

文章编号: 1000-5013(2010)01-0001-05

主动方式产生近似无衍射光束的新技术

马 亮, 吴逢铁, 马宝田

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 介绍几种主动式产生近似无衍射光的方法,并用谐振腔理论进行分析和模拟.可以发现,利用轴棱锥设计的谐振腔具有结构简单、转换效率高等特点;而采用腔内振幅滤波的谐振腔,则不需要复杂的光学元件和特别的准直技术;用LD泵浦的Nd:YAG激光器输出近似无衍射光,可以有效地提高泵浦光效率和激光输出能量.

关键词: 贝塞耳光;主动方式;谐振腔;贝塞耳-高斯光

中图分类号: O 436

文献标识码: A

无衍射 Bessel 光束具有传播不发散、光场能量高度集中、中心亮斑尺寸小(微米量级)等特性.其诱人特点具有许多潜在应用,在精确测量与准直、精密加工切割、带电粒子和中性原子引导、微操作实验和非线性光学等领域得到广泛的应用.无衍射光的自再现^[1-2]和产生局域空心光^[3-4]的特性使其可作为光镊、光扳手,在生命科学等领域有广阔应用前景^[5-14].目前,产生近似无衍射贝塞尔光束的方法主要分为主动式和被动式两大类.被动式即将其他的光束转换为贝塞尔光,而主动式指的是通过特定结构的谐振腔由激光器直接产生 Bessel 光.相对于被动式,谐振腔无须通过变换其他类型的光,便可产生高质量的 Bessel 光,并且可能在腔内实现对 Bessel 光的频率变换和高功率输出.本文利用谐振腔理论,对几种主动式实现近似无衍射光的最新技术进行分析和模拟.

1 Bessel 光与 Bessel-Gauss 光^[15-18]

理想的 n 阶 Bessel 光场可描述为

$$u_{BB}(r, Z, \varphi) = A_0 \exp(ik_z Z) J_n(k_r r) \exp(in\varphi). \quad (1)$$

式(1)中: J_n 是 n 阶的贝塞尔函数; r, Z, φ 分别是相关的径向、纵向、方位角坐标; k_z 和 k_r 分别是纵向和径向波矢量,且有 $k = \sqrt{k_z^2 + k_r^2} = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 为电磁场区域的波长.

理想的 Bessel 光束具有无限大的能量,但实际上是不可能实现的.在 Durnin 等^[15-17]提出的 Bessel 光的理论和实验的基础上, Gori 等^[19]提出的 Bessel-Gauss 光束(BGBs)是一组近轴波动方程的解.这组解是求解横向受高斯分布调制的 Bessel 光获得的.与理想的无衍射光不同,高斯分布的调制使得 BGBs 携带有限的能量,因此,可以近似的被用于研究贝塞尔光束的特性.

BGBs 可以表示成式(1)的振幅受高斯函数调制的形式,其在腰平面处可以表示成

$$U_{BGB}(r, \varphi, Z=0) = A_0 J_n(k_r r) \exp(-\frac{r^2}{\omega_0^2}) \exp(in\varphi). \quad (2)$$

式(2)中: ω_0 为高斯函数的腰.当 $\omega_0 \rightarrow \infty$ 时, Bessel-Gauss 光变为纯粹的 Bessel 光;而当 $k_r \rightarrow 0$ 时,则变为通常的 Gauss 光.应用菲涅耳衍射积分,可求出距腰 Z 处的光场为

收稿日期: 2009-06-29

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光学效应的研究. E-mail: ftrwu@public.qq.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)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

$$U_{\text{BCB}}(r, \varphi, Z) = A_0 \cdot \frac{\omega_0}{\omega(Z)} J_n \frac{k_r r}{1 + jZ/Z_R} \exp[-\frac{r^2}{\omega(Z)^2}] \times$$
$$\exp\left\{-\left[\frac{1}{\omega(Z)^2} - \frac{jk}{2R(Z)}\right](r^2 + \frac{k_r^2 Z^2}{k^2})\right\} \exp[j\Phi(Z)] \exp(im\varphi).$$

(3)

式(3)中: $R(Z)$ 为高斯函数的波前曲率半径, 距 Z 处的光束半径为 $\omega(Z) = \omega_0 \sqrt{1 + (Z/Z_R)^2}$; Z_R 为高斯函数的瑞利判据, 且 $Z_R = \pi\omega_0^2/\lambda$ 在瑞利判据之内可看成近似平行光束.

