

全固态调 Q 激光器产生脉冲 Bessel 光束

王 涛, 杜团结, 庄凤江, 吴逢铁

(华侨大学 信息科学与工程学院 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘 要: 使用连续式输出的砷化镓半导体激光器泵浦的掺钕钒酸钇激光器作为光源, 被动式通过轴棱锥产生 Bessel 光束。在激光谐振腔内加入 Cr^{4+} :YAG 晶体调 Q 产生脉冲 Bessel 光束。理论模拟了 1 064 nm 波长光束经过轴棱锥之后的三维传播图和截面光强分布。通过实验得到了 1 064 nm 波长脉冲 Bessel 光束的脉冲宽度和脉冲重复率, 并计算得到了单脉冲 Bessel 光束的能量和峰值功率。利用光束分析仪记录了 1 064 nm 波长 Bessel 光束的截面光强分布, 并测量了中心光斑的直径, 得到的数据与理论计算基本吻合。

关键词: 脉冲 Bessel 光束; 半导体激光器; 轴棱锥; 调 Q

中图分类号: O436.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3505-05

Solid-state Q-switch laser generating pulsed Bessel beam

Wang Tao, Du Tuanjie, Zhuang Fengjiang, Wu Fengtie

(Fujian Key Laboratory of Optical Beam Transmission and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The laser diode pumped Nd:YVO₄ laser was used as light source, Bessel beam was generated by passively passing through axicon. The pulsed Bessel beam was generated by putting the Cr⁴⁺:YAG in the laser resonator. The propagation and cross-section distribution of 1 064 nm Bessel beam were simulated. In experiment, the pulse width and pulse repetition rate of 1 064 nm pulse Bessel beam were obtained, the energy and the peak power of pulsed Bessel beam were calculated. The cross-section intensity distribution of Bessel beam was recorded by the laser beam analysis and the diameter of centre spot was measured. The experimental results agrees well with the simulation.

Key words: pulsed Bessel beam; laser diode; axicon; Q-switch

收稿日期: 2014-03-02; 修订日期: 2014-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(61178015); 福建省自然科学基金(2012J01278)

作者简介: 王涛(1986-), 男, 硕士生, 主要从事光束传输与变化的理论和技术方面的研究。Email: wang150490@163.com

导师简介: 吴逢铁(1958-), 男, 教授, 博士, 主要从事光束传输与变换, 短脉冲技术及非线性光学等方面的教学与科研工作。

Email: fengtie@hqu.edu.cn

0 引言

无衍射 Bessel 光束是由 J.Durnin 在 1987 年首次提出的^[1]。相对于高斯光束, Bessel 光束在物理学、生物学、工程学等领域的应用中具有很多优势。Bessel 光束在传播过程中保持其宽度和形状不变, 可以聚焦成一条长而窄的线, 并且遇到障碍物能够重建, 通过光束变换容易获得局域空心光束(Bottle beams)^[2-5]。Bessel 光束在精确测量与准直^[6]、原子和纳米量级粒子的操作^[7]、生物细胞的成像和信息提取^[8-9]等领域有着广泛的应用。

一些无衍射光束的应用需要高能量和高峰值功率来实现, 脉冲 Bessel 光束在这些领域具有广泛的应用。例如, 激光加工和光刻^[10-11]、在非线性光学中作为泵浦脉冲光源^[12-13]、利用长等离子通道控制大气中的闪电等^[14]。吴逢铁^[15]和 Shahrazad parsia^[16]等人分别于 2007 和 2012 年利用氙灯泵浦的 Nd:YAG 激光器和轴棱锥被动式产生脉冲 Bessel 光束。但是氙灯泵浦的 Nd:YAG 激光器体积较大、需要循环水冷却, 且泵浦光源和工作物质密封在一个聚光腔内、不便于仪器的维修和更换。为了实现小型化和全固化, 文中采用 LD 泵浦的 Nd:YVO₄ 激光器和轴棱锥, 利用调 Q 技术产生脉冲 Bessel 光束。LD 泵浦的固体激光器是一个结构紧凑、全固体化的激光器件, 能够实现高功率、高光束质量和高稳定工作。与氙灯泵浦的 Nd:YAG 激光器相比, LD 泵浦的 Nd:YVO₄ 激光器具有寿命长、体积小、结构简单、使用方便等优点。在实验中, 得到了脉冲宽度为 40.26 ns、单脉冲功率为 22.26 μJ、峰值功率为 553 W 的脉冲 Bessel 光束。实验得到的 Bessel 光束截面图和中心光斑直径与理论模拟基本吻合。

