

文章编号 1004-924X(2007)11-1692-06

基于轴棱锥用主被动方式产生短脉冲高功率近似无衍射光

吴逢铁, 郭东栋, 陈云彬, 邱振兴

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要:利用轴棱锥构成的 Bessel-Gauss 谐振腔,首次由灯泵 Nd:YAG 调 Q 激光器主动式直接输出纳秒高功率近似无衍射 Bessel-Gauss 光脉冲。应用衍射理论给出的 Bessel-Gauss 场分布模型对结果进行分析,数值模拟和实验结果基本吻合。同时利用带抗共振环(ARR)的 Nd:YAG 调 Q 激光器输出的高稳定纳秒高斯脉冲,通过 Axicon 的光束整形,由被动方式获得近似理想的纳秒无衍射零阶 Bessel 光。利用胶片扫描法记录了光强分布的精细结构,测定得出无衍射光的中心光斑半径约为 $90\ \mu\text{m}$,峰值功率密度高达 $2.3 \times 10^9\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。分析比较了主动和被动方式产生纳秒无衍射光的特性和优缺点。

关键词:无衍射光; 纳秒光脉冲; 贝塞耳光; 贝塞耳-高斯光; 轴棱锥

中图分类号:TN242 **文献标识码:**A

Generation of short pulse and high power non-diffracting beam by active and passive schemes based on axicon

WU Feng-tie, GUO Dong-dong, CHEN Yun-bin, QIU Zhen-xing

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

Abstract: Based on an axicon-based Bessel-Gauss resonator, a nanosecond high power non-diffracting pulsed Bessel-Gauss beam was generated directly from a flashlamp pumped Q switched Nd:YAG laser for the first time. The experimental results were analyzed using the Bessel-Gauss model deduced from the diffraction integral theory and they were consistent with the numerical simulation. On the other hand, by a high stability nanosecond Gaussian pulse generated from a Q switched Nd:YAG laser with an anti-resonant ring and pulse shaping passing through an axicon, a nanosecond non-diffracting zero order Bessel beam was obtained using the passive method. A film-scanning was used to record the fine structure of the intensity profile, and a beam analyzer to measure the pulse characteristics. The measured results show that the central spot size is about $90\ \mu\text{m}$ and the peak power density of the central spot reaches to $2.3 \times 10^9\ \text{W}/\text{cm}^2$. Finally, the active and passive schemes for generating the nanosecond non-diffracting beam were compared and analyzed.

Key words: non-diffracting beam; nanosecond light pulse; Bessel beam; Bessel-Gauss beam; axicon

收稿日期:2007-07-28;修订日期:2007-08-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60477041);福建省自然科学基金计划资助项目(No. A0710011;No. A0410017)

1 引言

光场不变的激光束即所谓的无衍射光在物理、化学、生物和工程方面有着广泛的应用,因此 Bessel 光和 Bessel-Gauss 光获得了极大的关注^[1-2]。最近的研究表明,利用无衍射光的重建特性可同时对不同层面的多个微粒进行光学微操作^[3]。无衍射光的产生大致可分为被动式和主动式两大类。所谓被动方式也就是将激光器输出的其它类型光束(如高斯光束等)通过腔外滤波整形而获得无衍射 Bessel 光。常用的方法有轴棱锥(Axicon)法、环缝法、全息法及利用衍射相位元件等。而主动方式就是设计特殊的谐振腔直接输出无衍射光。主动法近几年有一些理论研究^[4-5],但实验方面报道甚少。2001 年 Khilo 等人采用 Axicon,利用 0.532 μm 绿光泵浦染料直接输出无衍射光^[6];2004 年 Hakola 等人利用相位共轭衍射元件,由二极管端泵浦 Nd:YAG 晶体直接输出 1.06 μm 的 Bessel-Gauss 光^[7];2005 年 Martha 等人由反射 Axicon 构成的 CO₂ 激光器直接输出 1.06 μm 的 Bessel-Gauss 光^[8]。值得注意的是所有这些实验产生的均为连续低功率近似无衍射光,很少涉及短脉冲、高功率无衍射光,特别是主动式产生短脉冲高功率无衍射光的实验尚未见过报道。由于短脉冲无衍射光中心光斑尺寸小(几十 μm)、脉宽窄(几十 ns),具有极强的峰值功率密度,因而在非线性光学、激光等离子体、惯性约束核聚变(ICF)^[9]、激光深聚焦微加工^[10]等方面具有独特优势,因此,研究如何产生短脉冲、高功率的近似无衍射光具有较高的理论和应用价值。

