

文章编号: 0258-7025(2007)08-1073-04

# 纳秒无衍射贝塞耳光脉冲参量的分析与测定

吴逢铁, 陈云彬, 郭东栋, 张建荣

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 从理论和实验两方面分析测定了纳秒无衍射贝塞耳光脉冲的相关参量。由广义惠更斯-菲涅耳衍射积分理论出发给出了平行光通过轴棱锥后的光场分布、最大无衍射准直距离、最小中心光斑半径等参量的表达式, 并进行相关参量的数值模拟。实验采用平-抗共振环(ARR)腔被动调 QNd:YAG 激光器和轴棱锥系统获得了高稳定的纳秒贝塞耳光脉冲, 测定了其脉冲宽度、最大无衍射距离、横面光强分布及最小中心亮斑尺寸, 实验结果与理论分析相吻合。利用胶片扫描法给出了光脉冲的截面光强分布精细结构, 其分辨率远高于普通的光束分析仪。

**关键词** 激光物理; 纳秒无衍射贝塞耳光脉冲; 参量测定; 轴棱锥; 胶片扫描法

**中图分类号** O 436.1 **文献标识码** A

## Parameters Analysis and Measurement of Nanosecond Diffraction-Free Bessel Laser Pulse

WU Feng-tie, CHEN Yun-bin, GUO Dong-dong, ZHANG Jian-rong

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

**Abstract** Relative parameters of nanosecond diffraction-free Bessel laser pulse were theoretically analyzed and measured in experiments. The expressions of the optical intensity distribution behind an axicon illuminated by a plane wave, maximum diffraction-free distance, minimum central spot radius were given based on the generalized Huygens-Fresnel diffraction integral theory. Relative parameters were also theoretically simulated and calculated. In the experiment, high stability nanosecond Bessel laser pulses were generated by using a Q-switched Nd:YAG laser with a plane-antiresonant ring (ARR) resonator and an axicon system. The pulse duration, maximum diffraction-free distance, optical intensity in the cross-section and minimum central spot radius were measured. Experimental results were consistent with the theoretical analysis. The fine structure of the optical intensity in the laser beam cross-section was presented by film-scanning, and the resolution of the beam pattern is much higher than that in a laser parameter analyzer.

**Key words** laser physics; nanosecond diffraction-free Bessel laser pulse; parameters measurement; axicon; film-scanning

## 1 引言

无衍射贝塞耳光束具有中心主光斑尺寸小、准直距离长而不发散等特点, 引起人们的兴趣和关注<sup>[1]</sup>, 尤其是利用贝塞耳光聚焦后形成的空心光束可作光镊, 对原子囚禁及在生命科学领域具有广阔的应用前景<sup>[2~5]</sup>。此前大部分研究主要在连续波长低功率方面, 很少涉及短脉冲高功率的贝塞耳光, 而纳秒贝塞耳光脉冲中心亮斑仅为几十微米, 脉宽几

十纳秒, 具有极高的峰值功率密度, 其在非线性光学<sup>[6]</sup>、激光深聚焦微加工<sup>[7]</sup>、高精度准直和测距等应用中具有独特优势。因此对纳秒贝塞耳光脉冲相关参量的测定和分析很有必要, 然而由于这类光脉冲持续时间短、光斑尺寸小、峰值功率高, 给测量带来极大困难, 目前尚未见到较完整的相关参量测定。本文首先对无衍射贝塞耳光束的相关参量从理论上进行导出和模拟。实验方面采用平-抗共振环

收稿日期: 2006-10-12; 收到修改稿日期: 2007-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(60477041)和福建省自然科学基金(A0410017)资助项目。

作者简介: 吴逢铁(1958—), 男, 福建人, 教授, 博士, 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

(ARR)被动调 Q Nd:YAG 激光器和轴棱锥系统产生高稳定的纳秒贝塞耳光脉冲,实验给出了调 Q 贝塞耳光脉冲波形,测量了脉冲宽度、最大无衍射距离、横面光强分布及中心亮斑尺寸,同时对相关结果进行了讨论。

## 2 理论分析及模拟

利用轴棱锥产生无衍射贝塞耳光装置简单,转换效率高,且有很高的光损伤阈值。已知轴棱锥的振幅透过率

$$T(\rho) = \begin{cases} \exp[-ik(n-1)\phi\rho], & (\rho < R) \\ 0, & (\rho \geq R) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为光波长,  $n$  和  $\phi$  为轴棱锥介质的折射率和底角,  $R$  为通过轴棱锥的光束半径,  $\rho$  为光源的径向距离。利用柯林斯(Collins)公式的推广,由广义惠更斯-菲涅耳衍射积分理论出发,在旋转对称的柱坐标体系可导出平行光通过轴棱锥后的光场分布<sup>[8]</sup>

$$E(r, z) = -\frac{ikE_0}{z} \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right) \times \int_0^R J_0\left(\frac{k\rho r}{z}\right) \exp\left[\frac{ik\rho^2}{2z} - ik(n-1)\phi\rho\right] \rho d\rho, \quad (2)$$