1 理论模拟

高斯光束的场分布 $E_1 = E(\rho) = \exp(-\frac{\rho^2}{\omega_0^2})$ (其中 ω_0 为高斯光束的束腰半径); 当正入射到轴棱锥上, 轴棱锥的振幅透过率为:

$$t(\rho) = \begin{cases} \exp[ik(n-1)\gamma\rho] & (\rho \leq R) \\ 0 & (\rho > R) \end{cases} \quad (1)$$

根据广义的惠更斯-菲涅耳衍射积分公式, 可得高斯光束经过轴棱锥在 (r, φ, z) 处的光场分布为:

$$E(r, \varphi, z) = \frac{\exp[ik(z + \frac{r^2}{2z})]}{i\lambda z} \int_0^R \exp(-\frac{\rho^2}{\omega_0^2}) J_0(\frac{k\rho r}{z}) \exp[\frac{ik\rho^2}{2z} - ik(n-1)\gamma\rho] \rho d\rho \quad (2)$$

式中: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波矢, λ 为波长; R 为通过轴棱锥的光束半径; ρ 为源的径向距离; r, φ 为场的径向距离和方位角; z 为轴向距离。设轴棱锥顶点为原点, n 是轴棱锥的折射率, γ 是轴棱锥的底角。由于光束通过轴棱锥是圆柱轴对称的, 所以方位角不影响光场分布。取 $R = 0.4 \text{ mm}$, $n = 1.458$, $\gamma = 1^\circ$, $\omega_0 = 2 \text{ mm}$ 。可以得到 1064 nm 波长光束经过轴棱锥后的轴向光强分布图和截面光强分布图。

图 1 是 1064 nm 波长红外 Bessel 光束的轴向光强分布图。从图中可以看出, 在传播距离的范围为 0~50 mm 内, 中心光斑和周围亮环随着传播距离的增加并无明显变化, 该光束可以称为为近似无衍射 Bessel 光束, 而传播距离在 50 mm 以后, 中心光斑发散明显, 光束的无衍射性质基本消失。图 2 是 1064 nm 波长红外 Bessel 光束的截面光强分布图。图 2(a)、(b)、(c) 经过轴棱锥后的传播距离 z 分别为 20 mm、30 mm、40 mm。从图中可以看出 1064 nm 波长红外 Bessel 光束在无衍射距离内截面光强分布无明显变化, Bessel 光束中心光斑直径约为 100 μm。取传播距离为 0 mm 处中心光斑直径为 100 μm 的高斯光束, 可得到如图 3 所示的不同位置处的高斯光束截面光强分布图。图 3(a)、(b)、(c) 传播距离 z 分别为 2 mm、5 mm、8 mm, 通过计算可得此高斯光束的瑞利距离为 7.4 mm, 远小于 Bessel 光束的最大无衍射距离。

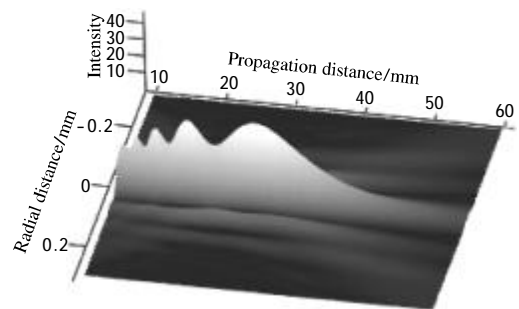


图 1 Bessel 光束轴向光强分布图

Fig.1 Intensity distribution along the propagation distance of the non-diffracting beam

