

文章编号: 1000-5013(2012)02-0138-05

非相干光源产生无衍射光束的研究进展

范丹丹¹, 刘岚², 程治明¹, 吴逢铁¹

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 漯河医学高等专科学校, 河南 漯河 462002)

摘要: 介绍非相干光产生无衍射 Bessel 光束的方法及研究现状, 对比透过轴棱锥和环缝装置产生白光无衍射光, 以及小尺寸全光纤装置产生白光无衍射光束的方法. 研究表明: 采用相干光源和非相干光源都可以产生 Bessel 光束, 也都具有无衍射和自重建的特性; 非相干光源产生 Bessel 光束具有对光源要求低, 单个光源可产生多种波长的无衍射光等优点.

关键词: 非相干光源; 相干光源; 白光; Bessel 光束

中图分类号: O 435.1

文献标志码: A

自 1987 年提出了无衍射(Bessel)光束^[1-3]以来, 因其在传输中保持光强分布不变, 具有高度的局域化强度分布和自重建^[4-5]等独特的性质而备受关注. 介于该独特的传播性质 Bessel 光束在光学微操作、光学囚禁^[6]、纳米科技及生命科学^[7]等方面起着非常重要的作用, 因此如何产生满足要求的 Bessel 光束成为近年来的一个热门课题.

1 产生 Bessel 光的方式

产生 Bessel 光的方式可以粗略地分为两类, 即被动式和主动式. 被动式主要是指将其他的光束转换为 Bessel 光束, 主要是基于单独的光源和可分离的光学元件或系统, 如环缝法^[1]、轴棱锥法^[8]、计算机全息图^[9-10]、球差透镜^[11], 等等. 其中利用轴棱锥产生 Bessel 光的方法具有结构简单、转换效率高和光损伤阈值大等优点^[12].

主动式主要指通过特定结构的腔由激光器直接产生 Bessel 光, 如用透镜轴棱锥产生纳秒的近似无衍射 Bessel 光脉冲^[13], 用稳腔^[14]和非稳腔^[15]主动式直接获取纳秒无衍射 Bessel-Gauss, 并在非稳 Bessel-Gauss 谐振腔中实现腔内倍频^[16], 获得纳秒近似无衍射 Bessel-Gauss 绿光输出. 相对于被动式, 主动式中谐振腔无须通过变换高斯光便可产生高质量的 Bessel 光束, 并且能在腔内实现对 Bessel 光的频率转换.

目前, 几乎所有对无衍射光的研究均是采用相干光源(激光光源)的, 而采用非相干光源^[17]产生 Bessel 光束的研究甚少. 相对于相干光源, 非相干光源产生 Bessel 光束具有获取较为容易, 对光源的要求较低, 尤其是单个光源可产生多种波长的无衍射光等优点, 而且, 非相干光无衍射光在光学相干断层扫描上还具有自愈能力, 比相干光更有优势. 因此, 非相干光源产生无衍射光的研究具有较高的学术意义和广阔的应用前景.

在现有的研究中, 主要是报道以卤灯^[17]、宽频带(500~1 100 nm)^[18]等非相干光源来产生 Bessel 光束. 然而, 以非相干光源(卤灯)得到的 Bessel 光束也具有无衍射和自重建的特性^[4, 17, 19], 可以应用在细胞标记^[6]、X 成像和粒子囚禁^[6]上, 是 Bessel 光束应用的一个新领域.

收稿日期: 2011-11-18

通信作者: 吴逢铁(1958-), 男, 教授, 主要从事光束传输与变换, 短脉冲技术及非线性光学的研究. E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60977068, 61178015); 国家高功率激光物理重点实验室开放基金资助项目(SG001102); 福建省泉州市科技计划重点项目(2011G9)

2 单色光的无衍射特性

J. Durnin 等^[1,20-21]提出了无衍射 Bessel 光是自由空间标量波动方程的一组特殊解. 光波在无源的自由空间传播时,其电场满足波动方程

$$(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2}) \cdot E(r,t) = 0. \tag{1}$$

