

文章编号: 1000 5013(2010) 05- 0503- 04

无衍射光束最大准直距离的 几何光学模拟与实验

郑维涛, 吴逢铁, 卢文和, 张前安

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 利用几何光学方法对轴棱锥产生近似无衍射光进行分析, 给出最大无衍射距离的几何表达式. 利用光学设计软件 ZEMAX 对产生近似无衍射光的光路进行追迹, 并模拟横向光强分布. 通过几何分析、软件模拟及实验验证, 讨论光束半径和轴棱锥底角对最大无衍射距离的影响. 研究结果表明, 最大无衍射距离随入射光束半径的增大而增大, 且近似成正比; 而最大无衍射距离随轴棱锥底角增大而减小, 且近似成反比.

关键词: 近似无衍射光束; 轴棱锥; 最大无衍射距离; ZEMAX 软件

中图分类号: O 436

文献标识码: A

无衍射光具有的主光斑尺寸小(约为微米量级)、强度高、方向性好、准直距离较长等特点^[1], 人们对它的特性和应用进行了多方面的研究^[2-10]. 在无衍射光的这些应用中, 很大一部分(如光学精密准直、小物体测量、测距、带电粒子加速等) 都取决于无衍射光束的准直距离, 即最大无衍射距离 Z_{\max} . 在最大无衍射距离内, 光束能量和尺寸基本保持不变, 但是超过这个距离, 光能量迅速衰减为零. 所以, 最大无衍射距离是衡量无衍射光束的一个十分重要的参量. 之前, 人们已经利用衍射理论对无衍射光的最大准直距离进行了描述^[11]. 光学设计软件 ZEMAX 是一个用来模拟、分析和辅助设计光学系统的软件. 最近, 文[12] 利用光学设计软件 ZEMAX 对无衍射光的自再现进行了模拟, 形象地追迹了近似无衍射光的重建过程. 本文运用光学设计软件 ZEMAX, 对轴棱锥产生的近似无衍射光的最大无衍射距离的影响因素进行分析, 同时对影响无衍射光束最大无衍射距离的因素进行了探讨.

1 最大无衍射距离的几何分析

目前, 已有多种方法能够在有限孔径下实现近似无衍射光, 如环缝-透镜法、谐振腔法、计算机全息法、轴棱锥法、球差透镜法, 等等. 其中, 最常用也最简单的方法是线性轴棱锥法. 它对能量的利用率高, 结构简单^[13], 只需要单一元件就可以产生无衍射光束, 并且所产生的无衍射光束尺寸稳定性好.

当一列平面波入射到光学性质不同的两个媒质的界面上时, 满足折射定律. 设轴棱锥介质折射率为 n , 轴棱锥的棱角为 γ , 波矢 k 与 z 轴的夹角为 θ , 如图 1 所示. 根据光的折射定律可以得到

$$n \sin \gamma = \sin(\theta + \gamma). \quad (1)$$

式中: γ , θ 及 $\gamma + \theta$ 的值均在 10° 以内. 由小角度近似可得 $\sin \gamma \approx \gamma$, $\sin(\theta + \gamma) \approx \theta + \gamma$, 由此可得 $\theta = (n - 1) \gamma$

设入射到轴棱锥面的光束半径为 R , 则平行光

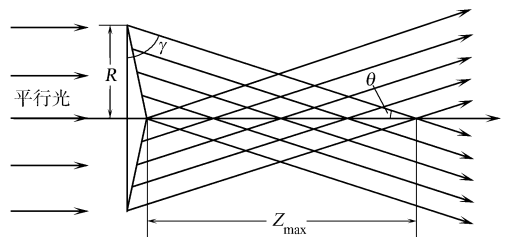


图 1 轴棱锥产生无衍射光的光路

Fig. 1 Geometrical scheme of non-diffraction beams generated by an axicon

收稿日期: 2009 11 10

通信作者: 吴逢铁(1958-), 男, 教授, 主要从事光束传输与控制、超短光脉冲及其非线性效应的研究. E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60977068); 泉州市科技计划重点项目(2009G4)

通过轴棱锥后产生的近似无衍射光束的最大准直距离的近似解为

$$Z_{\max} \approx \frac{R}{\tan \theta} = \frac{R}{(n-1)\gamma}$$

(2)

由式(2)可知,在入射光波长确定的情况下,轴棱锥产生的近似无衍射光束的最大无衍射距离仅与入射光束半径和轴棱锥底角有关.

