

# 光子晶体光纤直接产生超连续贝塞尔光束

周钊贤 胡明列 周雨竹 栗岩锋 王清月

天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

**摘要** 设计了一种用非线性光子晶体光纤直接输出超连续贝塞尔光束的方案。先用光纤熔接机在高非线性光子晶体光纤的输出端塌陷1 mm左右,然后将飞秒激光直接耦合到该非线性光子晶体光纤中,所产生的超连续光谱通过塌陷区域的模式耦合和相干叠加,直接输出了宽谱贝塞尔光束。该方案可以实现全光纤运转,不需要引入其他分立器件。从光纤中直接输出的超连续贝塞尔光束在米量级具有高度准直和无衍射特性。进一步实验验证了该光束在整个超连续光谱范围内具有贝塞尔光束的无衍射性和自恢复性。

**关键词** 相干光学; 超连续谱; 贝塞尔光束; 光子晶体光纤; 塌陷

中图分类号 TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0302001

## Broadband Spectrum Bessel Beams Directly Output from a Photonic Crystal Fiber

Zhou Zhaoxian Hu Minglie Zhou Yuzhu Li Yanfeng Wang Qingyue

*Ultrafast Laser Laboratory, Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technical Science, College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

**Abstract** A scheme of broadband spectrum Bessel beams directly output from a nonlinear photonic crystal fiber is designed. A femtosecond laser beam from a nonlinear polarization evolution laser system is directly coupled into a nonlinear photonic crystal fiber that is collapsed 1 mm by a fiber fusion splicer to enable the direct generation of broadband spectrum Bessel beams due to the modes coupling and coherent superposition at the collapsed district. The system operation can be achieved by all fiber without any other discrete devices. The broadband spectrum Bessel beams directly output from photonic crystal fiber have diffraction-free propagation in meter-scaled free space and are proved to have the characteristics of diffraction-free and selfheal in all spectrum.

**Key words** coherence optics; supercontinuum; Bessel beams; photonic crystal fiber; collapse

**OCIS codes** 030.1640; 190.4370; 060.5295

## 1 引 言

超连续光谱是指激光脉冲在非线形介质中传输时光谱急剧加宽的一种物理现象。由于超连续光谱在光学相干断层扫描<sup>[1-3]</sup>、光学频率梳<sup>[4]</sup>、光学成像<sup>[5]</sup>、光通讯<sup>[6]</sup>、传感<sup>[7]</sup>、光镊<sup>[8]</sup>等领域有着广泛的应用,近年来超连续谱已经成为了一个活跃的领域,得到了快速的发展。然而,一些特殊应用要求用到一些特殊模式的超连续光谱,尤其是由于色散和像差等效应,超连续光谱的模式控制是相对比较困难的。而一些特殊模式又有非常重要的应用价值,例如中空模式和贝塞尔模式的超连续光束。

1987年,美国Rochester大学的Durnin等<sup>[9-10]</sup>通过求解自由空间的亥姆霍兹方程,得到一种无衍射的特解

收稿日期: 2014-08-22; 收到修改稿日期: 2014-10-08

基金项目: 国家973计划(2011CB808101,2010CB327604)、国家自然科学基金(61322502,61205131,11274239,61377047,11104201)

作者简介: 周钊贤(1989—),男,硕士研究生,主要从事飞秒激光方面的研究。E-mail: zzxian@tju.edu.cn

导师简介: 胡明列(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事超短脉冲激光技术及应用等方面的研究。

E-mail: huminglie@tju.edu.cn(通信联系人)

即贝塞尔光束,并用环缝-透镜法首次在实验上得到该光束。贝塞尔光束一个十分引人瞩目的特点是近似无衍射特性<sup>[9]</sup>,即贝塞尔光束沿纵向传输的无发散距离远大于瑞利距离,中心光场强度减小缓慢;另一个是具有自恢复特性<sup>[11]</sup>,即光束在被遮挡后,经过一定距离会回到其初始的场分布。基于以上两个优越的特性,贝塞尔光束获得广泛的关注和深入的研究。环缝-透镜法<sup>[9]</sup>的效率过低,其他的如基于轴棱锥<sup>[12]</sup>、透镜轴棱锥<sup>[13]</sup>、全息板<sup>[14]</sup>、谐振腔<sup>[15]</sup>等方法虽然效率提高了,但是空间光路不仅占空间而且需要准直调节。近年来,许多研究小组基于不同的光纤结构器件提出了全光纤方法产生贝塞尔光束的方案,例如基于光纤光栅<sup>[16]</sup>、多模光纤激发 LP<sub>0,n</sub> 模式<sup>[17-18]</sup>和在光纤端面加工负角锥<sup>[19]</sup>等方法。由于光子晶体光纤<sup>[20-22]</sup>的可控色散特性、无截止波长单模特性和增强的非线性特性很容易地将振荡器输出的飞秒激光脉冲展宽成超过两个倍频程的超连续光谱。因此利用光子晶体光纤来产生特殊光束的超连续光谱是非常具有应用价值的研究课题。