由于 Axicon 产生 Bessel 光具有结构简单、光转换效率高及光损伤阈值高等优点,为此,本文进行了基于 Axicon 的主动和被动方式产生短脉冲高功率近似无衍射光的研究。利用 Axicon 构成 Bessel-Gauss 谐振腔,首次在单灯泵浦的 Nd:YAG 调 Q 激光器中,由主动方式直接获得短脉冲高功率近似无衍射 Bessel-Gauss 光。应用衍射理论给出的 Bessel-Gauss 光场分布,对实验结果进行分析,数值模拟和实验结果基本吻合。同时利用带抗共振环(ARR)的调 Q Nd:YAG 激光器输出高稳定纳秒高斯脉冲,通过 Axicon 的光束整形,由被动方式获得高质量的纳秒近似无衍射

Bessel 光。最后分析比较了主、被动方式产生纳秒无衍射光的特性和优缺点。

2 理论模型

通过 Axicon 被动式产生的无衍射光一般为零阶 Bessel 光。利用 Colins 公式,由广义惠更斯-菲涅尔衍射积分理论出发,在旋转对称的柱坐标系中可导出衍射光场分布^[11]:

$$E(r, z) = -\frac{ik}{z} \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right) \int_0^R E(\rho, 0) J_0\left(\frac{k\rho r}{z}\right) \exp\left(\frac{ik\rho^2}{2z}\right) \rho d\rho, \quad (1)$$

若考虑 Axicon 的振幅透过率:

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

则平行光通过 Axicon 后的光强分布^[12]:

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

式中 λ 为光波波长, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数, n 和 γ 为 Axicon 的折射率和底角(Axicon 平面和锥面间的夹角), R 是通过 Axicon 的光束半径, $E(\rho, 0) = E_0 e^{ikz}$ 为入射平面波的场分布, ρ 和 r 分别为源和场的径向距离, z 为传播轴上的距离。

另一方面,当采用 Axicon-平面镜构成谐振腔主动式产生无衍射光时,其腔内振荡主模式为: Axicon 产生的 Hankel 锥面波和 F-P 腔产生的高斯场叠加而成,即上述腔型产生是受钟型分布光调制的 Bessel 光,其特性类似于 Bessel-Gauss 光^[13]。由衍射积分公式(1)出发,当 m 阶 Bessel-Gauss 光在光腰处的场分布为:

$$U(\rho, z=0, \phi) = U_0 J_m(\alpha\rho) \exp(-\rho^2/\omega_0^2) \exp(im\phi), \quad (3)$$

可以导出 Bessel-Gauss 光沿 z 轴传播的光场分布为^[6]:

$$U(\rho, z, \phi) = C \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left\{i\left[\left(k - \frac{\alpha^2}{2k}\right)z - \Phi(z)\right]\right\} J_m\left(\frac{\alpha\rho}{1+iz/z_R}\right) \exp\left\{-\left[\frac{1}{\omega(z)} - \frac{ik}{R(z)}\right](\rho^2 + \theta^2 z^2)\right\} \exp(im\phi), \quad (4)$$

这里 $z_R = \frac{k\omega_0^2}{2}$ 为瑞利长度, 参量 $\alpha = k_r = k \sin \theta$ 为径向波矢 (其中 θ 为锥波波前与 z 轴的夹角), 光斑尺寸 $\omega(z)$ 、波前曲率半径 $R(z)$ 和相位因子 $\Phi(z)$ 的传播特性相同于高斯光束。当 $m=0$, 式 (4) 为零阶 Bessel-Gauss 光的场分布。

3 实验装置与条件

Bessel 光可以理解为无数波矢在锥面上的平面波的叠加, 平面波通过薄 Axicon 被转变为锥面波。如图 1 所示, 在 Axicon 后的区域 A 内存在 Bessel 光^[14], 这也是被动方式产生 Bessel 光的基本图像。另一方面, 如何利用 Axicon 来设计产生无衍射光的谐振腔呢? 由于高斯光的波面