式中  $E_0$  为光场的振幅,  $r$  为光场的径向距离,  $z$  为传播轴上距离(以轴棱锥锥尖为坐标原点),  $J_0$  为贝塞耳函数。其相应的光强为

$$I(r, z) = \left(\frac{kE_0}{z}\right)^2 \times \left| \int_0^R \exp\left\{ik\left[\frac{\rho^2}{2z} - (n-1)\phi\rho\right]\right\} J_0\left(\frac{k\rho r}{z}\right) \rho d\rho \right|^2. \quad (3)$$

当平行光入射到轴棱锥时,由折射定律得到:  $n\sin\phi = \sin(\theta + \phi)$ , 其中  $\theta$  为出射光线与传播  $z$  轴的夹角。由于  $\phi$  和  $\theta$  很小,由小角度近似可得  $\theta \approx (n-1)\phi$ , 由此可导出无衍射贝塞耳光的最大准直距离

$$Z_{\max} = \frac{R}{\tan\theta} \approx \frac{R}{(n-1)\phi}, \quad (4)$$

根据贝塞耳函数特性,其中心最小亮斑尺寸  $R_0$  可由  $J_0(2.405) = 0$  求得

$$R_0 = \frac{2.405}{\frac{2\pi}{\lambda}(n-1)\phi} = \frac{0.383\lambda}{(n-1)\phi}. \quad (5)$$

将相应参量  $n = 1.506, \phi = 0.45^\circ, R = 5 \text{ mm}, \lambda = 1.06 \mu\text{m}$ , 代入式(3)得到无衍射贝塞耳光束的轴上光强分布(令  $r = 0$ ), 如图 1 所示,  $z = 90 \text{ cm}$  的截面光强分布, 如图 2 所示。由图 1 的轴上光强模拟图, 定义最大光强半峰全宽值点所对应的  $z$  为最大

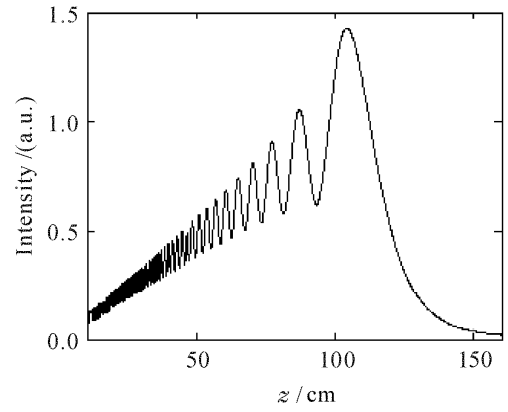


图 1 贝塞耳光束轴上的光强分布

Fig. 1 Optical intensity distribution on axis of the Bessel beam

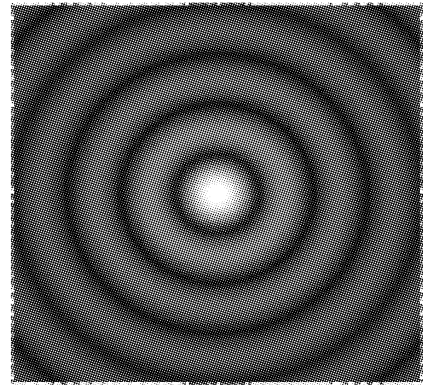


图 2 贝塞耳光束截面光强分布

Fig. 2 Optical intensity distribution in cross section of the Bessel beam

无衍射距离<sup>[9]</sup>, 约为 122 cm; 同时利用几何表达式(4)得到最大无衍射距离约为 126 cm。此外, 由(5)式可算得中心最小亮斑半径  $R_0 = 90.2 \mu\text{m}$ 。

## 3 实验结果及分析

实验装置如图 3 所示, 由带抗共振环的 Nd:

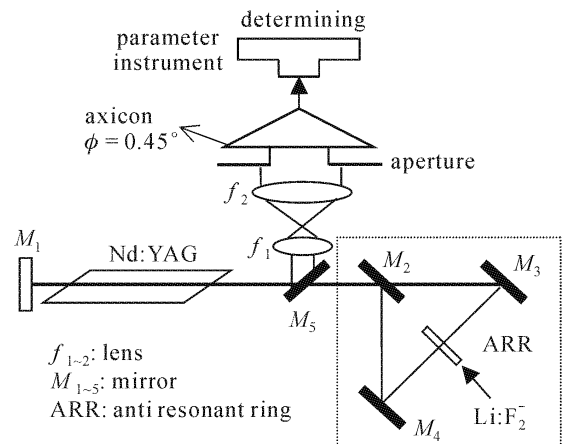


图 3 实验装置图

Fig. 3 Scheme of experimental setup

YAG 调 Q 激光器输出高稳定的纳秒光脉冲<sup>[10,11]</sup>, 经过透镜  $f_1$  和  $f_2$  准直扩束及光阑输出平行光, 然后垂直入射棱角为  $0.45^\circ$  的 K9 玻璃轴棱锥 ( $n = 1.506$ ), 获得高稳定近似理想的无衍射零阶纳秒贝塞耳光脉冲, 然后对光脉冲的相关参量进行测定。

### 3.1 调 Q 脉冲波形及脉宽

衰减后的贝塞耳光脉冲由 PIN 管及 HP54520A 型 400 MHz 数字存储示波器观察脉冲波形和测定脉宽。输出的波形和宽度很稳定, 调 Q 脉冲示波器照片如图 4 所示, 其脉冲的半峰全宽为 26 ns。

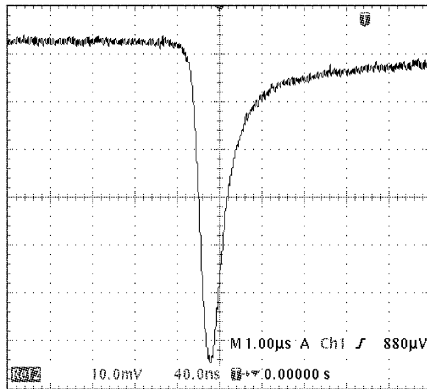


图 4 调 Q 示波器激光脉冲照片 (40 ns/div)

Fig. 4 Oscilloscope photograph of Q-switched laser pulse (40 ns/div)

### 3.2 最大准直距离测定

实验中使用 DataRay 公司的 TaperCamD-UCM-20-15 型光束分析仪沿光轴定距移动对输出的纳秒贝塞耳光脉冲进行取样监测。光束分析仪参数为: 感光元件 CCD 尺寸:  $19.6 \text{ mm} \times 14.8 \text{ mm}$ ; 有效像素:  $1200 \times 1024$ ; 像素单元尺寸:  $14.4 \mu\text{m} \times 14.4 \mu\text{m}$ 。在最大无衍射距离范围内, 中心亮斑有一明显峰值, 当检测距离刚超出最大准直范围, 光强剧减为零。我们在最大无衍射距离附近精细移动, 测得纳秒贝塞耳光的最大准直距离约为 128 cm。这一结果和利用衍射积分公式模拟出的 122 cm 及利用几何表达式 (4) 得到的 126 cm 基本相吻合, 相对误差小于 5%。误差主要来自仪器精度、背景噪声和操作误差等。

### 3.3 横面光强分布及中心亮斑测定

激光光束横截面光强分布是评估光束质量的主要依据, 一般可采用光束分析仪来测量光斑大小、轮廓和能量分布等参量。虽然光束分析仪功能强大、使用方便, 但仍存在一定的缺陷。CCD 平面感光元件的阵列最小感光单元为微米量级, 而真正反映到图像上的有效分辨率通常是十几微米, 甚至几十微

米, 所以对脉冲 (尤其是短脉冲) 进行测量达不到较高精度, 且 CCD 感光元件自身的随机噪点和起伏的温度特性也会影响测量精度<sup>[12]</sup>。为了精确记录和测定微米量级的纳秒贝塞耳光脉冲的截面光强分布和中心光斑尺寸, 实验中采用了胶片扫描测量法。首先让纳秒贝塞耳光直接在彩色反转胶片上曝光, 显影后的底片由 Linotype-hell 公司的 chromagraph330 滚筒扫描仪 (输出图像分辨率为 400 dpi, 32 bit, TIFF 格式) 扫描得到分辨率相当高的纳秒贝塞耳光斑电子图像, 如图 5(a) 所示 (拍摄距离为 90 cm), 实验拍摄结果和理论模拟图 2 吻合很好。而图 5(b) 为 TaperCamD-UCM-20-15 型光束分析仪在相同实验条件下拍摄的照片。显然胶片扫描法获得的截面光强分布图像分辨率远高于光束分析仪, 使得我们可精确测定最小中心光斑直径。利用 LCD3 读数显微镜测量得到中心最小亮斑半径为  $87 \pm 5 \mu\text{m}$  和理论计算值  $90.2 \mu\text{m}$  基本吻合。实验误差主要来自判读光斑轮廓边缘位置, 此处采用多次测量平均值。