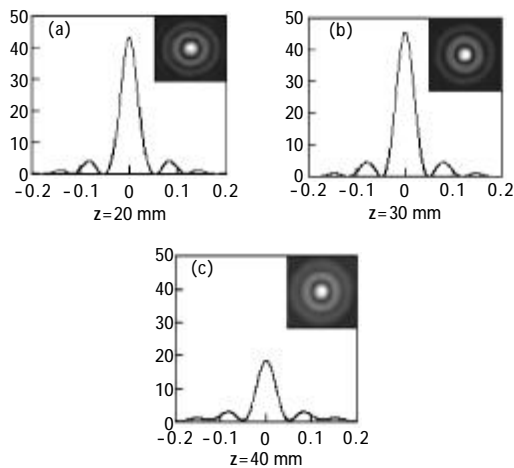


图 2 不同位置处 Bessel 光束截面光强分布图

Fig.2 Cross-section intensity distribution of the non-diffracting beam at the different distance

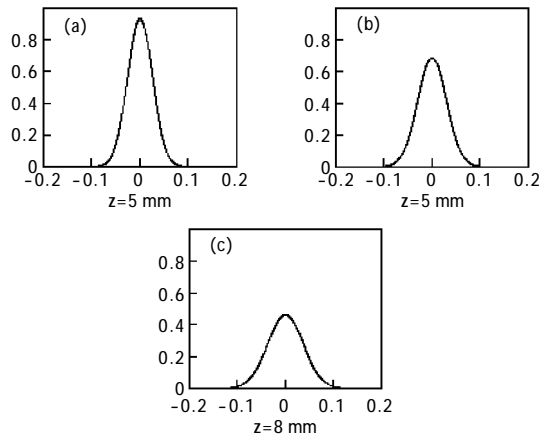


图 3 不同位置处高斯光束截面光强分布图

Fig.3 Cross-section intensity distribution of the Gauss beam at the different distance

2 实验装置和实验结果

图 4 是 LD 泵浦的 Nd:YVO₄ 调 Q 激光器产生脉冲红外 Bessel 光束的实验装置图。如图 4 所示, LD 发射出的波长为 808 nm 的泵浦光经过由平凸透镜 L₁、L₂ 组成的扩束准直聚焦透镜组后集中入射到工作物质 Nd:YVO₄ 晶体内部; 其最高泵浦功率为 6.5 W。谐振腔由凹面镜 M₁ 和平面镜 M₂ 组成。凹面镜 M₁ 为激光输入镜, 该镜片为对基频光 1 064 nm 全反、同时对泵浦光 808 nm 高透的双色镜; 其曲率半径为 500 cm。激光输出镜为平面镜 M₂ 对 1 064 nm 波长有 40% 透过率, M₁-M₂ 之间的腔长为 9.5 cm。其中, Cr⁴⁺:YAG 晶体为具有饱和吸收作用的被动调 Q 晶体, 用于产生脉冲激光输出。轴棱锥的底角为 1°,

折射率为 1.458。

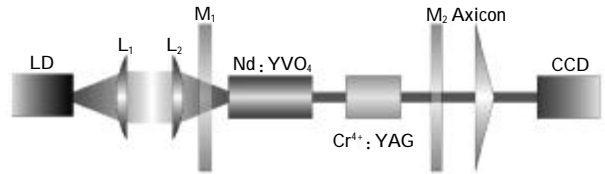


图 4 LD 泵浦的 Nd:YVO₄ 激光器调 Q 产生脉冲 Bessel 光束的装置图

Fig.4 Experimental setup of laser diode pumped Nd:YVO₄ laser generating pulsed Bessel beam by Q-switch

采用 Tektronix 公司的 DPO3032 型示波器(300 MHz 带宽, 2.5 GS/s 采样速率)分析实验获得的脉冲式 Bessel 激光光束, 并测得相应的脉冲波形图(见图 5)。