本文针对光子晶体光纤的这些特性,用高非线性光子晶体光纤直接输出宽谱贝塞尔光束,该光束集合了超连续谱和贝塞尔光束的特点,在光镊、通信、传感等方面具有广阔的应用前景,比如具有近似无衍射特性可以用做在自由空间中远距离的传感,而且宽谱使得其具有检测空间中所含物质的功能;自恢复性在光镊方面可以用来同时操控纵向方向上的多个粒子。该方案避免了轴棱锥等空间光路的准直过程,降低了对机械和环境稳定性的要求,能够进一步推广全光纤方法产生贝塞尔光束以及贝塞尔光束的应用。

## 2 基于光纤产生宽谱贝塞尔光束的模型

折射率引导型高非线性光子晶体光纤是由纯石英纤芯和具有周期性空气孔结构的包层组成。由于空气孔的加入,包层和纤芯相比具有较小的有效折射率,即石英-空气包层的有效折射率小于纤芯的折射率,并且随着包层空气比的增加,包层有效折射率减小,导致包层和纤芯的折射率差增大<sup>[23]</sup>,从而可以有效调节光纤色散和非线性特性,使其有利于宽带超连续光谱的产生。实验产生宽谱贝塞尔光束的非线性光子晶体光纤端面如图 1(a)所示,是典型的高非线性光子晶体光纤,模场面积约为 3 μm×3 μm,包层空气占空比约为 30%。

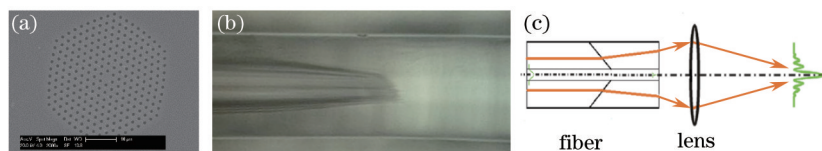


图 1 贝塞尔光束产生实验中的光纤结构和原理图。(a) 实验用的光子晶体光纤的端面;(b) 光纤塌陷区的光学显微镜图;(c) 塌陷区产生贝塞尔光束的模型原理图

Fig.1 Fiber structure and principle diagram in experiments of Bessel beams generation. (a) Photonic crystal fiber end face in experiment; (b) collapsed fiber under optical microscope; (c) principle diagram of Bessel beams production with a collapsed fiber

实验首先将其输出端用光纤熔接机(FSM-100M/P, Fujikura)进行放电塌陷。塌陷之后的光子晶体光纤结构如图 1(b)所示,其包层中的石英-空气孔的结构被破坏从而形成全固态结构,改变了光子晶体光纤原有的传输特性,光在塌陷区域传输可以分成两部分:纤芯内的光和包层内的光。由于光纤塌陷后,破坏了石英-空气孔结构,使得其折射率变大,等效于包层在塌陷处形成一个负角锥,其传输模型如图 1(c)所示,因此光纤在刚塌陷处的传输函数为

$$\begin{cases} T(r) = \exp[-ik(n_{cl-eff} - n_{co})r\gamma], r_{co} \leq r \leq r_{cl} \\ T(r) = 1, r \leq r_{co} \\ T(r) = 1, r \geq r_{cl} \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $n_{co}$  为纤芯的折射率,  $n_{cl-eff}$  为包层的有效折射率,  $\gamma$  为等效角锥的角度,  $k$  为不同波长的光对应的传输常数,  $r_{co}$  和  $r_{cl}$  分别为光纤纤芯和包层半径。包层内的光在传输一定距离后会演变成一个环状,再经过透镜后会形成贝塞尔光束;纤芯内的光 LP<sub>01</sub> 会在塌陷区域内激发出 LP<sub>0,m</sub> 高阶模,根据多模相干理论,这些多模经过塌陷区域传输后会在光纤端面形成类贝塞尔光强分布<sup>[17]</sup>

$$E_{out}(r, \varphi, l) = \sum_{m=1}^M C_m E_m(r, \varphi) \exp(-\beta_m l), \quad (2)$$