2 光学设计软件 ZEMAX 模拟

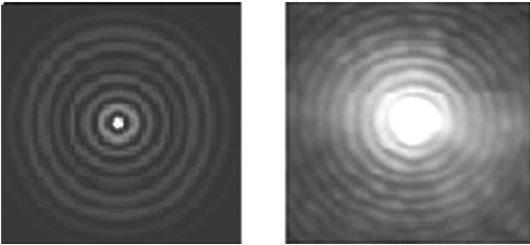
2.1 光束半径对最大无衍射距离的影响

利用光学设计软件 ZEMAX,可以直观地模拟光线通过轴棱锥后的光路,从而更好的进行分析.用 ZEMAX 软件对轴棱锥产生的近似无衍射光进行纵向模拟,如图 2 所示. 横向光强分布的模拟图和实验拍摄图,如图 3 所示.

在选取模拟参数时,取 $\lambda=633.27\text{ nm}$ 的红光作为光源,轴棱锥的材质设置为石英晶体,其折射率 n 为 1.458,底角 γ 为 2° . 分别对不同入射光束半径 R 进行模拟,其二维输出如图 4 所示. 由图 4 可知,最大无衍射距离随入射光斑半径 R 的增大而增大,并且近似成正比.



图 2 轴棱锥产生无衍射光的几何光线追迹
Fig. 2 Geometrical ray-tracing of non-diffraction beams generated by an axicon



(a) 模拟图 (b) 实验图

图 3 横向光强分布

Fig. 3 Transverse intensity distribution

2.2 轴棱锥底角对最大无衍射距离的影响

同样,仍然取 $\lambda=633.27\text{ nm}$ 的红光作为光源,轴棱锥的材质为石英($n=1.458$). 此时,固定入射光斑直径 R 为 15 mm,分别对不同轴棱锥底角 γ 进行模拟,得到的二维输出如图 5 所示. 由图 5 可见,最大无衍射距离随轴棱锥底角增大而减小,并且近似成反比.

3 实验结果及分析

通过相关实验验证以上分析,实验装置示意图如图 6 所示. 在实验中,使用 He-Ne 激光器作为光源,其发射波长为 633.27 nm,最大输出功率为 3 mW,准直透镜的焦距 $f_1=35\text{ mm}$, $f_2=175\text{ mm}$,两个透镜的焦点相互重合,组成准直系统. 经过准直系统的平行光线射入轴棱锥,之后产生近似无