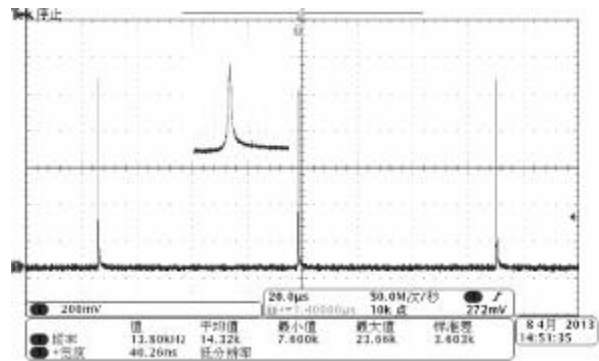


图 5 1 064 nm 波长 Bessel 光束脉冲序列图

Fig.5 Pulse train of 1 064 nm Bessel beam

图 5 是调 Q 激光器产生的红外 Bessel 光束的脉冲序列图, 从图中可以看出输出激光脉冲宽度为 40.26 ns; 脉冲的间隔约为 70 μs, 对应的重复频率为 14 kHz。测得调 Q 输出 Bessel 光束的平均功率为 318 mW。根据上述实验数据可得, 该 Bessel 激光光束的单脉冲能量为 22.26 μJ, 脉冲峰值功率为 553 W。

实验中, 泵浦电流达到 2.0 A 时, 可输出调 Q 输出脉冲无衍射光束; 泵浦电流达到 2.2 A 时, 调 Q 输出脉冲无衍射光束的功率和 Q 开关提取效率增大; 泵浦电流达到 2.4 A 时, 脉冲无衍射光束功率增大, 但 Q 开关提取效率下降。所以文中采用 2.2 A 的泵浦电流, 对应的泵浦功率为 6.5 W, 输出功率为 2.61 W 时的实验数据。

使用 OPHIR 公司的 SP503U 型光束分析仪分析经过轴棱锥之后产生的 Bessel 光束。光束分析仪的光谱范围为 190~1 100 nm, 有效像素点为 640×480。首先使用光束分析仪拍摄入射轴棱锥的光束, 利用光束分析仪附带软件测量测得入射轴棱锥的光束半

径约为 0.4 mm。

根据最大无衍射距离的计算公式

$$z_{\max} = \frac{R}{(n-1)\gamma} \quad (3)$$

将入射轴棱锥的光束半径 $R=0.4$ mm, 轴棱锥的折射率 $n=1.458$, 轴棱锥底角 $\gamma=1^\circ$ 代入公式计算得到 $z_{\max}=50.04$ mm, 与理论模拟基本吻合。在距离轴棱锥 40 mm 处拍摄得到 Bessel 光束的截面光强分布图。

从图 6 中可以看出, Bessel 光束具有强度高而半径小的中心光斑, 周围有 5 个清晰的亮环。图中下边和左边的曲线表示的是横轴和纵轴的光强分布。与理论模拟得到的光强分布基本一致。

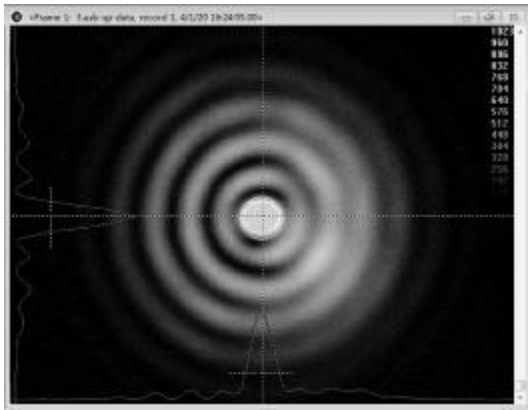


图 6 1064 nm 波长 Bessel 光束截面光强分布图

Fig.6 Cross-section intensity distribution of 1064 nm Bessel beam

根据中心光斑半径的计算公式:

$$\rho = \frac{2.405}{\alpha} = \frac{2.405}{k(n-1)\gamma} \quad (4)$$

式中: ρ 为 Bessel 光束的中心亮斑半径; α 为径向波矢分量; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波矢。将波长 $\lambda=1064$ nm, 轴棱锥的折射率 $n=1.458$, 轴棱锥底角 $\gamma=1^\circ$ 代入公式计算得到中心亮斑直径 $D=2\rho=101.9$ μm 。利用光束分析仪附带软件测量, 可以得到中心光斑直径为 96.8 μm , 与理论模拟基本吻合。

3 结论

文中实现了在一个结构紧凑、全固体化的激光器件上得到峰值功率高、光束质量好的脉冲 Bessel 光束, 为脉冲 Bessel 光束的应用提供了一种使用方便、操作简单、光束能量高、光束质量好的全固态光源。在理论模拟中, 模拟了 1064 nm 波长光束经过轴