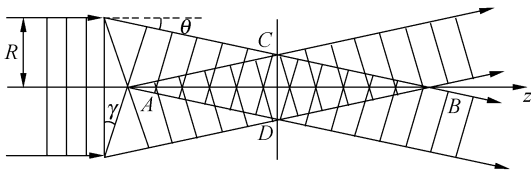


图 1 平面波通过 Axicon 后产生锥面波

Fig. 1 Conical wave generated by plane wave passing through axicon

是球面, 所以可利用带球面镜的谐振腔来产生高斯光。Bessel 光的波面是锥面, 两个锥顶相对放置的 Axicon 便可以构成一个使 Bessel 光能在其中振荡的光学谐振腔。在图 1 的 B 处放置一个相同的 Axicon, 从而构成了 Bessel 谐振腔, 但是这样只能使 Bessel 光在腔内振荡。考虑其对称性, 若在平面 CD 处放置一个平面镜, Bessel 光将再现地反射, 这样在腔外就会有 Bessel 光直接输出, 可以求得谐振腔的腔长为:

$$L = \frac{R}{2 \tan \theta} \approx \frac{R}{2\theta} = \frac{R}{2(n-1)\gamma}. \quad (5)$$

图 2 和图 3 分别为被动和主动式产生纳秒近似无衍射光的实验装置图。

被动装置由带抗共振环的单灯泵浦 Nd:YAG 激光器^[15] 输出高稳定的纳秒高斯光脉冲经 M_5 耦合输出, 由透镜 f_1 和 f_2 准直扩束并通过光阑 A_1 控制光束尺寸, 然后垂直入射到底角为 0.5° 的 K9 玻璃 Axicon (折射率 $n=1.506$) 获得高稳定近似理想的无衍射零阶 Bessel 光脉冲。其

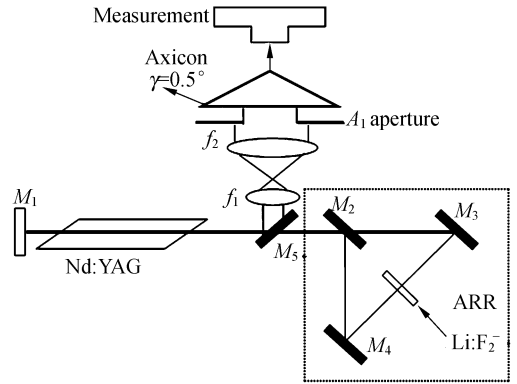


图 2 被动式产生纳秒无衍射光

Fig. 2 Nanosecond non-diffracting beam generated by passive method

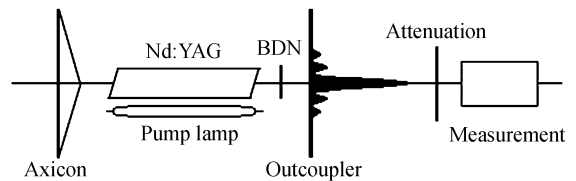


图 3 主动式产生纳秒无衍射光

Fig. 3 Nanosecond non-diffracting beam generated by active method

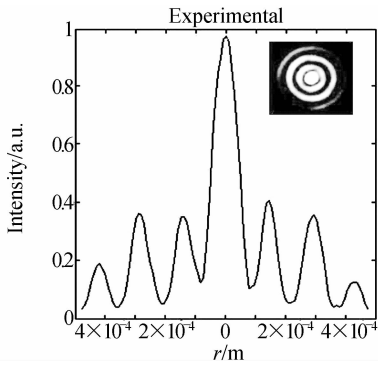
中, Nd:YAG 棒尺寸为: $5 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 调 Q 材料为 Li:F_2^- 色心晶体。而主动式的 Axicon-平面镜腔则由部分反射平面镜直接输出近似无衍射的 Bessel-Gauss 光, 其中 Axicon 平面镀 $1.06 \mu\text{m}$ 的全反膜, 材料折射率 $n=1.506$, 底角 $\gamma=0.5^\circ$, 调 Q 元件为 BDN 染料片。

