

·光学设计·

空心傍轴高斯光束的传输特性

刘珊珊, 刘双峰, 张磊磊

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 推导了空心高斯光束经过傍轴光学系统的传输模型; 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; 最后利用 Matlab 对传输方程进行模拟仿真。结果表明: 高斯光束的阶数 n 和沿傍轴的传输距离 z 是控制空心光束的主要参数。随着阶数 n 的增大, 高斯光束逐渐变为空心高斯光束, 且中心暗斑和亮环的半径也相应增加; 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。

关键词: 空心高斯光束; Matlab 仿真; 传输特性; 傍轴

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)01-0024-03

Paraxial Propagation Properties of Hollow Gaussian Beams

LIU Shan-shan, LIU Shuang-feng, ZHANG Lei-lei

(Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A propagation model for hollow Gaussian beams (HGBs) through the paraxial optical system is derived, the propagation properties of HGBs in free space are analyzed using the derived propagation formula, and the propagation equation is simulated by using Matlab software. The results show that the order n and propagation distance z are the importance parameters for controlling hollow beams. With the increase of order n , Gaussian beams are gradually become HGBs, and the center of dark and bright radius of the bright ring are correspondingly increased. With the increase of propagation distance z , HGBs are divergent, and black spot area is reduced in the ratio of the total spot area, but in the far-field the black spot is disappeared, and light intensity becomes the maximum on the axis.

Key words: hollow Gaussian beams (HGBs); Matlab simulation; propagation properties; paraxial

随着激光技术的发展与广泛应用,关于新激光模式的研究引起了广泛关注^[1]。其中,中心光强分布为零的空心光束因其特殊性质和应用日益引起人们的关注与研究。人们提出了很多方法来产生了一系列轴向光强为零的空心光束^[2],如空心高斯光束(HGB),拉盖尔-高斯光束(LGB),高阶贝塞尔光束(BGB),双高斯空心光束(DGHB),局域空心光束(LHB),LP₀₁模输出空心光束(LPHB)等^[3]。空心光束具有光强度呈圆筒形分布、暗斑尺寸较小、无

加热效应、传播不变性等特性^[4]。由于具有这些特殊的物理性质,空心光束广泛应用于激光光学、原子光学、光信息处理、微粒波导、生物技术、医学等领域中^[5]。例如可以利用空心光束作为光学导管、光镊和光学扳手,对微观粒子进行精确无接触的操纵和控制^[6]。因此关于空心光束的产生和应用及衍射传输的研究也成为激光光学和光学工程等相关科学研究的重要内容^[6]。文中以张蕾^[7]等人提出的空心高斯光束模型为基础推导了空心高斯光束模

收稿日期:2010-12-15

作者简介:刘珊珊(1987-),女,山西晋城人,硕士研究生,主要研究方向为新型传感器。

型经过傍轴光学系统传输的解析式;通过理论上推导和仿真技术研究了它在自由空间的传输特性。

1 空心高斯光束经傍轴ABCD光学系统的传输

在坐标系中, z 轴为光束传播方向。空心高斯光束在 $z=0$ 处的光场分布定义成如下形式

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

式中, n 为空心高斯光束的阶数; G_0 为一常数。当 $n=0$ 时,式(1)就退化到一般光斑半径为 ω_0 的高斯光束。

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

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

式中, $k=2\pi/\lambda$ 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。

把式(1)中的 $E_n(r, 0)$ 当作 $E_0(r', 0)$ 代入式(2),并运用积分公式得

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

则式(2)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,其中, L_n^a 为拉盖尔多项式,积分后,得到

$$E(r, z) = \frac{ikAG_0n!}{2B\omega_0^{2n}} \left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{ikA}{2B}\right)^{-n-1} \exp(-ikz) \times \exp\left(-\frac{ikDr^2}{2B}\right) \exp\left[-\frac{\left(\frac{kr}{2B}\right)^2}{\left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{ikA}{2B}\right)}\right] \times L_n\left[\frac{\left(\frac{kr}{2B}\right)^2}{\left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{ikA}{2B}\right)}\right] \quad (5)$$

式(5)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

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

将式(5)代入式(6),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。

2 仿真及分析

根据理论部分推导出的空心高斯光束的传输特性方程式,可以得到高斯光束的阶数 n 和沿傍轴的传输距离 z 是控制空心光束中心暗斑尺寸和亮环半径的主要参数。

2.1 对参数 n 进行调节

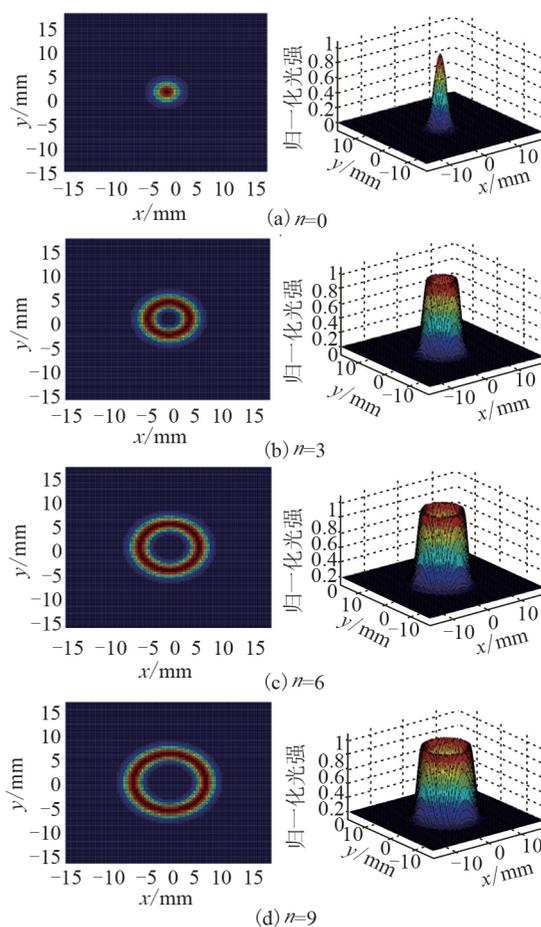


图1 空心高斯光束在自由空间中传输时,不同阶数的归一化三维强度分布图以及相应的轮廓图

如图1所示,仿真中取 $\omega_0=1$ mm, $n=0, 3, 6, 9$ 时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轮廓图。当 $n=0$ 时,空心高斯光束的光强分布基本和光腰为 ω_0 的高斯光束分布相同。这和理论上推导的基本一致。随着 n 的增大,高斯光束逐渐变为空心高斯光束,且中心暗斑和亮环的半径也相应增加。

2.2 对参数 z 进行调节

如图2所示,仿真中取 $\lambda=1\ 064\text{ nm}$; $\omega_0=1\text{ mm}$; $n=10$; $z=0, 5, 10, 20$ 时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轮廓图。仿真数据如表1所示。

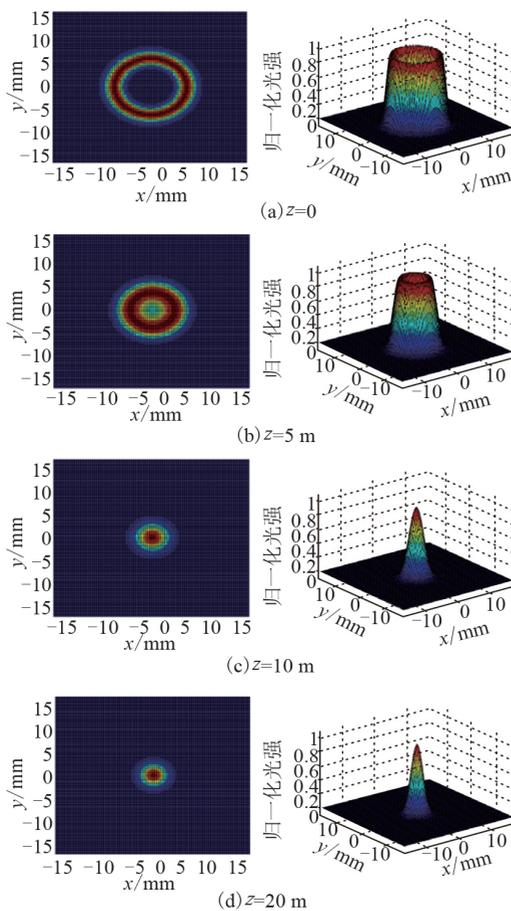


图2 空心高斯光束在自由空间中传输时,不同传输距离处的归一化三维强度分布图以及相应的轮廓图

表1 高斯光束归一化后中心能量强度与传输距离的关系

| 传输距离 z | 0 | 5 | 15 | 40 |
|------------|---|-----|----|----|
| 归一化后中心能量强度 | 0 | 0.3 | 1 | 1 |

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的同时,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。

2.3 存在的问题

最主要是在远场时,也即是 z 超过了 15 m (误差范围是 5 m)时,照理论计算,应该中心光斑外围还有几个衍射产生的能量光圈,并且这些光圈会随着半径 r 的增大会变得越来越窄,能量也变得越来越弱;但在用Matlab模拟时,只出现了中心亮的光斑,没有出现外围衍射光圈。在公式推导和程序编写上做了详细的检查,但没发现错误。可能的原因:Matlab在做模拟时,会把编写进去的公式做了近似替换,最终导致衍射效果没有出现。

3 结论

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Matlab模拟了传输方程。模拟结果和理论可以较好地吻合。最后得到控制空心高斯光束主要是由高斯光束的阶数 n 和传输距离 z 这2个参数决定的。并得出结论:(1)当光腰 ω_0 为一常量时,当阶数空心高斯光束 n 变大时,空心光束的亮环半径增大,黑斑区域面积增大。(2)取 $\lambda=1\ 064\text{ nm}$, $\omega_0=1\text{ mm}$, $n=10$ 的情况下,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。

参考文献

- [1] 吕百达. 激光光学—光束描述、传输变换与光腔技术物理学[M]. 3版. 北京:高教出版社,2003:1-3.
- [2] 丁世鹏. 激光捕获技术及环形光束的聚焦特性研究[D]. 成都:四川大学,2007.
- [3] 张凯. 空心激光束的形成及其控制技术[D]. 长春:长春理工大学,2008.
- [4] 印建平,刘南春. 空心光束的产生及其在现代光学中的应用[J]. 物理学进展,2006,24(3):78-82.
- [5] 刘岚,吴逢铁. 衍射理论对局域空心光束及无衍射光束重建的描述[J]. 光学学报,2008,28(2):37-39.
- [6] 李汝焱,张学清,郑晓虹. 空心高斯光束通过圆形硬边光阑的传输特性[J]. 大理学院学报,2008,7(6):34-38.
- [7] 张蕾,蔡阳健,陆璇辉. 一种新空心光束的理论及实验研究[J]. 物理学报,2004,53(06):1771-1781.