式中  $E_m(r, \varphi)$  为 LP<sub>0,m</sub> 的电场分布,  $C_m$  为其振幅的传输常数,  $\beta_m$  为传输常数,  $l$  为塌陷区域的长度。改变光纤

端面与透镜之间的距离,会改变纤芯和包层内光形成的贝塞尔光束的分布,在某个特定距离时,会使两个贝塞尔光束进行最好的叠加,此时可以形成无衍射的类贝塞尔光束。

### 3 实验结果

实验用的光源为自行搭建的非线性偏振旋转(NPE)耗散孤子锁模激光器,振荡级直接出来的超短脉冲激光是具有正啁啾的皮秒脉冲,经透射式光栅压缩后脉宽为 80 fs,中心波长为 1040 nm,重复频率为 49.3 MHz。高非线性光纤端面如图 1(a)所示。光纤输出端经光纤熔接机放电塌陷,塌陷长度约为 1 mm;输出端放置一个数值孔径(NA)为 0.5,焦距为 8 mm 的透镜进行准直。

图 2 为光纤输出的超连续贝塞尔光束的光谱图和光强分布情况。当入射光功率为 295 mW 时,输出的超连续光功率为 145 mW,光谱如图 2(a)所示;在不加准直透镜时,光纤直接输出的光斑分布比较均匀,但仍能明显看到环状,且在大的环上还有一些结构比较细的小环,如图 2(b)所示;加了准直透镜后,移动透镜与光纤端面的距离,会使得两套环分别进行演变,最后相干叠加在一起,使得亮的部分更亮,暗的部分更暗。在可见光波段的光束分布如图 2(c)所示,图 2(d)为用相干公司生产的 CCD 采集的光强光斑分布,其与可见光的分布是一样的,说明塌陷非线性光纤可以在宽谱范围直接产生贝塞尔光束。

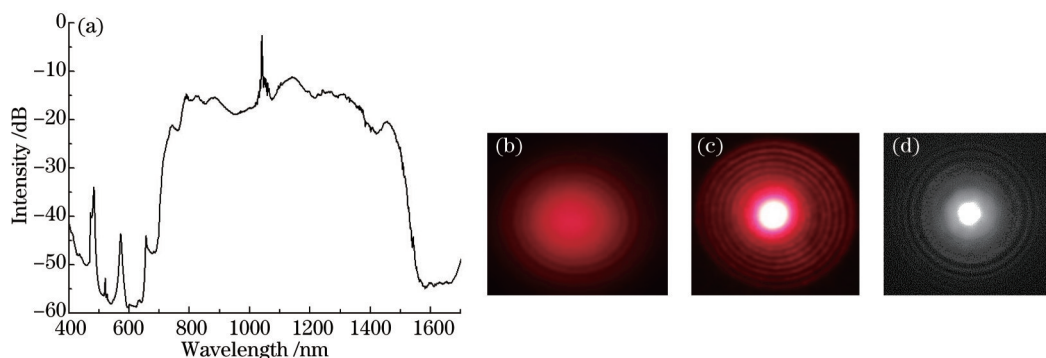


图 2 超连续贝塞尔光束的输出特性。(a) 输出贝塞尔光束的光谱图;(b) 不加准直透镜时,输出的可见光斑;(c) 加透镜后调整到适合的位置时,输出可见光光斑;(d) 对应的 CCD 测量的光斑

Fig.2 Characteristic of supercontinuum Bessel beams. (a) Output spectrum of the Bessel beams; (b) visible spot output without collimating lens; (c) visible spot output with collimating lens at proper position; (d) corresponding spot measured by CCD