由标量亥姆霍兹(Helmholtz)波动方程出发求解这组特殊解. 利用分离变量法^[22-23]可得

$$R(\rho) = J_m(\alpha\rho)\exp(im\varphi)\exp[i\beta z - \omega t]. \tag{2}$$

式(2)中: J_m 为 m 阶贝塞耳方程; ρ, φ, z 分别是柱坐标的径向距离、方位角及轴向距离. 若考虑的问题为 z 轴对称,解与 φ 无关,即 $\Phi(\varphi)=\text{常数}$;则式(2)中 m 取值为 0,有

$$J_m(x) \rightarrow J_0(x) = J_0(\alpha\rho) = J_0(\sqrt{k^2 - \beta^2} \rho). \tag{3}$$

因此,最后符合波动方程的解为

$$E(\rho, \varphi, z, t) = \exp[i\beta z - \omega t] J_0(\alpha\rho). \tag{4}$$

式(4)中: $\beta=k_z, \alpha=k_r, \alpha$ 和 β 分别为径向和横向的波矢分量; $\beta^2 + \alpha^2 = k^2 = (\frac{\omega}{c})^2, k$ 为波数, c 为光速, ω 为光波的频率,可以看出传播距离 z 只出现在相位部分,而光场的横向分布与 z 无关. 如果 $\alpha=0$,它可简化成一平面波;而当 $0 < \alpha \leq k$,则是基模 Bessel 光束,其横向强度以 $(\alpha\rho)^{-1}$ 的速度衰减. 由式(4)决定的横平面上的光强,即

$$I(\rho, \varphi, z) = |J_0(\alpha\rho)|^2. \tag{5}$$

令 $\alpha=40 \text{ mm}^{-1}$ (即 0.5° 轴棱锥产生的 Bessel 光束),根据式(5)可以模拟理想零阶 Bessel 光的三维分布及相应光斑图,如图 1 所示. 图 1 中: I 为归一化光强; ρ 为径向距离.

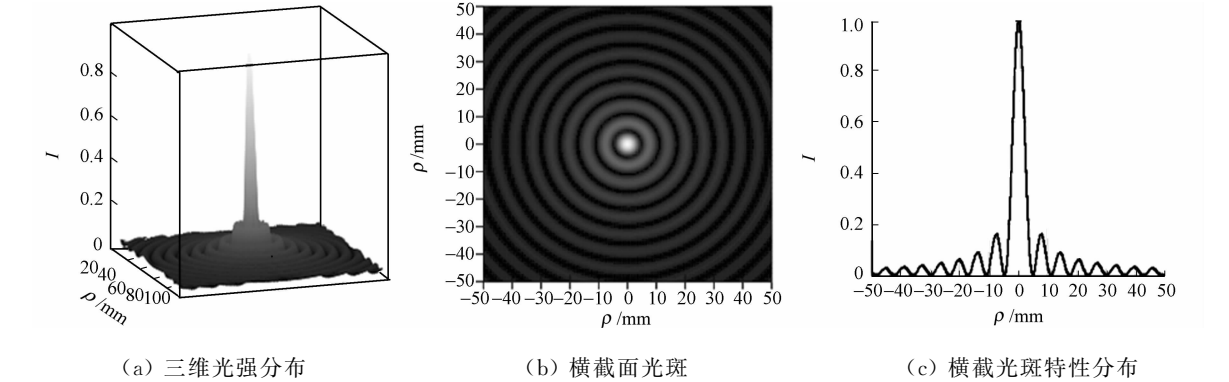


图 1 理想零阶 Bessel 光的三维光强分布及相应光斑图

Fig. 1 3-D intensity distribution of the ideal zero order Bessel beam and the corresponding spot

相应的零阶 Bessel 光束的纵向截面传输光强分布图,如图 2 所示. 从图 2 可知:光强主要集中在中心位置,并且随着光束的传输距离(z),光斑不会发生衍射,故称作零阶无衍射光束.