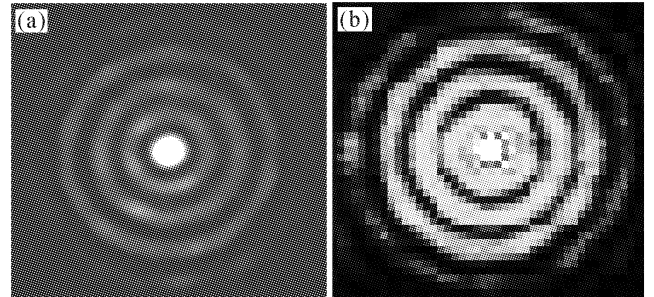


图 5 纳秒贝塞耳光脉冲截面光强分布图

(a) 胶片扫描法; (b) 光束分析仪

Fig. 5 Optical intensity distribution in the cross section of the nanosecond Bessel beam

(a) film-scanning; (b) laser parameter analyzer

## 4 结 论

利用广义衍射积分理论, 给出平行光通过轴棱锥后的光场分布及相应光强。数值模拟了纳秒  $1.06 \mu\text{m}$  波长贝塞耳光脉冲的轴上光强分布和截面光强分布。由带抗共振环的 Nd:YAG 调 Q 激光器和轴棱锥获得稳定的纳秒贝塞耳光脉冲。利用光束分析仪测定了最大无衍射准直距离, 同数值模拟结果及由简单几何光学表达式得到的结果基本吻合。利用胶片扫描法得到了高分辨率的纳秒贝塞耳光脉冲截面光强分布, 并进一步测定了最小中心光斑半径, 同理论计算值基本吻合。研究结果表明, 胶片拍摄扫描的电子图像远高于普通激光光束分析仪的分

分辨率,该技术为研究短脉冲甚至超短光脉冲的光强分布和微结构分析提供一种非常有效的方法。此外,该方法可测波长范围广(根据不同类型的胶片测定范围从紫外、可见到红外光);感光成像面积大(24 mm×36 mm或60 mm×60 mm);可进行不同类型的光束记录(包括连续和脉冲式)。在许多实验中它可以代替甚至优于昂贵的激光光束分析仪。

### 参 考 文 献

- 1 D. McGloin, K. Dholakia. Bessel beam: diffraction in a new light [J]. *Contemporary Physics*, 2005, **46**(1):15~48
- 2 Ming-Dar Wei, Wen-Long Shiao, Yi-Tse Lin *et al.*. Adjustable generation of bottle and hollow beams using an axicon [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **248**(1-3):7~14
- 3 Jochen Arlt, Kishan Dholakia, Josh Soneson *et al.*. Optical dipole traps and atomic waveguides based on Bessel light beam [J]. *Phys. Rev. A*, 2001, **63**(6):063602~
- 4 David G. Grier. A revolution in optical manipulation [J]. *Nature*, 2003, **424**:810~824
- 5 Ming Lei, Baoli Yao. Characteristics of beam profile of Gaussian beam passing through an axicon [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **239**:367~372
- 6 T. Manz, T. Schwarz, M. Maier. Stimulated Stokes and anti-Stokes Raman scattering in liquid acetone with a Bessel beam [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **235**:201~217
- 7 Jun Amako, Kazuto Yoshimura, Daisuke Sawaki *et al.*. Laser-based microprocesses using diffraction-free beams generated by diffractive axicons [C]. *SPIE*, 2005, **5713**:497~507
- 8 Lü Baida. Laser Optics [M]. 3rd edition. Beijing: High Education Publishing House, 2003. 253~254  
吕百达. 激光光学[M]. 第3版. 北京:高等教育出版社, 2003. 253~254
- 9 S. Monk, J. Arlt, D. A. Robertson *et al.*. The generation of Bessel beams at millimeter-wave frequencies by use a axicon [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **170**:213~215
- 10 Wu Fengtie, Zhang Wenzhen. Study on Cr<sup>4+</sup>:YAG Q-switched laser with convex-ARR unstable resonator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(1):1~3  
吴逢铁, 张文珍. 凸-ARR 非稳腔中 Cr<sup>4+</sup>:YAG 调 Q 激光器的研究[J]. 中国激光, 2001, **A28**(1):1~3
- 11 Fengtie Wu, Wenzhen Zhang. High energy and high stability Cr<sup>4+</sup>:YAG passively Q-switched laser with convex-ARR unstable resonator [J]. *Optics and Laser Technology*, 2000, **32**(2):107~110
- 12 Cao Yilei, Gao Chunqing. Analysis on the accuracy of beam parameter measurement by using CCD array [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(5):583~586  
曹一磊, 高春清. 基于面阵 CCD 的激光光束参数测量系统精度分析[J]. 光学技术, 2004, **30**(5):583~586