4 实验结果与分析讨论

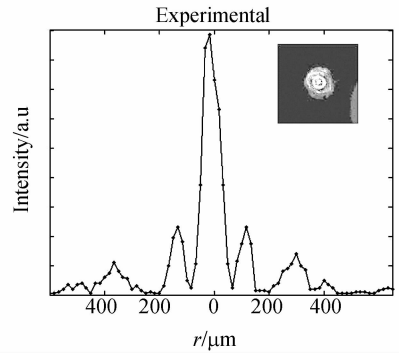
由 400 MHz 存储示波器 (HP54520A 型) 对输出脉冲波形和宽度进行记录, 被动式和主动式分别输出 26 ns 和 38 ns 的近似无衍射调 Q 激光单脉冲。由 PT-1 型激光能量计测得被动式 Bessel 光脉冲能量为 15 mJ。

由于激光光束横截面光强分布是评估光束类型和质量的主要依据, 本文利用光束分析仪 (Tapir Cam D-UCM-20-15) 和胶片扫描法给出近似无衍射光的光强分布并同数值模拟结果比较。图 4、图 5 分别为被动式和主动式的实验结果与数值模拟。

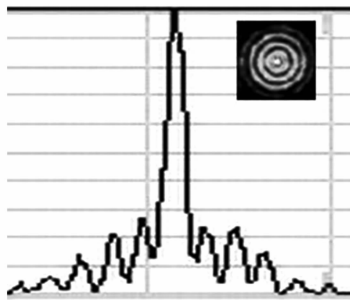
实验所用光束分析仪参量为: 感光元件 CCD



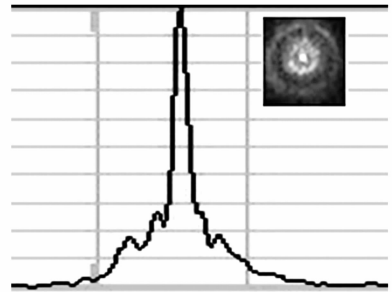
(a) 胶片扫描法
(a) Film scanning



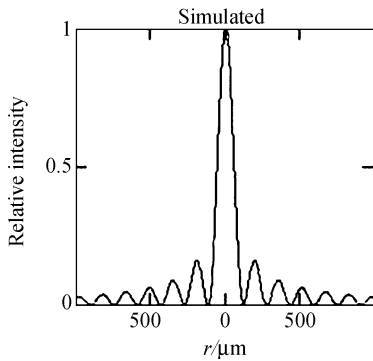
(a) 胶片扫描法
(a) Film scanning



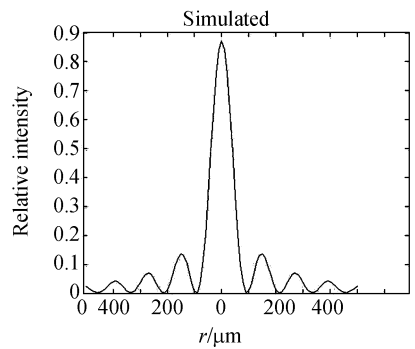
(b) 光束分析仪
(b) Analyzer



(b) 光束分析仪
(b) Analyzer



(c) 数值模拟
(c) Numerical simulation



(c) 数值模拟
(c) Numerical Simulation

图 4 被动式产生近似无衍射 Bessel 光的截面光强分布
Fig. 4 Optical intensity distribution in cross-section of non-diffracting Bessel beam generated using passive method

图 5 主动式产生近似无衍射 Bessel-Gauss 光的截面光强分布
Fig. 5 Optical intensity distribution in cross-section of non-diffracting Bessel-Gauss beam generated using active method

尺寸 $19.6 \text{ mm} \times 14.8 \text{ mm}$;有效像素 $1\,200 \times 1\,024$;像素单元尺寸 $14.4 \mu\text{m} \times 14.4 \mu\text{m}$ 。原理上说它能精确测定尺寸为几十微米量级大小的连续波光斑,但对于脉冲激光尤其对短脉冲激光,分