2 基于轴棱锥的 Bessel Gauss 谐振腔设计

将一束准直的激光入射轴棱锥底面, 经过转换便可以在最大准直距离内得到近似 Bessel 光, 如图 1 所示. 由几何关系可知, 其最大无衍射距离

$$Z_{\text{max}} = a/(n-1)\gamma.$$

(4)

式(4)中, a 为入射光斑半径, n 为轴棱锥的折射率, γ 为其底角. 在图 1 中的 B 处对称地放置一个相同轴棱锥, 从而构成贝塞尔谐振腔, 但只能使贝塞尔光在腔内振荡. 考虑到对称性, 若在平面 CD 处放置一个平面镜, 贝塞尔光将自在现地反射, 这样腔外就会有贝塞尔光输出^[20].

综上分析, 在轴棱锥的平面镀高反膜, 在平面 CD 上放上一个部分反射的平面镜, 就可以构成贝塞尔谐振腔^[21]. 其腔长 $L = R/(2\tan\theta) \approx R/(2\theta) = R/[2(n-1)\alpha]$. 理论上, 这样的谐振腔将产生贝塞尔光, 但由于孔径的限制, 两个平行平面镜构成的 F-P 腔产生的钟形振幅分布的光^[22], 这通常认为是 Gauss 光. 因此, 上述结构的腔型产生的光场是受钟形分布调制的贝塞尔光, 与 Bessel Gauss 光的特点是一致的^[23].

尽管多种 Bessel Gauss 腔都能用来输出 BCBs, 但基于轴棱锥的谐振腔一直受到关注. 因为它不需要太多的光学元件和特定形状的激活介质, 且轴棱锥的转换效率很高(接近 100%), 抗损伤阈值也很高. 利用基于轴棱锥设计的谐振腔, 首次从实验上获得纳秒级的短脉冲 BCBs^[24], 谐振腔为线性直腔.

实验装置如图 2 所示. 采用单灯泵浦, 工作物质为 Nd:YAG 棒(5 mm × 10 mm), 轴棱锥平面镀上对 1.06 μm 波长的全反膜. 轴棱锥用 K9 玻璃制成, 折射率为 1.506, 腔内放 BDN 染料片作为调 Q 元件, 输出镜为对 1.06 μm 波长半反半透的平面镜. 用光束分析仪记录其横向光强分布. 实验测定的输出脉冲能量约为 10 mJ, 脉冲宽度为 38 ns, 输出功率约为 0.27 MW, 其光场分布与理论上分析的 Bessel Gauss 光的特征基本一致, 如图 3 所示.

Li 等^[25]提出了用两个轴棱锥来设计谐振腔的思想, 两个轴棱锥对称放置如图 4 所示. M_1 和 M_2 为两个平面镜, C_1 和 C_2 为轴棱锥. 可以知道, 在两个轴棱锥之间会形成 Bessel 光束, M_1 镀上全反膜, 做为输出镜的 M_2 镀半透半反膜, 这样谐振腔就会输出 Bessel 光束.

