

一种新空心光束的理论及实验研究*

张 蕾 蔡阳健 陆璇辉†

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室光学研究所, 光及电磁波研究中心, 杭州 310027)

(2003 年 2 月 17 日收到, 2003 年 7 月 29 日收到修改稿)

提出了一种用来描述空心光束的新理论模型——空心高斯光束模型, 通过控制光束参数可以方便地调制空心光束黑斑的大小, 导出了空心高斯光束经傍轴光学系统的解析传输变换公式, 利用导出的公式计算分析了空心高斯光束在自由空间的传输特性, 在实验上利用矩阵本征值方法设计了能输出空心高斯光束的光学谐振腔, 对实验上得到的空心高斯光束进行了传输特性的研究, 结果表明, 理论和实验相吻合, 该空心高斯光束产生的光势阱为控制冷原子提供了一条新途径.

关键词: 空心高斯光束, 光学谐振腔, 传输特性

PACC: 4225B, 4260D, 4260

1. 引 言

近年来, 有关空心光束产生和应用的研究已经成为一个很重要的课题, 在激光加工和原子冷却等方面都有广泛应用, 通过空心光束产生的偶极势已经实现了对原子的引导^[1-3], 国内外也做了不少用空心光束引导俘获冷原子的理论计算^[4-6]. 其中, Yin 等人最近的研究表明可以通过蓝失谐的空心光束来实现 BEC^[7]. 目前为止, 实验上已获得多种产生空心光束的方法, 如横模选择法^[8]; 几何光学法^[9]; 光学全息法^[10]; 计算机全息法^[11]; 模式转换法^[12]和旋转棱镜法^[3, 13]等, 上述方法都是通过腔外变换实现的, 空心光束的中心都不是完全黑的. 理论上, 人们也提出了几种用来描述空心光束的方法, 常用的一种是 TEM₀₁^{*}, 同向传输的 TEM₀₁^{*} 光束首次实现了原子的会聚透镜功能^[14], 也可用来俘获原子^[1]; 另一个用来描述空心光束的模型是高阶贝塞尔光束, 该光束可通过旋转棱镜法获得. 本文提出了一种用来描述空心光束的新模型——空心高斯光束模型, 导出了其经过傍轴光学系统传输的解析式; 研究了它在自由空间的传输特性; 实验上设计了能产生空心高斯光束的谐振腔并获得了空心光束.

2. 空心高斯光束的定义及其传输特性

我们把空心高斯光束在 $z = 0$ 处的光场分布定义成如下形式:

$$E_n(r, 0) = G_0 \left(\frac{r^2}{\omega_0^2} \right)^n \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中 n 为空心高斯光束的阶数, G_0 为一常数. 当 $n = 0$ 时, 方程 (1) 就退化到一般光斑半径为 ω_0 的高斯光束. 图 1 给出了不同阶数的空心高斯光束的归一化二维光强分布图, 计算中取 $\omega_0 = 1\text{mm}$. 从图中可以看出, 当阶数 n 变大时, 空心光束的亮环半径增大, 黑斑区域面积增大.

在傍轴近似下, 任何光束通过傍轴光学系统传输满足柯林斯公式, 在柱坐标下, 柯林斯公式可以表述为

$$E(r, z) = \frac{i}{\lambda B} \exp(-ikz) \int_0^{2\pi} \int_0^\infty E_0(r', 0) \times \exp\left\{-\frac{ik}{2B} [Ar'^2 - 2r'r\cos(\theta - \theta') + Dr'^2]\right\} r' dr' d\theta', \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(批准号: 10334650)资助的课题.

† E-mail: xhlu@mail.hz.zj.cn

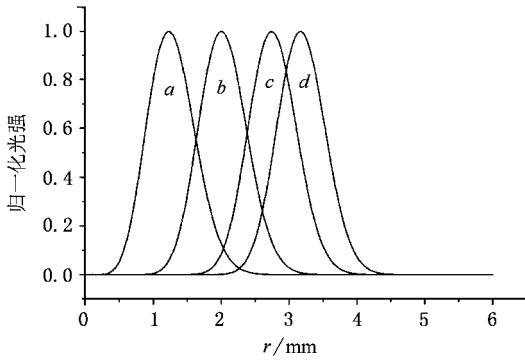


图1 不同阶数的空心高斯光束的归一化二维光强分布图 (曲线 a , b , c , d 分别为 $n = 3, n = 5, n = 8, n = 15$)

其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为光波长, A, B, C, D 为傍轴光学系统的变换矩阵元.