3 非相干光无衍射光

3.1 环缝装置产生白光无衍射光

J. Durnin 提出产生单色无衍射光的双缝装置同样可用来产生白光无衍射光^[1]. L. Basano 等^[17]采用图 3 的装置得到了白光无衍射光,也证实了这一结果. 图 3 中:L 为 150 W 的卤素灯;PH 是直径为 0.1 mm 的针孔;L1 为显微镜物镜;L2 是焦距为 250 mm 的凸透镜;环缝的直径和宽度分别为 4 和 0.016 mm,环缝距小孔为 1 320 mm. 卤素灯 L 发出的光经 L1 聚焦后,其光束

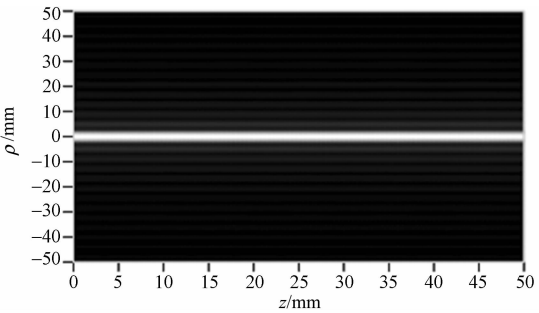


图 2 理想零阶 Bessel 光的纵向光强传播分布图

Fig. 2 Longitudinal optical intensity distribution of the ideal zero Bessel beam

通过小孔可近似看成一个点光源,具有较好的相干性,然后经过环缝和透镜的聚焦后打在电荷耦合元件(CCD)上.

在与 L2 透镜不同距离(d_1)处的 CCD 所拍得的实验光斑,如图 4 所示. 虽然所得结果并不太理想,但从中可以看出它具有无衍射光的特性^[17],说明用环缝是可以产生白光无衍射光.

3.2 白光产生重建无衍射光

由于无衍射 Bessel 光束拥有高斯光束等普通光束不曾有的重要特性——重建特性,在生物工程和医学领域有着广泛的应用前景. 吴逢铁等^[24-25]采用轴棱锥法,利用激光光源产生近似无衍射光束,进一步实现了零阶和高阶无衍射光通过障碍物实现自重建. L. Basano 等^[17]用环缝-透镜法也证实了白光近似无衍射光束通过障碍物可以实现自重建.

文献^[17]得出 CCD 位于障碍物后面不同距离(d_2)所拍得的横截面光强分布图,如图 5 所示. 实验中用的是 10 nm 带宽的热光源. 从图 5 可知:当距离为 1 cm 时,原本应该是有规律分布的同心圆已经发生严重的错乱,光强也不再集中在轴上;而当距离为 18 cm 时,再次出现了 Bessel 光束截面光强分布,自重建过程变得明显且出现了有规律的同心圆排列.

3.3 全光纤装置产生小尺寸的白光无衍射光束

Zhu 等^[26]设计了一个用全光纤就能产生无衍射光的装置,如图 6 所示. 单模光纤耦合入多模光纤的后会激发多模 $LP_{0,n}$ 的产生和传播,由于在光纤中各模的传播是独立的,都有各自的传播常数,波长为 λ 的光场在多模光纤的出射面形成叠加的近似无衍射光场,即

$$E_{\lambda,0}(r,L) = \sum_{n=1}^N C_{\lambda,n} J_0(\kappa_{\lambda,n} r) \exp(i\beta_{\lambda,n} L), \quad r \leq R.$$

(6)

式(6)中: N 为多模光纤中强激发的模数; $C_{\lambda,n}$ 为分解系数; r 为径向坐标; R 为多模光纤的纤芯半径; L 为多模光纤长度;Bessel 函数 $J_0(\kappa_{\lambda,n} r)$ 有不同的波矢, $\kappa_{\lambda,n} = (n_{\lambda}^2 k_{\lambda}^2 - \beta_{\lambda,n}^2)^{1/2}$, 代表多模光纤中 $LP_{0,n}$ 的光场, $k_{\lambda} = 2\pi/\lambda$, n_{λ} 是在多模光纤纤芯中波长为 λ 光波的折射率; $\beta_{\lambda,n}$ 是波长为 λ 的 $LP_{0,n}$ 模的传播常数.