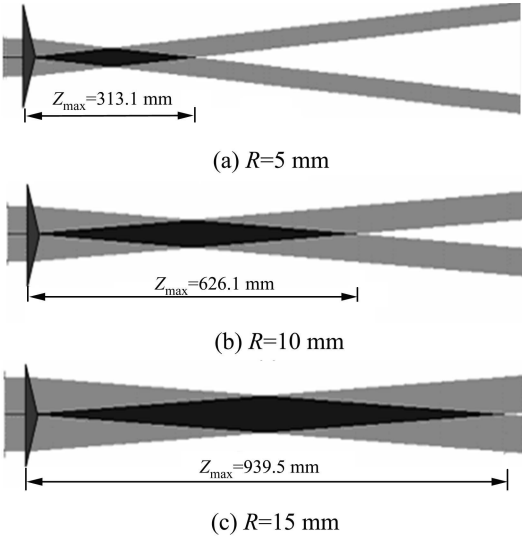


图 4 不同入射光斑半径的几何光线追迹图

Fig. 4 Geometrical ray-tracing for different incident beam spot

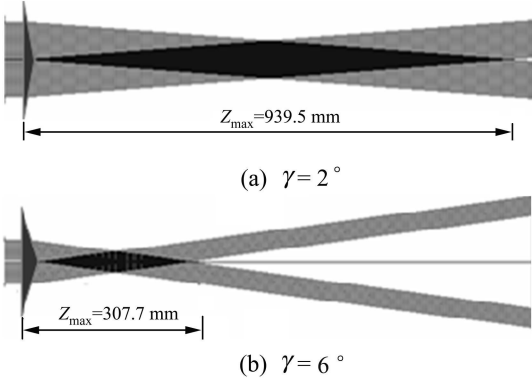


图 5 不同轴棱锥底角的几何光线追迹图

Fig. 5 Geometrical ray-tracing for different base angle of axicon

衍射贝塞尔光.

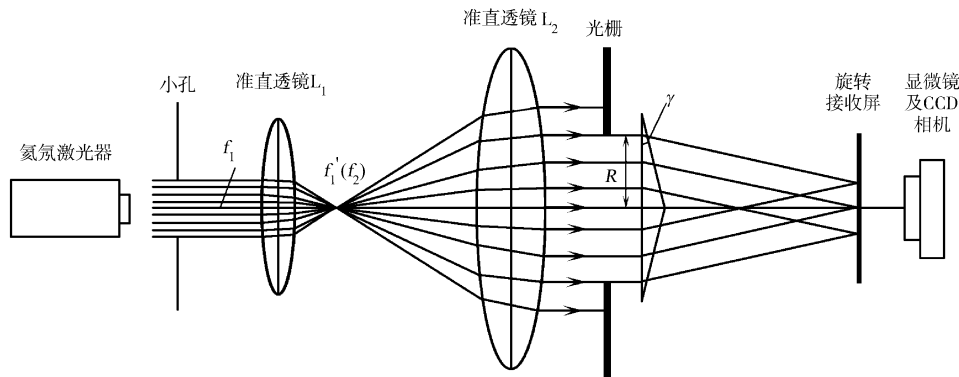


图 6 实验装置示意图

Fig. 6 Diagram of the experimental setup

利用体视显微镜(最大可连续放大倍数为 50 倍)和 CCD 照相机(最大可连续放大倍数为 5 倍)组成的系统,可以拍摄到旋转接收屏上接收到的光斑图样.通过改变光阑孔径的大小及使用不同的轴棱锥,可以得到不同的最大无衍射距离.经过分析,可以得到入射光束半径和轴棱锥底角与无衍射光束最大无衍射距离之间的关系.

将实验所得最大准直距离 Z_{\max} 结果与利用几何光学计算得到的结果,以及用光学软件 ZEMAX 模拟得到的结果进行比较,如表 1 所示.

表 1 最大准直距离的结果比较

Tab. 1 Comparison of different maximum noir diffracting distance mm

方法	$\gamma = 2^\circ$			$R = 15\text{ mm}$	
	$R = 5\text{ mm}$	$R = 10\text{ mm}$	$R = 15\text{ mm}$	$\gamma = 2^\circ$	$\gamma = 6^\circ$
计算值	312.7	625.4	938.1	938.1	312.7
模拟值	313.1	626.1	939.5	939.5	307.7
测量值	435.0	750.0	900.0	900.0	319.0

通过表 1 可以看到,轴棱锥底角确定,也就是使用同一个轴棱锥时,无衍射光束的最大无衍射距离会随光阑半径的增大而增大,几乎呈正比例函数.当固定光阑半径时,无衍射光束的最大无衍射距离会随轴棱锥底角的增大而减小,几乎呈反比例函数.无论是用几何光学计算,还是用 ZEMAX 模拟,或者是用实验测量,都可以得到以上结论,这与式(2)十分吻合.

从表 1 还可知,几何光学计算值与 ZEMAX 模拟值十分接近,误差很小,而实验测量值与前两者之间则有一定的误差.引起这些误差的原因可能有如下两个方面.

(1) 由于轴棱锥的底角很小(分别为 2° 和 6°),这样高的精确度在加工过程中是相当困难的.由式(2)可知, γ 角的误差将直接引起最大无衍射距离的误差.

(2) 在实验中,确定旋转屏是否处于最大无衍射距离处,是通过肉眼观察 CCD 相机上接收到的光斑图样来确定的,这样也会引起测量误差.

4 结束语

通过对轴棱锥产生的近似无衍射光束的最大无衍射距离的软件模拟和实验验证,得到了近似无衍射光最大无衍射距离与入射光半径和轴棱锥底角之间的关系.即最大无衍射距离与入射光半径近似成正比,而与轴棱锥底角近似成反比.这与几何光学分析是相吻合的.用传统的衍射理论分析方法能够很精确的分析光束的传输,而用 ZEMAX 软件进行分析,最大的优点就在于它可以直观地显示光路.

参考文献:

[1] 吕百达. 贝塞耳光束的特性和无衍射光束相关概念的分析[J]. 量子电子学, 1996, 13(2): 97-104.
[2] LIN Y, SELA W, HEBERLY J, et al. Experimental investigation of Bessel beam characteristics[J]. Appl Opt, 1992,

31(15): 2708-2713.

- [3] COX A J, DANNA J. Constant-axial-intensity nondiffracting beam[J]. Opt Lett, 1992, 17(4): 232-234.
- [4] LOHMANN A W, OJEDA-CASTANEDA J, SERRASO-HEREDIA A. Bessel functions: Parallel display and processing[J]. Opt Lett, 1994, 19(1): 55.
- [5] MANZ T, SCHWARZ U T. Maxima stimulated Stokes and anti-Stokes Raman scattering in liquid acetone with a Bessel beam[J]. Optics Communications, 2004, 235(1/2/3): 201-217.
- [6] GARCES-CHAVEZ V, MCGLOIN D, MELVILLE H, et al. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam[J]. Nature, 2002, 419(6903): 145-147.
- [7] LEI Ming, YAO Bao-li. Characteristics of beam profile of Gaussian beam passing through an axicon[J]. Opt Commun, 2004, 239(4/5/6): 367-372.
- [8] JUN A, KAZUTO Y, DAISUKE S, et al. Laser-based microprocesses using diffraction-free beams generated by diffractive axicon[J]. Proc of SPIE, 2005, 5713: 497-507.
- [9] 蒋志平, 陆启生, 刘泽金, 等. 贝塞尔光束的应用[J]. 光学技术, 1997(1): 2-6.
- [10] 刘岚, 吴逢铁, 曾夏辉. 无衍射光束的轴上光强和最大准直距离[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2007, 28(4): 350-352.
- [11] 刘彬, 吴逢铁, 邱振兴. 衍射和干涉理论对 Bessel 光束传输的描述[J]. 强激光与离子束, 2007, 19(12): 1992-1996.
- [12] 吴逢铁, 江新光, 刘彬, 等. 轴棱锥产生无衍射光束自再现特性的几何光学分析[J]. 物理学报, 2009, 58(5): 3125-3129.
- [13] 吴逢铁, 曾夏辉. 相干贝塞尔光产生具有塔尔博特效应的局域空心光束[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 174-178.

Geometrical Optical Simulation and Experiment of Maximum Collimation Distance for an Non-Diffracting Beams

ZHENG Wei-tao, WU Feng-tie,
LU Wen-he, ZHANG Qian-an

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: In this paper, non-diffracting beam generated by the axicon was analyzed using geometrical optical method and the expression of the maximum non-diffracting distance was given. The non-diffracting beam was traced using the optical design software ZEMAX, and the transverse optical intensity distribution was also simulated. The effect of the beam radius and the base angle γ of the axicon on the maximum non-diffracting distance were discussed through the geometric analysis, software simulation and experiment. Results show that the maximum non-diffracting distance increases with the increasing of beam radius R , and almost proportional with the R ; however the maximum non-diffracting distance decreases with the increasing of the base angle γ of the axicon, and inverse proportional with the γ .

Keywords: approximate non-diffraction beams; axicon; maximum non-diffracting distance; ZEMAX software

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 吴逢铁)