棱锥产生的 Bessel 光束的传播图和截面分布图。在实验中, 使用连续式输出的砷化镓半导体激光器泵浦的掺钕钒酸钇激光器作为光源, 被动式通过轴棱锥产生 Bessel 光束。在谐振腔内加入 Cr^{4+} :YAG 晶体调 Q 产生脉冲 Bessel 光束, 得到了脉冲宽度为 40.26 ns、单脉冲功率为 22.26 μJ 、峰值功率为 553 W 的脉冲 Bessel 光束。实验得到的 Bessel 光束截面分布与理论模拟吻合, 实验得到的中心光斑直径与理论计算基本吻合。

参考文献:

- [1] Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams [J]. J Opt Soc Am A, 1987, 4(4): 651-654.
- [2] Chavez-cerda S, New G H C. Evolution of focused Hankel waves and Bessel beams[J]. Optics Communications, 2000, 181: 369-377.
- [3] Zhang Qian'an, Wu Fengtie, Zheng Weitao, et al. If-reconstructing properties of high-order Bessel-Gauss beam [J]. Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41(10): 1131-1137. (in Chinese)
张前安, 吴逢铁, 郑维涛, 等. 高阶贝塞尔-高斯光束的自重建特性[J]. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2011, 41(10): 1131-1137.
- [4] Cheng Zhongming, Wu Fengtie, Zhang Qian'an, et al. New method of generating self-imaged optical bottle beams and particles captured[J]. Acta Phys Sin, 2012, 61(9): 094201. (in Chinese)
程治明, 吴逢铁, 张前安, 等. 自成像局域空心光束产生的新方法 & 粒子俘获[J]. 物理学报, 2012, 61(9): 094201.
- [5] Ma Liang, Wu Fengtie. New combined positive axicon for generating bottle beam [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(10): 1988-1991. (in Chinese)
马亮, 吴逢铁. 新型组合正轴棱锥产生局域空心光束[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1988-1991.
- [6] Yu C, Wang M R, Varela A J, et al. High-density non-diffracting beam array for optical interconnection [J]. Opt Commun, 2000, 177: 369-376.
- [7] Grier D G. A revolution in optical manipulation [J]. Nature, 2003, 424: 810-816.
- [8] Planchon T A, Gao L, Milkie D E, et al. Rapid three-dimensional isotropic imaging of living cells using Bessel beam plane illumination[J]. Nat Meth, 2011, 8: 417-423.
- [9] Keller P J, Schmidt A D, Santekka A, et al. Fast, high-con-

- trast imaging of animal development with scanned light sheet-based structured-illumination microscopy [J]. *Nat Methods*, 2010, 7(8): 637-642.
- [10] Matsuoka Y, Kizuka Y, Inoue T. The characteristics of laser micro drilling using a Bessel beam [J]. *Appl Phys A*, 2006, 84: 423-430.
- [11] Courvoisier F, Lacourt P A, Jacquot M, et al. Surface nanoprocessing with nondiffracting femtosecond Bessel beams [J]. *Opt Lett*, 2009, 34: 3163-3165.
- [12] Orlov S, Stabinis A, Smilgevičius V, et al. Parametric excitation of X-waves by downconversion of Bessel beams in nonlinear crystals[J]. *Opt Lett*, 2007, 32: 68-70.
- [13] Averchi A, Faccio D, Berlasso R, et al. Phase matching with pulsed Bessel beams for high-order harmonic generation [J]. *Phys Rev A*, 2008, 77: 021802.
- [14] Kasparian J, Ackermann R, André Y B, et al. Electric events synchronized with laser filaments in thunderclouds[J]. *Opt Express*, 2008, 16: 5757-5763.
- [15] Wu F T, Chen Y B, Guo D D. Nanosecond pulsed Bessel-Gauss beam generated directly from a Nd:YAG axicon-based resonator[J]. *Appl Opt*, 2007, 46: 4943.
- [16] Parsa S, Fallah H R, Ramezani M, et al. Generation of pulsed Bessel-Gauss beams using passive axicon-theoretical and experimental studies[J]. *Appl Opt*, 2012, 51: 7339.