把 (1) 式中的 $E_n(r, 0)$ 当作 $E_0(r', 0)$ 代入 (2) 式, 并运用积分公式

$$J_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(ix \cos\theta') d\theta', \quad (3)$$

则 (2) 式可化为

$$E(r, z) = \frac{i}{\lambda B} \exp(ikz) \exp\left(-\frac{ikDr^2}{2B}\right) \int_0^\infty E_n(r', 0) \times \exp\left(-\frac{ikAr'^2}{2B}\right) J_0\left(\frac{krr'}{B}\right) r' dr'. \quad (4)$$

再用积分公式^[15]

$$\int_0^\infty \exp(-pt) t^{n/2+n} J_n(2\alpha^{1/2} t^{1/2}) dt = n! a^{n/2} p^{-(n+v+1)} \exp(-a/p) L_n^v(a/p), \quad (5)$$

其中 L_n^v 为拉盖尔多项式, 积分后, 得到

$$E(r, z) = \frac{ikAG_0 n!}{2B\omega_0^{2n}} \left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{ikA}{2B}\right)^{-n-1} \exp(-ikz) \times \exp\left(-\frac{ikDr^2}{2B}\right) \exp\left[-\frac{\left(\frac{kr}{2B}\right)^2}{\left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{ikA}{2B}\right)}\right] \times L_n\left[\frac{\left(\frac{kr}{2B}\right)^2}{\left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{ikA}{2B}\right)}\right]. \quad (6)$$

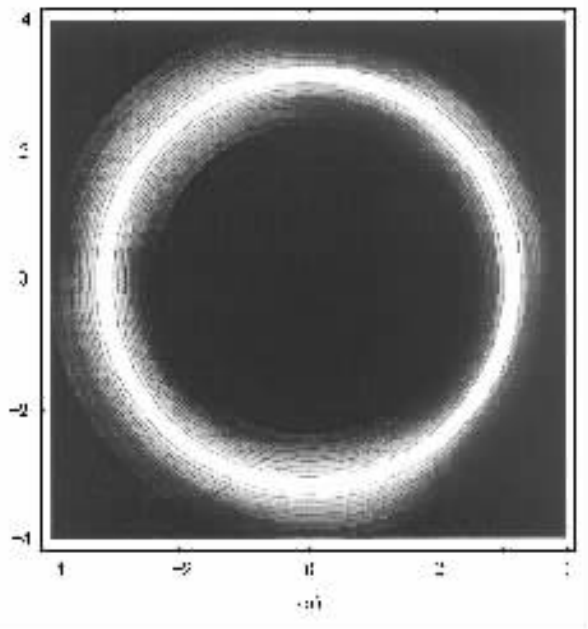
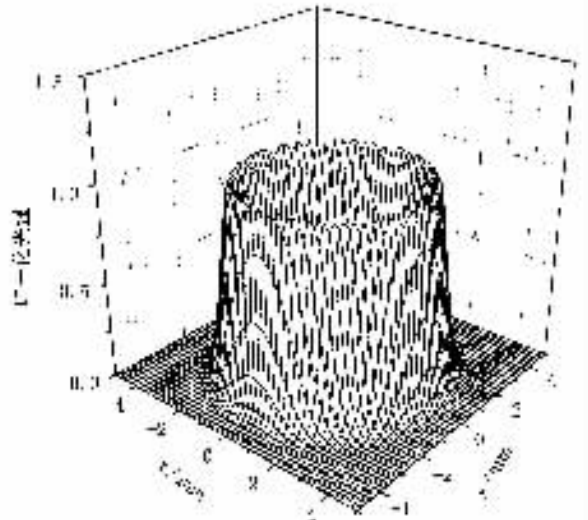
(6) 式就是空心高斯光束通过傍轴光学系统的传输和变换公式, 它可以很方便地研究分析空心光束经过傍轴光学系统的传输变换特性.