析仪无法保持高的分辨率,见图 4(b)和图 5(b)。为了精确记录和测定微米量级的纳秒 Bessel 光和 Bessel-Gauss 光的截面光强分布和中心亮斑

尺寸,实验同时采用了胶片扫描测量法,结果见图 4(a)和图 5(a)。胶片扫描法就是直接让所测光脉冲在反转胶片上曝光,显影后的底片通过滚筒扫描仪获得分辨率相当高的光斑电子图像,给出截面光强分布的精细结构。利用这一图像,分别测得被动式和主动式产生的近似无衍射光的中心亮斑半径约为 $90\ \mu\text{m}$ 和 $98\ \mu\text{m}$ 。理论上通过 Bessel 函数的第一零点值可求出 Bessel 光的中心光斑半径大小^[16]:

$$r_0 = \frac{2.405}{\alpha} = \frac{2.405}{k \sin \theta} = \frac{3.383 \lambda}{(n-1)\gamma}. \quad (6)$$

将参数 $\lambda = 1.06\ \mu\text{m}$, $n = 1.506$, $\gamma = 0.5^\circ$ 代入式 (6),得到中心亮斑半径为 $92\ \mu\text{m}$,实验结果和理论值基本吻合。

此外,由实验得到的 Bessel 光脉冲能量和脉宽可估计其光功率约为 $0.58 \times 10^6\ \text{W}$ 。另一方面,由于 Bessel 光各亮环具有相同的能量,中心亮斑的能量约为 $1.5\ \text{mJ}$ (以 10 个亮环计算),亮斑半径约 $90\ \mu\text{m}$,其功率密度高达 $2.3 \times 10^9\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。

基于 Axicon 的主动和被动方式均可获得纳秒量级的短脉冲近似无衍射光,这两种装置和输出光斑均有各自的特点和优势,下面进行简单的分析讨论。

被动方式产生的短脉冲无衍射光的光束质量很好,为近似理想的零阶 Bessel 光,见图 4。而谐振腔(主动式)直接输出的短脉冲无衍射零阶 Bessel-Gauss 光是受高斯分布调制的 Bessel 光,其径向强度随径向距离 ρ 增大而迅速衰减,也就是说除了中心亮斑,一般仅有 2~3 个亮环,实验结果与理论模拟基本是吻合的,这一结果同目前少有的几个主动式得到的输出结果类似^[6-7]。然而,相比被动式,主动方式产生的近似无衍射光的

光束质量仍需进一步提高。主动式优势在于不需外部的光学元件即可从谐振腔直接输出近似无衍射光,结构简单,而且可以直接进行腔内频率转换,获得不同波长的短脉冲无衍射光,扩展了光束的应用范围。若采用 LD 泵浦^[17-18],可实现器件的多波长输出和器件的小型化、全固化和实用化。

5 结 论

由 Axicon 作为关键的光学元件,利用 Axicon-平面镜的 Bessel-Gauss 谐振腔主动式直接产生近似无衍射纳秒光脉冲,其输出模式为近似零阶 Bessel-Gauss 光。同时利用带 ARR 结构的 Nd:YAG 调 Q 激光器输出的高稳定纳秒光脉冲通过 Axicon 转换得到了高质量的纳秒近似理想的无衍射零阶 Bessel 光脉冲。比较分析了这两种结构方式产生近似无衍射光的特性和优缺点。利用光束分析仪和胶片扫描法给出光脉冲的截面光强分布,实验结果与理论分析基本吻合,即被动式产生的为 Bessel 光,主动式产生的为 Bessel-Gauss 光。利用胶片扫描法获得高分辨光斑图,测定了输出无衍射光的中心光斑半径约为 $90\ \mu\text{m}$,与理论值大致相符。这种半径为几十 μm ,脉宽为几十纳秒的近似无衍射光具有极高的峰值功率密度(高达 $2.3 \times 10^9\ \text{W}/\text{cm}^2$),在非线性光学、脉冲光镊等方面有极大的应用潜力,而且利用 Axicon 产生的无衍射光通过透镜聚焦很容易得到另一类新型光束—局域空心光束(bottle beam)^[19],近年来它作为光镊和光学扳手在生命科学中正发挥着巨大的作用。

参考文献:

- [1] DURNIN J. Exact solution for non-diffracting beams. I. the scalar theory [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, 4(4): 651-654.
- [2] GORI F, GUATTARI G, PADOVANI C. Bessel-Gauss beams [J]. *Opt. Commun.*, 1987, 64: 491-495.
- [3] GARCES-CHAVEZ V, MCGLOIN D, MELVILLE H, et al.. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstruction light beam [J]. *Nature*, 2002, 419:145-547.
- [4] LING D X, LI J C, CHEN J R. Analysis of eigenfields in the axicon-based Bessel-Gauss resonator by the transfer-matrix method [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, 23(4):912-918.
- [5] RAUL I, HERNANDEZ-ARANDA, CHAVEZ-CERDA S, et al.. Theory of unstable Bessel resonator [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, 22(9):1909-1917.

- [6] ANATOL N, KHILO, EUGENY G, *et al.*. Axicon-based Bessel resonator: analytical description and experiment [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 2001, A18 (8):1986-1992.
- [7] HAKOLA A, BUCHTER S C, KAJAVA T, *et al.*. Bessel-Gauss output beam from a diode-pumped Nd: YAG laser [J]. *Opt. Commun.*, 2004, 238: 355-370.
- [8] ALVAREZ-ELIZONDO M B, GUIZAR-SICAUIROS M, RODRIGUEZ-MASEGOSA R, *et al.*. Construction and characterization of a CO₂ axicon based Bessel-Gauss resonator [J]. *SPIE*, 2005, 5708:323-331.
- [9] MCGLOIN D, DHOLAKIA K. Bessel beams; diffraction in a new light [J]. *Contemp. Phy.*, 2005, 46(1): 15-28.
- [10] AMAKO J, YOSHIMURA K, SAWAKI D, *et al.*. Laser-based microprocesses using diffraction-free beams generated by diffractive axicon [J]. *SPIE*, 2005, 5713: 497-507.
- [11] FRIBERG A T. Stationary-phase analysis of generalized axicons [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, 13(4):743-750.
- [12] 吕百达. 激光光学(3版)[M]. 北京:高等教育出版社,2003:253-255.
LV B D. *Laser Optic (3rd edition)* [M]. Beijing: High Education Publishing House, 2003:253-255. (in Chinese)
- [13] GUTIERREZ-VEGA J C, RODRIGUEZ-MASEGOSA R, CHAVEZ-CERDA S. Bessel-Gauss resonator with spherical output mirror: geometrical and wave-optics analysis [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, 20(11): 2113-2122.
- [14] MUYS P, VANDAMME E. Direct generation of Bessel beams [J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(30): 6375-6379.
- [15] WU F T, ZHANG W Z. High energy and high stability Cr⁴⁺:YAG passively Q-switched laser with convex-ARR unstable resonator[J]. *Optic & Laser Technology*, 2000, 32 (2): 107-110.
- [16] ARLT J, DHOLAKIA K, ALLEN L, *et al.*. Efficiency of second-harmonic generation with Bessel beams [J]. *Phys. Rev. A*, 1999, 60(3):2438-2441.
- [17] 郝二娟, 檀慧明, 李特,等. LD 端面泵浦的高输出单频 Nd:YVO₄ 绿光激光器[J]. 光学精密工程,2006,14(4): 580-583.
HAO E J, TAN H M, LI T, *et al.*. High output and single-frequency ring Nd:YVO₄ laser end-pumped by diode laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 580-583. (in Chinese)
- [18] 申高, 檀慧明, 刘飞. 全固态 355 nm 连续紫外激光器的优化设计[J]. 光学精密工程,2006,14(5):731-735.
SHEN G, TAN H M, LIU F. Optimization design for all-solid-state 355 nm Continuous-wave ultraviolet laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 731-735. (in Chinese)
- [19] 曾夏辉, 吴逢铁, 刘岚. 干涉理论对 bottle beam 的描述 [J]. 物理学报,2007,56(2):791-797.
ZENG X H, WU F T, LIU L. The description of bottle beam based on the interferential theory [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(2):791-797. (in Chinese)

作者简介:吴逢铁(1958—),男,福建泉州人,博士,华侨大学信息科学与工程学院教授,主要研究方向为激光光束的传输与变换、短脉冲激光技术与非线性光学,已在国内外学术刊物发表论文 70 多篇。E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn