussian beam of a laser-diode-pumped solid-state laser through a rotated cylindrical lens system. By utilizing the orbital angular momentum of the generated beam , an “ optical spanner ” was designed and developed. By using the optical spanner micro-sized particles were trapped and rotated.

**Keywords** : orbital angular momentum , twisted stigmatic beam , optical spanner , beam transformation

**PACC** : 3280P , 6180P

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 69908001 ) and the Foundation for Excellent Young Teachers by the MOE of China .

<sup>†</sup> Corresponding author : Tel : ( 010 ) 68912574 , E-mail : gao@bit.edu.cn