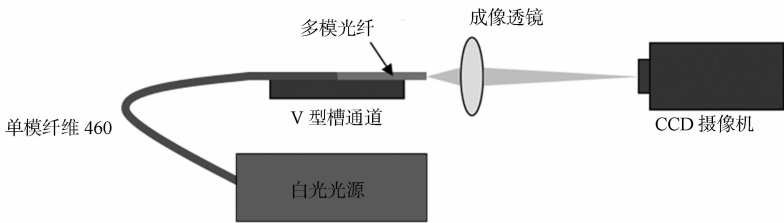


图 6 全光纤产生白光无衍射光装置

Fig. 6 White light non-diffraction beam generated by the all fiber device

波长为 λ 的光波从光纤中出射到自由空间传播时,其光场可以近似为

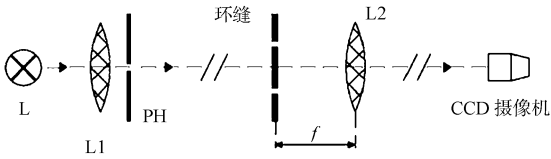
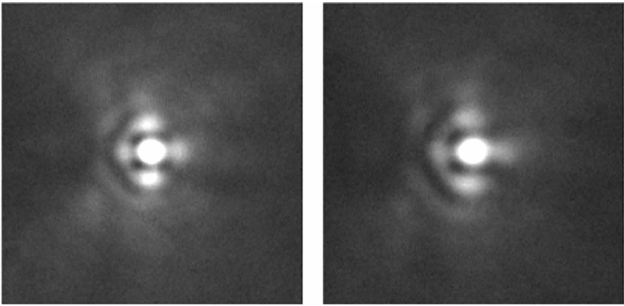


图 3 环缝产生白光无衍射光装置

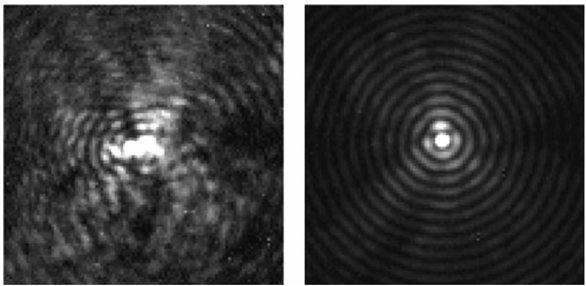
Fig. 3 White light non-diffraction beam generated by the ring seam device



(a) $d_1 = 32\text{ cm}$ (b) $d_1 = 64\text{ cm}$

图 4 与 L2 透镜不同距离的实验光斑

Fig. 4 Experimental beam spots with different distance from L2



(a) $d_2 = 1\text{ cm}$ (b) $d_2 = 18\text{ cm}$

图 5 障碍物后不同距离的横截面光强分布图

Fig. 5 Cross section intensity distributions at different positions after obstacle

$$E_{\lambda,fs}(r,z) = \sum_{n=1}^N C_{\lambda,n} J_0(\kappa_{\lambda,n} r) \exp(i(\beta_{nf} z + \beta_n L)). \tag{7}$$

式(7)中: $\beta_{nf}=(k_{\lambda}^2-\kappa_{\lambda,n}^2)^{1/2}$ 为自由空间中的传播常数. 由文献[26]可知:在轴上的特定区域能够观察到无衍射光束. 当使用宽频带光源时,光束的光强分布可以写成

$$I_{fs}(r,z) = \int_{\lambda} |E_{\lambda,fs}(r,z)|^2 d\lambda = \int_{\lambda} \left| \sum_{n=1}^N C_{\lambda,n} J_0(\kappa_{\lambda,n} r) \exp(i(\beta_{nf} z + \beta_n L)) \right|^2 d\lambda. \tag{8}$$

由此可以得到白光的无衍射光.

实验采用卤素灯作信号光源,出射光耦合进单模光纤(纤芯直径为 3 μm ,数值孔径 NA 为 0.13);然后,进入与单模光纤接合的多模光纤(长度为 2 cm,纤芯直径为 50 μm ,数值孔径 NA 为 0.22),成像透镜(焦距为 8 mm,数值孔径 NA 为 0.5)把多模光纤的出射光汇聚进 CCD,结果如图 7 所示^[26].

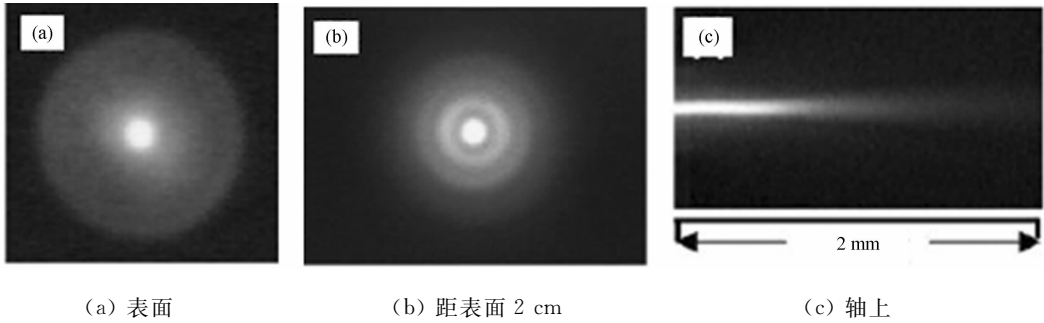


图 7 多模光纤的光强分布图

Fig. 7 Optical intensity distribution in multimode fiber

此外,人们还研究了白光透过轴棱锥产生白光无衍射光,如 P Fischer 等^[27]用红、绿、蓝 Bessel 光进行干涉,形成白光 Bessel 光,并对白光进行比较,用卤灯同样也产生了无衍射光.

4 结论

产生无衍射 Bessel 光的传统光源主要采用的是相干的激光光源^[28]. 文中主要探讨以非相干光产生 Bessel 光束的方法,介绍了白光透过轴棱锥产生白光无衍射光、环缝装置产生白光无衍射光、全光纤装置产生小尺寸的白光无衍射光束. 可以发现:用相干光源和非相关光源产生 Bessel 光束都具有无衍射和自重建等特性,而用非相干光源如卤物灯产生 Bessel 光,具有对光源要求低、获取比较容易等优点. 通过初步数值模拟和理论分析,可以认为用发光二极管(LED)光源产生 Bessel 光是可行的. 集众多优点于一身的 LED 是一种绿色环保节能的新型光源,在众多非相干光源中,更值得进一步深入研究.

参考文献:

[1] DURNIN J, MICELI J J, EBERLY J H. Diffraction-free beams[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(15): 1499-1501.
[2] BELYI V, FORBES A, KAZAK N, et al. Bessel-like beams with z -dependent cone angles[J]. Opt Express, 2010, 18(3): 1966-1973.
[3] MATIJOSIUS A, JARUTIS V, PISKARSKAS A. Generation and control of the spiraling zero-order Bessel beam[J]. Opt Express, 2010, 18(9): 8767-8771.
[4] BOUCHAL Z, WAGNER J, CHIUP M. Self-reconstruction of a distorted nondiffracting beam[J]. Opt Commun, 1998, 151(4/5/6): 207-211.
[5] 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): 3125-3129.
[6] GARCÉS-CHÁVEZ V, Mc GLOIN D, MELVILLE H, et al. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam[J]. Nature, 2002, 419(6903): 145-147.
[7] LÓPEZ-MARISCAL C, GUTIÉRREZ-VEGA J C, MC GLOIN D, et al. Laserless optical trapping[M]. San Jose: Advances in Optical Trapping, 2007.
[8] SOTT G, Mc ARDE N. Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon[J]. Opt Eng, 1992, 31

(12):2640-2643.

- [9] TURUENEN J,VASARA A,FRIBERG A T. Holographic generation of diffraction-free beams[J]. Appl Opt,1988,27(19):3959-3962.
- [10] VASARA A,TUTUNEN J,FRIBERG A T. Realization of gernal nondiffracting beams with computer-generated holograms[J]. J Opt Soc Am A,1989,6(11):1748-1754.
- [11] 卢文和,吴逢铁,郑维涛. 透镜轴棱锥产生近似无衍射贝塞尔光束[J]. 光学学报,2010,30(6):1618-1621.
- [12] 马亮,吴逢铁,黄启禄. 一种产生无衍射 Bessel 光的新型组合锥透镜[J]. 光学学报,2010,30(8):2417-2420.
- [13] 张前安,吴逢铁,马亮,等. 透镜轴棱锥产生 ns 近似无衍射 Bessel 光脉冲[J]. 光电子·激光,2011,22(6):901-904.
- [14] WU Feng-tie,CHEN Yin-bin,GUO Dong-dong. Nanosecond pulsed Bessel-Gauss beam generated directly from a Nd:YAG axicon-based resonator[J]. Appl Opt,2007,46(22):4943-4947.
- [15] MA Bao-tian,WU Feng-tie,LU Wen-he,et al. Nanosecond zero-order Bessel-Gauss pulse generated from unstable resonator based on an axicon[J]. Opt & Laser Tech,2010,42:941-944.
- [16] 马宝田,吴逢铁,马亮. 非稳腔主动式直接获取纳秒近似无衍射贝塞尔绿光[J]. 物理学报,2010,59(9):6213-6218.
- [17] BASANO A L,OTTONELLO P. Demonstration experiments on nondiffracting beams generated by thermal light [J]. American Association of Physics Teachers,2005,73(9):826-830.
- [18] FISCHER P,BROWN C T A,MORRIS J E,et al. Dholakia white light propagation invariant beams[J]. Opt Express,2005,13(17):6657-6666.
- [19] MACDONALD R P,BOOTHROYD S A,OKAMOTO T,et al. Interboard optical data distribution by Bessel beam shadowing[J]. Opt Commun,1996,122(5):169-177.
- [20] DURNIN J,MICELI J J. Reply: Comment on diffraction-free beams[J]. Phys Rev Lett,1987,59:2612-2612.
- [21] DURNIN J,MICELI J J. Reply: Comment on diffracting beams[J]. Phys Rev Lett,1991,66:838.
- [22] 吕百达. 激光光学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版,2003.
- [23] 波恩 M,沃耳夫 E. 光学原理[M]. 杨葭荪,等译. 北京:电子工业出版社,2006.
- [24] 刘彬,吴逢铁,江新光. 利用无衍射 Bessel 光束多层面操控微粒[J]. 中国激光,2009,36(2):379-382.
- [25] 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:物理学 力学 天文学,2011,41(10):1131-1137.
- [26] ZHU X, SCHÜLZGEN A, WEI H K, et al. Peyghambarian white light Bessel-like beams generated by miniature all-fiber device[J]. Opt Express 2011,19(12):11365-11374.
- [27] FISCHER P,LITTLE H,SMITH R L,et al. Wavelength dependent propagation and reconstruction of white light Bessel beams[J]. J Opt A:Pure Appl Opt,2006,8(5):477-482.
- [28] 刘岚,吴逢铁,曾夏辉. 无衍射光束的轴上光强和最大准直距离[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2007,28(4):350-352.

Research Progress on Incoherent Light Source Generating Non-Diffracting Bessel Beams

FAN Dan-dan¹, LIU Lan², CHENG Zhi-ming¹, WU Feng-tie¹

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Luohe Medical College, Luohe 462002, China)

Abstract: This paper introduces the methods and the research status of the incoherent light source generating non-diffracting beams, compares the methods of generating white Bessel beam by axicon, ring seam and miniature all-fiber device. The research result shows that both the coherent light and incoherent light source can generate Bessel beams and also possess the properties of the non-diffracting and reconstruction. Furthermore, incoherent light source generated Bessel beams with lower requirements to the source and a single source can produce non-diffracting beam with various wavelength.

Keywords: incoherent light source; coherent light source; white light; Bessel beam

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)