下面计算分析空心高斯光束在自由空间中的传

输特性. 自由空间的传输变换矩阵元为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

将 (7) 式代入 (6) 式, 可以计算得到空心高斯光束在自由空间中传输时不同传输距离处的归一化三维强度分布图以及相应的等高线图, 结果如图 2 所示. 计算中取 $\lambda = 1064\text{nm}$, $\omega_0 = 1\text{mm}$, $n = 10$. 从图 2 可以看出空心高斯光束在近场有很好的传输稳定性, 当传输距离 z 增大时, 空心高斯光束的光斑发散同时黑斑面积占总光斑面积的比率减小. 而在远场, “黑心”区域消失了, 此时轴上的光强变为最大. 以上可以看出空心高斯光束具有独特传输特性.



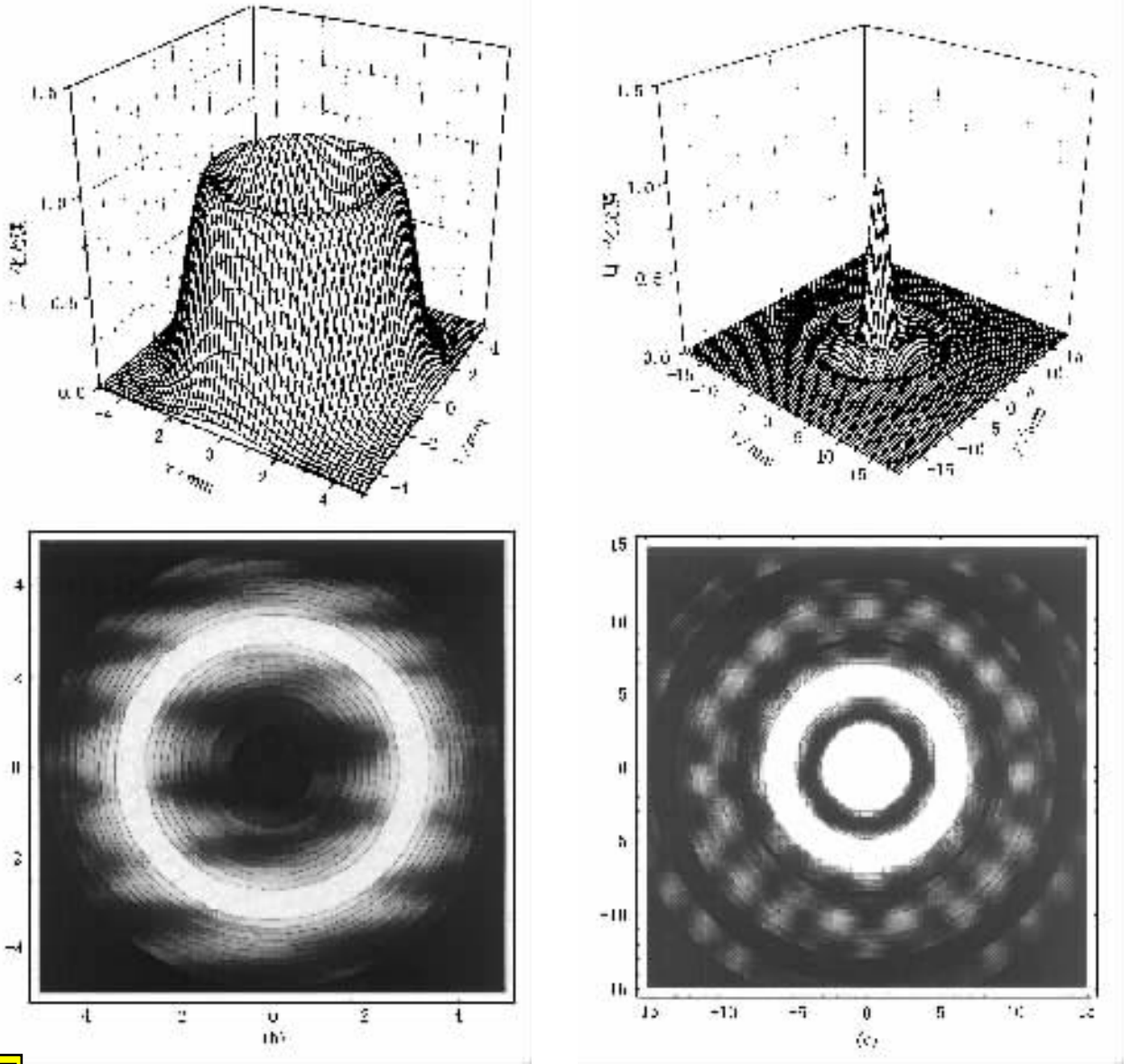


图2 空心高斯光束在自由空间中传输时不同传输距离处的归一化三维强度分布图以及相应的等高线图 (a) $z=0$, (b) $z=5\text{m}$ (c) $z=50\text{m}$

3. 空心高斯光束的实验产生

近年来,用衍射元件作为反射镜的谐振腔^[16],

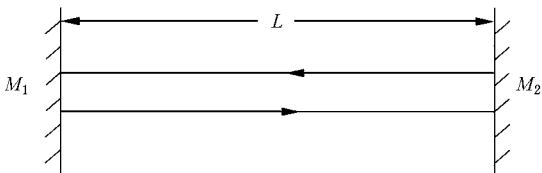


图3 带有衍射元件的光学谐振腔示意图

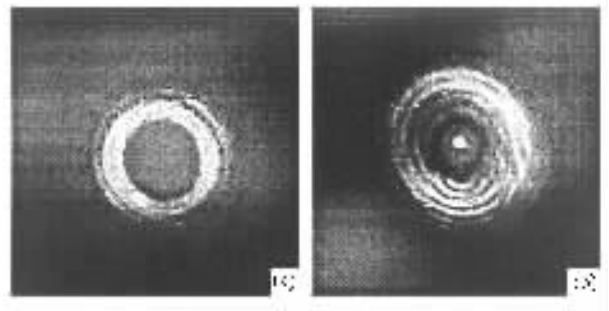


图4 谐振腔输出的空心光束在近场的光强分布(a)及在远场的光强分布(b)

已成为一种新的提高模式分离度的方法,伴随着二元光学技术的不断成熟,可以根据需要设计并定制位相片来输出激光光束.利用矩阵本征值的方法^[17-19],设计了如图3所示的带有衍射元件的光学谐振腔.其中 M_1 和 M_2 为圆形反射镜, M_1 为输出平面镜, M_2 为一具有一定反射率分布的位相片.根据理论分析,我们把 M_2 反射镜的位相分布设计成一阶贝塞尔函数形式,即 M_2 反射率为 $R(r_2) = \exp[-iJ_1(r_2)]$,再将该反射率分布代入谐振腔自再现衍射积分方程.柱坐标形式下它可以表示为^[19]

$$U_1(r_1, \varphi_1) = \gamma \int_0^{a_2} \int_0^{2\pi} K_2(r_1, \varphi_1; r_2, \varphi_2) \times \int_0^{a_1} \int_0^{2\pi} K_1(r_2, \varphi_2; r'_1, \varphi'_1) \times U_1(r'_1, \varphi'_1) R(r_2) r'_1 dr'_1 r_2 d\varphi_2 dr_2, \quad (8)$$

$U_1(r_1, \varphi_1)$ 为输出镜 M_1 上的光场分布, a_1 和 a_2 分别为 M_1 和 M_2 的光阑半径.积分核

$$K_1(r_2, \varphi_2; r'_1, \varphi'_1) = \frac{j}{\lambda L} \exp\{-jk[r_1'^2 + r_2^2]2L - (r'_1 r_2/L) \cos(\varphi'_1 - \varphi_2)\},$$

$$K_2(r_1, \varphi_1; r_2, \varphi_2) = \frac{j}{\lambda L} \exp\{-jk[r_1^2 + r_2^2]2L - (r_1 r_2/L) \cos(\varphi_2 - \varphi_1)\}, \quad (9)$$

运用复合积分公式及矩阵本征值方法^[18]可以验证实验.结果表明采用一阶贝塞尔反射率分布是合理的.

实验装置和参数如下:实验用灯泵Nd:YAG固体激光器,腔长取 $L = 500\text{mm}$, M_1, M_2 的光阑半径为 $a_1 = a_2 = 1.0\text{mm}$,激光波长为 1064nm .实验上得到 M_1 上输出的空心光束的近场分布如图4(a),远场分布如图4(b)所示.比较图4(a)(c)和图4(a),(b),可以看出实验结果和理论计算结果基本吻合.由此也可以看出本文提出的空心高斯光束可以较好地用来描述空心光束.

4. 结 论

我们提出了一种描述空心光束的新模型——空心高斯光束.通过柯林斯公式得到了空心光束通过傍轴光学系统的传输变换式,计算分析了其在自由空间传输的光强分布特性.利用矩阵本征值的方法,在谐振腔内插入一有特定反射率分布的位相片,实验上获得了空心光束,并且得到的空心光束是通过腔内变换实现的.相对于其他产生空心光束的方法,更利于它的应用.实验结果和理论可以较好地吻合.结果表明空心高斯光束模式是一个比较理想而又简洁地描述空心光束的模式,并且能较好地符合理想空心光束的特点,即中心强度为零,它的应用范围也更广泛,可以用此模型分析空心光束对原子的引导作用,该空心光束能提供原子冷却的光学势阱,并且可将它应用于BEC,为全光型BEC的实现提供了一条新途径.

- [1] Kuga T, Torii Y, Shiokawa N, Hirano T, Shimizu Y and Sasada H 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 4713
- [2] Ovchinnikov Yu B, Manek I and Grimm R 1991 *Phys. Rev. Lett.* **79** 2225
- [3] Song Y, Milam D and Hill W T 1999 *Opt. Lett.* **24** 1805
- [4] Soding J, Grimm R and Ovchinnikov Yu B 1995 *Opt. Commun.* **119** 652
- [5] Yin J, Zhu Y, Jhe W and Wang Y 1998 *Phys. Rev. A* **58** 509
- [6] Xu X, Wang Y and Jhe W 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 1039
- [7] Yin J P, Gao W J, Wang H F, Long Q and Wang Y Z 2002 *Chin. Phys.* **11** 1157
- [8] Wang X and Littman M G 1993 *Opt. Lett.* **18** 767
- [9] Herman R M and Wiggins T A 1991 *J. Opt. Soc. Am. A* **8** 932.
- [10] Lee H S, Atewart B W, Choi K and Fenichel H 1994 *Phys. Rev.*

A **49** 4922

- [11] Paterson C and Smith R 1996 *Opt. Commun.* **124** 121
- [12] Beijersbergen M W, Allen L, van der Veen H E L O and Woerdman J P 1992 *Opt. Commun.* **96** 132
- [13] Arlt J and Dholakia K 2000 *Opt. Commun.* **177** 297
- [14] Balykin V I and Letokhov V S 1987 *Opt. Commun.* **64** 151
- [15] Erdelyi A, Magnus W and Oberhettinger F 1954 *Tables of integral transforms* (New York: McGraw-Hill)
- [16] Belanger P A and Pare C 1991 *Opt. Lett.* **16** 1057
- [17] Pare C and Belanger P A 1992 *J. Quant. Electron.* **28** 355
- [18] Lu X H and Huang K K 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1409 (in Chinese) 陆璇辉, 黄凯凯 2001 物理学报 **50** 1409
- [19] Lu X H, Huang K K, Xue D J, Zhang L and He S L 2003 *Chinese Optics Letters* **1** 153

Theoretical and experimental study of new dark hollow beams^{*}

Zhang Lei Cai Yang-Jian Lu Xuan-Hui

(*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation , Institute of Optics ,Centre for Optical & Electromagnetic Waves ,
Zhejiang University ,Hangzhou 310027 ,China*)

(Received 17 February 2003 ; revised manuscript received 29 July 2003)

Abstract

A new mathematical model named hollow Gaussian beams (HGBs) is introduced to describe the dark hollow beam. The area of the dark region across the HGBs can be easily controlled by properly choosing the beam parameters. An analytical propagation formula for HGBs through paraxial optical system is derived. The evolution properties of the intensity distribution of HGBs in free space propagation are illustrated graphically using the derived propagation formula. By using matrix eigenvalues method , the laser cavity with diffraction optical elements , which can generate the dark hollow beams , was constructed. Dark hollow beams were realized in experiment and its intensity distribution properties in near field and far field were studied. The results derived from the experiment is coincident with those predicted by the theory. The dark hollow beams we have obtained can be used conveniently to analyze atoms manipulation and may provide a new method for atom cooling.

Keywords : hollow Gaussian beam , laser cavity , propagation properties

PACC : 4225B , 4260D , 4260

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10334650).