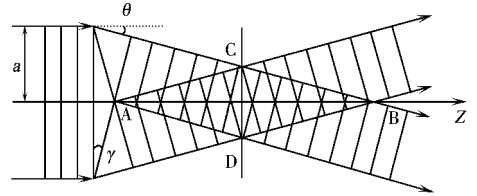


图 1 平面波通过轴棱锥产生贝塞尔光束
Fig. 1 Axicon transforms plane wave into Bessel beam

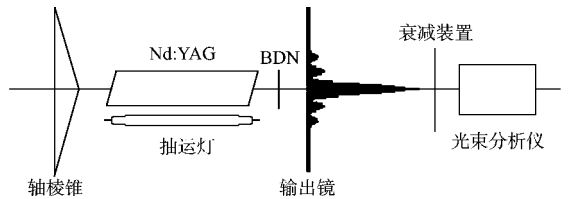


图 2 基于轴棱锥设计的谐振腔示意图
Fig. 2 Scheme of resonator based on axicon

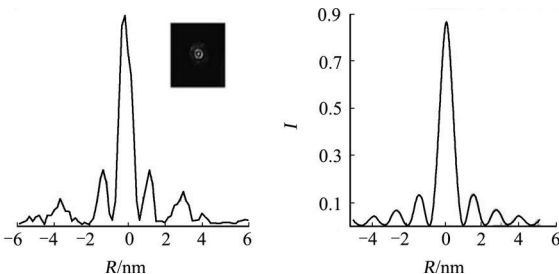


图 3 实验结果与理论模拟图

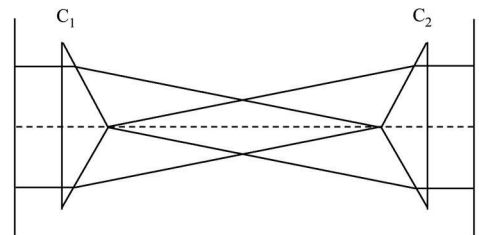


图 4 两个轴棱锥设计的谐振腔示意图

Fig. 3 Result of experiment and theoretical simulation

Fig. 4 Scheme of resonator based on two axicons

上面介绍的谐振腔均为稳定腔, 如果把图 2 中的平面输出镜换成凸面输出镜就会形成非稳腔, 数值

模拟证实其输出光束为 BGBs^[26-27].

3 腔内振幅滤波的 Bessel Gauss 谐振腔

采用腔内振幅滤波谐振腔, 也可以直接输出近似无衍射光^[28]. 适当的选取两镜的参数, 使其形成一对傅里叶变换, 特别由两个曲率半径和腔长一样的凹面镜构成的稳定谐振腔时, 每通过一次振荡区域都会出现傅里叶变换. 因此, 振荡一个来回可以自再现.

腔内振幅滤波谐振腔示意图, 如图 5 所示. 图 5 中, 凹面镜 M_1 和 M_2 的曲率半径 $R=2f$, 沿光轴方向之间的距离为 $L=2f$. M_1 和 M_2 的竖直方向高度为 b , M_1 前是一个半径为 a 的不透明圆盘, 在圆盘和镜的边缘产生了环状无损耗区域($a < r < b$). 当其足够窄($b-a \rightarrow 0$) 时, 环状区域的傅里叶变换为一个贝塞尔区域. 因为 M_1 是和 M_2 形成一对傅里叶变换, 所以在 M_2 处是贝塞尔区域. 既然镜面的曲率半径与高斯振荡的 $R(Z)$ 匹配, 那么这种谐振腔也输出高斯模式, 只要高斯光束的宽度包络许多有效贝塞尔零点, 就会输出高斯调制轮廓的贝塞尔光束. 谐振腔的参数(腔长、镜面曲率半径)决定了高斯振荡模式, 而谐振腔内部的孔径决定了振荡的贝塞尔模式.

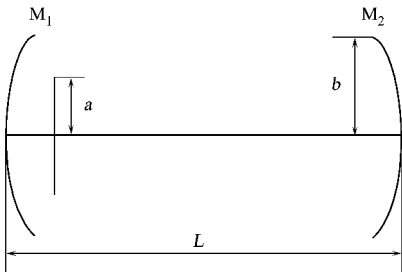


图 5 腔内振幅滤波谐振腔示意图
Fig. 5 Scheme of resonator with internal amplitude filter

采用 Fox-Li 分析方法讨论这种谐振腔. 假定开始一个随机光场收敛于多阶贝塞尔高斯函数(决定于 a, b 的参数), 数值模拟达到稳定状态的零阶贝塞尔高斯光束的强度分布, 如图 6 所示. 图 6 中, 谐振腔中的暗区域即为贝塞尔高斯光束, 其最大的空间范围在镜面 M_2 (位置 e), 在 M_1 处产生了环形圈(位置 a). 这种传播的模式就是 BGBs.

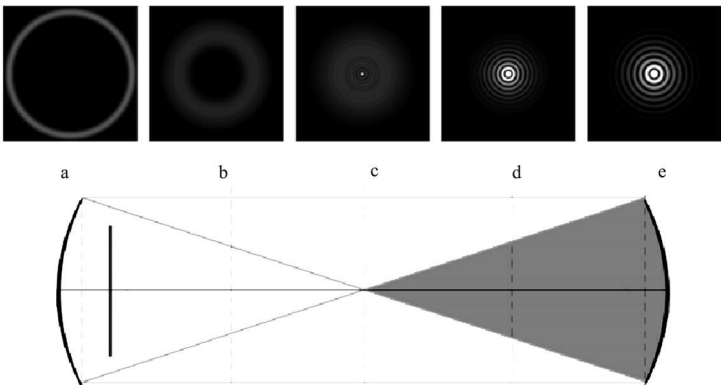


图 6 采用 Fox-Li 迭代法计算腔内光强分布
Fig. 6 Optical intensity distribution of the internal resonator calculated by using Fox-Li algorithm

镜面 M_1 处的强度轮廓是受高斯调制环状光束, 而镜面 M_2 处的强度轮廓为 BGBs(环状光束的傅里叶变换). 如果镜面 M_2 是部分透过的, 谐振腔将输出多阶 BGBs. 这种谐振腔中包括了多种常规的光学元件, 不需要一些特别调整(准直)技术, 由于低损耗的贝塞尔高斯模式仅由镜面 M_2 的参数决定, 镜面 M_2 处一个简单可变的孔径将做为一个模式选择器合适的选择多种厄米高斯模式. 另外, 贝塞尔高斯光并没有填满整个光腔(图 6), 并且接近镜面 M_2 . 表明, 在这个系统中的增益介质不得不接近于镜面 M_2 , 且有一个大的横截面积和相对短的长度.

4 LD 泵浦的 Nd: YAG 激光器输出 BGBs^[29]

腔型设计基于一个简洁的固体激光器, 采用 LD 端面泵浦, 平凹谐振腔的凹面输出镜被衍射腔镜取代, 用来调整低阶 Bessel Gauss 模式, 如图 7 所示.

掺 1% Nd 的 YAG 晶体棒(5 mm×3 mm)由 2 W 的 LD(JDS Uniphase 2462)泵浦. LD 输出波长为 808 nm, 平行及垂直方向衍射角分别为 12 (°)和 32 (°), 光束被平行透镜聚焦在 YAG 晶体上, 光斑约 100 μm, 晶体端面镀上对 1.064 μm 高反, 808 nm 高透膜. 在 2.54 cm 的熔硅基质上溅射 5 nm 铬涂层和 130 nm 金涂层制成的衍射腔镜, 其表面线条轮廓如图 7 所示. 经测量这种涂层对 1.064 μm 波长反射率超过 99%, 设计腔长为 8 cm, 输出零阶 BGBs, 在晶体处腰宽为 300 μm, 传播无衍射距离也是 8 cm. 传播无衍射距离用望远镜系统来调整^[30]. 把腔长从 8 cm 缩至 3 cm 不会对输出光束的轮廓有影响.

同样表明了这段距离内 BGBs 的传播无衍射特性.

用一个 3 mm 的熔硅涂层板以布儒斯特角放置,来输出一部分腔内光束.板中的一个小楔板在两个表面上提供反射的空间分离,使得 CCD 照相能够拍摄腔内外的光束图片,检测的光强距光腰距离分别为 0, 5 cm. 图 8 为其二维分布图,图 8(a), (b) 的左图为实际的光强分布,右图为理论计算的模拟图.

从图 8 可以发现,实验结果与理论模拟符合得很好.光强第 1 次达到最小值在 $100\ \mu\text{m}$ 处,与理论计算值 $108.6\ \mu\text{m}$ 一致.证实了输出光束为 BGBs. 实验结果与采用轴棱锥腔给出的实验结果(图 3)基本吻合.

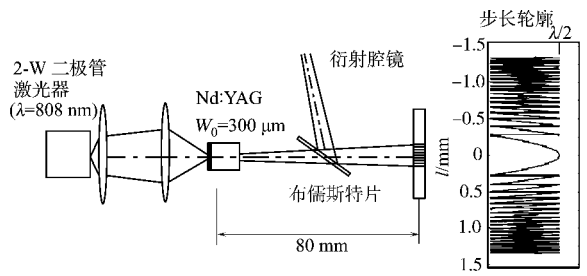


图 7 LD 泵浦的 Nd: YAG 激光器示意图

Fig. 7 Scheme of diode pumped Nd: YAG laser

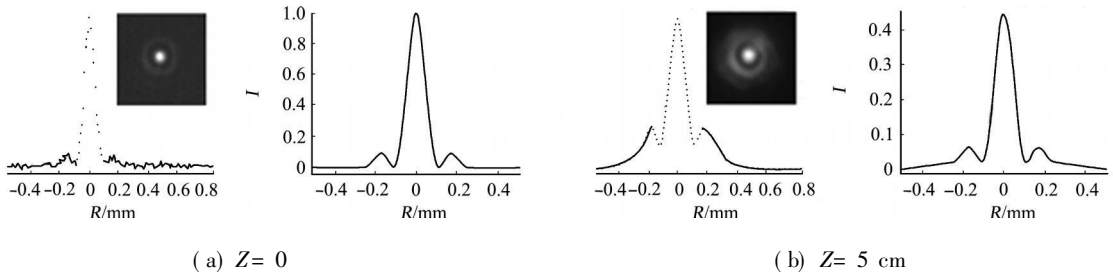


图 8 CCD 检测的光强图和理论模拟

Fig. 8 Intensity profile measured by CCD and the theoretical simulation

5 结束语

主动式产生的短脉冲、高功率近似无衍射光在很多应用方面有独特的优势,值得进行深入研究. 目前有关主动式实现近似无衍射光的实验报道还很少. 文中描述和介绍几种主动式实现近似无衍射光的最新技术,同时比较了这些方法的优缺点,可为产生高质量的无衍射 Bessel 光提供理论依据.

参考文献:

- [1] 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): 3125-3128.
- [2] 刘彬, 吴逢铁, 江新光. 利用无衍射贝塞耳光束多层操控微粒[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 379-382.
- [3] 吴逢铁, 江新光, 刘彬, 等. 梯度轴棱锥产生单个 Bottle beam[J]. 物理学报, 2009, 58(4): 2410-2414.
- [4] 刘岚, 吴逢铁. 衍射理论对局域空心光束及无衍射光束重建的描述[J]. 光学学报, 2008, 28(2): 370-374.
- [5] FLORJANCZYK M, TREMBLAY R. Guiding of atoms in a traveling wave laser trap formed by the axicon[J]. Opt Commun, 1989, 73(6): 448-450.
- [6] ARLT J, HITOMI T, DHOLAKIA K. Atom guiding along Laguerre-Gaussian and Bessel light beams[J]. Appl Phys (B), 2000, 71(4): 549-554.
- [7] ARLT J, GARCÉS-CHAVEZ V, SIBBETT W, et al. Optical micromanipulation using a Bessel light beam[J]. Opt Commun, 2001, 197(4/6): 239-245.
- [8] JUN A, KAZUTO Y, DAISUKE S, et al. Laser based microprocesses using diffraction free beams generated by diffractive axicons[J]. Proc of SPIE, 2005, 5713: 497-507.
- [9] VOLKE-SEPULVEDA K, GARCÉS-CHAVEZ V, CHÁVEZ-CERDA S, et al. Orbital angular momentum of a high order Bessel light beam[J]. Opt (B): Quantum Semiopt, 2002, 4(2): 82-89.
- [10] GARCÉS-CHÁVEZ V, MCGLOIN D, PADGETT M J, et al. Observation of the transfer of the local angular momentum density of a multiringed light beam to an optically trapped particle[J]. Phys Rev Lett, 2003, 91(9): 14.
- [11] NIGGL L, MAIER M. Efficient conical emission of stimulated Raman Stokes light generated by a Bessel pump beam[J]. Opt Lett, 1997, 22(12): 910-912.
- [12] KLEWITZ S, LEIDERER P, HERMINGHAUS S, et al. Tunable stimulated Raman scattering by pumping with

- Bessel beams[J]. Opt Lett, 1996, 21(4): 248-250.
- [13] BELYI V N, KAZAK N S, KHILO N A. Properties of parametric frequency conversion with Bessel light beams[J]. Opt Commun, 1999, 162(1/3): 169-176.
- [14] BISWAS D J, NILAYA J P, DANAILOV M B. Enhancement of photorefractive two-wave mixing gain with a Bessel pump beam[J]. Opt Commun, 2003, 226(1/6): 387-391.
- [15] DURNIN J. Exact solutions for nondiffracting beams (I): The scalar theory[J]. J Opt Soc Am (A), 1987, 4(4): 651-654.
- [16] DURNIN J, MICELI J J, EBERLY J H. Diffraction-free beams[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [17] DURNIN J, EBERLY J H. Diffraction-free arrangement: US, 4852973[P]. 1989-08-01.
- [18] MCGLOIN D, DHOLAKIA K. Bessel beams: Diffraction in a new light[J]. Contemp Phys, 2005, 46(1): 15-28.
- [19] GORI F, GUATTARI G, PADOVANI C. Bessel-Gauss beams[J]. Opt Commun, 1987, 64(6): 491-495.
- [20] ROGEL-SALAZAR J, NEWS G H C, CHAVEZ-CERDA S. Bessel-Gauss beam optical resonator[J]. Opt Commun, 2001, 190(1/6): 117-122.
- [21] MUSY P, VANDAMME E. Direct generation of Bessel beams[J]. Appl Opt, 2002, 41(30): 6375-6379.
- [22] SIEGMAN A E. Lasers[M]. Calif: University Science Books, 1986.
- [23] 郭东栋, 吴逢铁, 陈云彬, 等. 基于轴棱锥带平面耦合输出镜的贝塞尔-高斯谐振腔[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(1): 26-30.
- [24] WU Feng-tie, CHEN Yun-bin, GUO Dong-dong. Nanosecond Bessel-Gauss pulse generated directly from an Nd:YAG axicon-based resonator[J]. Appl Opt, 2007, 46(22): 4943-4947.
- [25] LI D, IMASAKI K, MIYAMOTO S, et al. Conceptual design of Bessel beam cavity for free electron laser[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 27(2): 165-171.
- [26] HERNANDEZ-ARANDA R I, CHAVEZ-CERDA S, GUTIERREZ-VEGA J C. Theory of the unstable Bessel resonator[J]. J Opt Soc Am (A), 2005, 22(9): 1909-1917.
- [27] TSANGARIS C L, NEW G H C, ROGEL-SALAZAR J. Unstable Bessel beam resonator[J]. Opt Commun, 2003, 223(4/6): 233-238.
- [28] LITVIN I A, FORBES A. Bessel-Gauss resonator with internal amplitude filter[J]. Opt Commun, 2008, 281(9): 2385-2392.
- [29] 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(4/6): 335-340.
- [30] SANTARSIERO M. Propagation of generalized Bessel-Gauss beams through ABCD optical systems[J]. Opt Commun, 1996, 132(1/2): 1-7.

New Technique for Generating Approximate Non-Diffracting Beams by Using Active Method

MA Liang, WU Feng-tie, MA Bao-tian

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

Abstract: Several active methods for generating approximate non-diffracting Bessel beams are introduced by using resonator theory to analyze and simulate. We find that axicon-based resonator has simple structure and higher conversion efficiency; resonator with internal amplitude filter does not require complex optical element and special alignment technology; and the advantage of generating approximate non-diffracting Bessel beams by using a diode-pumped Nd:YAG laser is sufficient to improve output powers and efficiencies.

Keywords: Bessel beams; active method; resonator; Bessel-Gauss beams

(责任编辑: 鲁 斌 英文审校: 吴逢铁)