

文章编号: 1000-5013(2007) 04-0350-03

无衍射光束的轴上光强和最大准直距离

刘 岚, 吴逢铁, 曾夏辉

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 利用柯林斯公式推广, 在柱坐标下的广义惠更斯-菲涅尔衍射积分公式, 推导出用锥形透镜产生的近似无衍射光束的纵向传输分布, 且进一步得到轴上光强公式, 并用几何光学分析法得到最大准直距离的公式. 根据数值模拟的轴上光强, 分别讨论轴棱镜底角对轴上光强分布的影响, 入射光束半径 R 、底角 φ 对最大准直距离 Z_{\max} 的影响. 实验结果表明, 轴上光强随着底角的增大而增大, 最大准直距离 Z_{\max} 随入射光束半径 R 增大而增大并近似与 R 成正比, 最大准直距离 Z_{\max} 随底角增大而减小且近似与底角反比.

关键词: 无衍射光束; 轴棱镜; 轴上光强; 最大准直距离

中图分类号: O 436

文献标识码: A

1987 年, Durnin 等^[1]首次提出无衍射光束, 它是在不考虑透镜衍射或把圆环视为圆线的条件下实现的^[2]. 无衍射光有许多方面的应用, 例如, 长聚焦深度激光打孔、激光精确准直、非线性光学的应用、激光光镊等^[3-4], 用无衍射光束可以克服高斯光的许多限制^[5-6]. 理想的无衍射光束在其横向上的光场能量是非平方可积的, 需要无穷大的能量才能产生完整的无衍射光束, 这在实际应用中是无法得到的. 研究表明, 有限孔径下可用环缝系统、谐振腔法、锥形透镜法、球面像差法等^[7]产生近似无衍射光束. 其中, 锥形透镜法利用率最高、方法简单, 所产生的无衍射光束尺寸稳定性好, 更重要的是, 可在此方法产生近似无衍射光的最大准直距离内插入一个合适的聚焦透镜, 产生另一种应用广泛的局域空心光束^[8]. 本文对用锥形透镜法产生的近似无衍射光束的轴上光强, 以及最大准直距离受相关参数的影响进行研究.

1 理论分析

当孔径尺寸 R 大于波长和在旁轴近似情况下, 标量衍射理论适用于研究光波的传播性质. 利用柯林斯公式推广, 在柱坐标下的广义惠更斯-菲涅尔衍射积分公式, 可以得到纵向传输公式^[9]为

$$E_2(\rho_2, Z) = - \frac{ikE_0}{Z} \exp(ikZ) \exp\left(\frac{ik\rho_2^2}{2Z}\right) \int_0^R J_0\left(\frac{k\rho_1\rho_2}{Z}\right) \exp\left[\frac{ik\rho_1^2}{2Z} - ik(n-1)\varphi_1\right] \rho_1 d\rho_1. \quad (1)$$

其中, ρ_1 为源点径向坐标, n 为轴棱锥介质的折射率, φ 为轴棱锥底角(底平面和锥面间的夹角). 设入射光为平行光且 $E_1 = E_0$, R 为入射光束的半径. 由式(1)得到的轴上光强分布 $I_2(Z)$ 为

$$I_2(0, Z) = I_2(Z) = \left(\frac{kE_0}{Z}\right)^2 \left| \int_0^R \exp\left[\frac{ik\rho_1^2}{2Z} - ik(n-1)\varphi_1\right] \rho_1 d\rho_1 \right|^2. \quad (2)$$

在式(2)中, E_0 是一个与振幅有关的常数. 由简单的几何推导, 可以很容易得到最大准直距离^[10] $Z_{\max} = R/[(n-1)\varphi]$. 入射光束的半径 R 和轴棱锥的底角 φ , 是影响最大准直距离 Z_{\max} 的两个主要参数.

2 数值模拟及分析

2.1 底角对轴上光强的影响

当 $R = 4 \text{ mm}$, $\lambda = 0.6328 \text{ }\mu\text{m}$, $n = 1.516$, $E_0 = 1$, 而底角 φ 分别为 $0.5^\circ, 2^\circ, 4^\circ$ 时, 利用式(2)进行数

收稿日期: 2006-11-14

作者简介: 刘 岚(1981-), 女, 硕士研究生, 主要从事无衍射光束的研究; 通信作者: 吴逢铁(1958-), 男, 教授, E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(A0410017)

值模拟, 结果如图 1(a) 所示. 图 1(a) 中, $I_1(Z)$, $I_2(Z)$, $I_3(Z)$ 分别是底角为 0.5° , 2° , 4° 时的轴上光强分布. 由图 1(a) 可见, 在最大准直距离 Z_{\max} 内, 轴上光强随着 Z 的增加而增大, 达到最大值后迅速减小. 从图 1(a) 还可以得到, 当 φ 分别为 0.5° , 2° , 4° 时, Z 分别为 850, 217, 109 mm, Z_{\max} 随着底角的增大而减小, 几乎成反比减少.

2.2 入射光束半径对最大准直距离的影响

当 $\varphi=2^\circ$, $\lambda=0.6328\text{ }\mu\text{m}$, $E_0=1$, $n=1.516$ 时, 研究光束半径 R 对最大准直距离 Z_{\max} 的影响, 如图 1(b) 所示. $I_1(Z)$, $I_2(Z)$ 是入射光束半径 R 分别为 4.0, 2.5 mm 时的轴上光强. 由图 1(b) 可知, R 分别为 4.0, 2.5 mm 时, Z_{\max} 为 217, 136 mm, Z_{\max} 随着入射光束半径 R 增大而增大, 几乎成正比增加.

3 实验对理论模拟的验证

实验采用锥形透镜法产生的近似无衍射光束. 把波长为 $0.6328\text{ }\mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光扩束准直后正入射到轴棱锥上, 在轴棱锥前放一个可变的硬边光阑, 用以限制入射光束的半径. 当轴棱锥角 $\varphi=0.5^\circ$, 光束半径 R 分别为 2.5, 4 mm 时, 理论模拟和实验数据得出的轴上光强分布, 如图 2 所示. 图 2 中, 实线

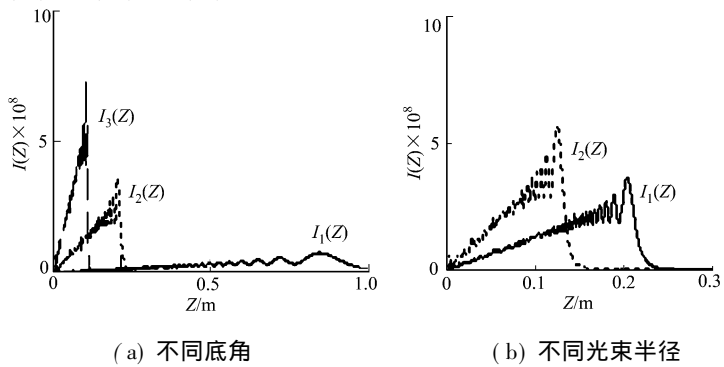


图 1 轴上光强与 Z 的关系

Fig. 1 The relation between on axis intensity and Z

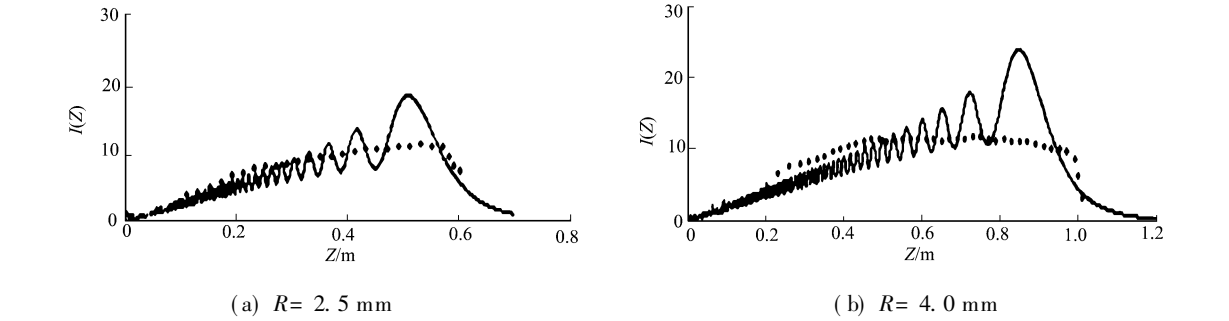


图 2 轴上光强的理论与实验图

Fig. 2 Theoretical and experimental diagram of the on axis intensity

是理论模拟图, 点线是实验数据点. 从图 2 的图形分析可知, 理论中的光强几乎是围绕实际测定的平均光强上下振动, 实际的最大准直距离要比理论的稍微大些. 这可能存在以下 3 个原因. (1) 轴棱锥加工问题. 轴棱锥的底角大小直接关系着最大准直距离的测量, 若轴棱锥底角的加工不是很精确, 会导致最大准直距离的测量误差. (2) 光路调节上可能会出现微小误差. (3) 系统误差的影响. 总之在误差允许范围内, 实验与理论还是基本吻合的.

在实验过程中, 我们还拍摄了 0.5° 的横向光强分布图, 图 3(a) 是用体式显微镜(可连续放大, 最大放大倍率为 50)和电感耦合器件(CCD)照相机(可连续放大, 最大倍率 $5\times 2560\text{ 像素}\times 1920$

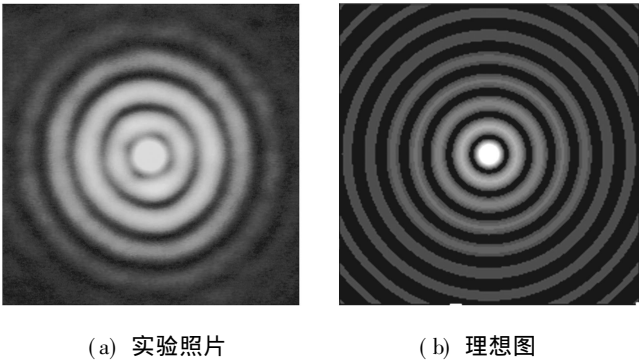


图 3 无衍射光束的横截面光强

Fig. 3 Optical intensity in cross section of the non diffraction beam

像素)组成的系统进行拍摄得到. 实验得到的光强分布图 3(a) 和理论模拟的图 3(b) 相当吻合, 微小的误差主要是由于轴棱锥加工误差引起的^[11].

4 结束语

理想的无衍射光带有无限大的能量, 实际中根本无法实现. 本文对用锥形透镜法产生的近似无衍射光束的轴上光强及最大准直距离进行分析. 利用衍射积分理论, 进一步推导出了无衍射光束的光场传输公式和轴上光强公式. 数值模拟了轴上光强与 Z 的关系图形, 通过实验得到轴上光强与轴棱锥底角的关系, 以及最大准直距离随入射光半径 R 和底角变化的情况. 在误差范围内, 实验结果和衍射积分理论及几何光学近似符合.

参考文献:

- [1] DURNIN J. Exact solutions for nondiffracting beams (I): The scalar theory [J]. J Opt Soc Am A, 1987, (4): 651-654.
- [2] 王志坚, 周庆才, 付跃刚, 等. 无衍射光束与零阶函数[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2002, 25(2): 19-21.
- [3] 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.
- [4] MANZ T, SCHWARZ U T, MAIER M. Stimulated Stokes and anti-Stokes Raman scattering in liquid acetone with a Bessel beam[J]. Optics Communications, 2004, 235: 201-217.
- [5] GARCES-CHAVEZ V, MCGLOIN D, SIBBETT W, et al. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam[J]. Nature, 2002, 419: 145-149.
- [6] LEI Ming, YAO Bao-li. Characteristics of beam profile of Gaussian beam passing through an axicon[J]. Opt Commun, 2004, 239: 367-372.
- [7] 周莉萍, 赵 斌, 李 柱. 无衍射光束理论与实现[J]. 光学精密工程, 1997, 5(4): 14-19.
- [8] WEI Ming-lar, SHAO Wen-long, LIN Yi-tse. Adjustable generation of bottle and hollow beams using an axicon[J]. Opt Commun, 2005, 248: 7-14.
- [9] 吕百达. 强激光的控制与传输[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 23-24.
- [10] 邢笑雪, 吴逢铁, 张建荣. 无衍射 J_0 光束的理论分析[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2006, 27(1): 31-34.
- [11] 曾夏辉, 吴逢铁, 邢笑雪, 等. 轴棱锥非圆对称加工误差对贝塞尔光束质量的影响[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 809-813.

Study on the On-Axis Intensity and the Maximum Collimated Distance for a Non-Diffraction Beam

LIU Lan, WU Feng-tie, ZENG Xia-hui

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

Abstract: Using the Collins formula and Huygens-Fresnel diffraction integral theory, the on-axis beam intensity formula of a non-diffraction beam generated by an aperture plane wave impinging through an axicon was given. Based on the simple geometrical theory, it is easy to deduce equation of the maximum non-diffraction distance. In this paper, we analyzed the distribution of the on-axis intensity and the effect of both the radius R of the aperture and the base angle of the axicon on the maximum non-diffraction distance according to the numerical calculation. The experimental results show that the on-axis intensity increased with the increasing of the base angle of the axicon; the maximum non-diffraction distance Z_{\max} increased with the radius R of the incident beam and proportional with the R , and inverse proportional with the base angle of the axicon.

Keywords: non-diffraction beam; axicon; on-axis intensity; maximum non-diffraction distance

(责任编辑: 黄仲一)