#### 3.1 无衍射性研究

实验中,使用数值孔径为 0.5,焦距为 8 mm 的普通非球面镜进行准直。调整准直透镜到合适的位置,用相干公司的 CCD 测量光斑中心强度随传输距离的变化,测得的实验结果如图 3 所示。图 3(a)实线为不加滤波片时,CCD 测量的中心光强随纵向距离的变化,所有光谱的总光强在一定的范围内缓慢上升然后缓慢下降。图 3(b)中实线为其光斑尺寸随传输距离的变化;实验条件都不改变的情况下,在透镜后面分别加一个中心波长为 800 nm 和 1050 nm,带宽均为 10 nm 的滤波片进行滤波,然后测量中心光强和光斑尺寸随纵向距离的变化。可以得到不同波段的光束空间演变过程,图 3(a)中密点线和疏点线为中心光强随传输距离的变化,

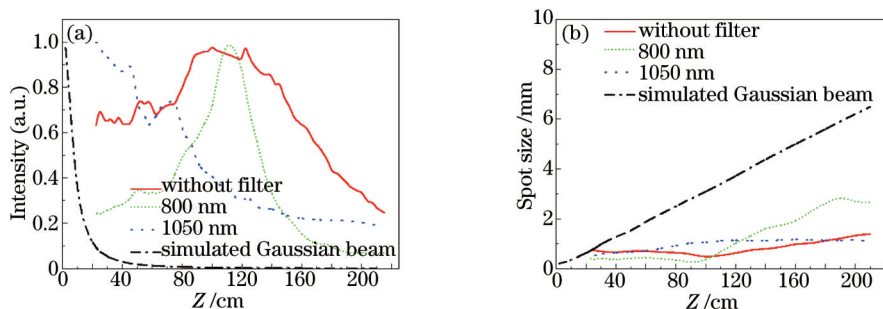


图 3 超连续贝塞尔光束的无衍射特性。(a)中心光强和(b)光斑尺寸随传输距离的变化

Fig.3 Characteristic of diffraction-free of supercontinuum Bessel beams. (a) Center intensity and (b) spot size change with transmission distance



图3(b)中密点线和疏点线为光斑尺寸随传输距离的变化,由于使用的透镜为普通的非球面镜,色差的存在使得不同波长的中心光强的变化不一致,所以就会出现图中800 nm的光强震荡缓慢上升而1050 nm的光强震荡缓慢下降;图3(a)、(b)点划线分别为模拟高斯光束的中心光强和光斑尺寸随传输距离的变化,可以看出这种方法产生的贝塞尔光束的无衍射距离远大于高斯光束的无衍射距离。

### 3.2 自恢复特性研究

在光传输过程中用直径约为2 mm的障碍物遮挡光斑的中心,观察光斑随传输距离的变化,实验结果如图4所示。图4(a)为所有光谱自恢复性的研究,当用障碍物挡住中心光斑后,光束在传输一定范围后会恢复为原有的贝塞尔光束。从图中可以看出在389 mm处已经有部分光恢复为贝塞尔光束,其边缘有一部分比较乱是因为光谱比较宽、障碍物边缘衍射造成的。当光束传输到1054 mm以后,就完全恢复为贝塞尔光斑。在其他条件都不改变的条件下,分别用中心波长为800 nm和1050 nm,带宽均为10 nm的滤波片进行滤波,光斑在障碍物后随传输距离的变化分别如图4(b)和(c)所示。从图中可以看出在400 mm左右都已经有一部分光恢复为贝塞尔光束,当光传输1000 mm以后都已经恢复到贝塞尔光斑。

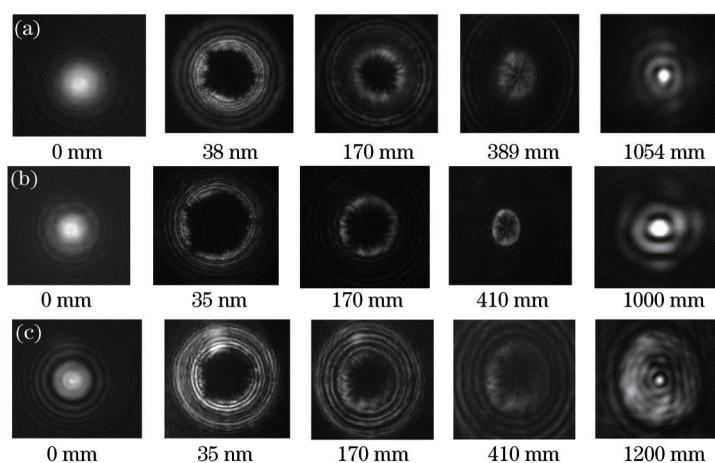


图4 超连续贝塞尔光束的自恢复特性。(a)不加滤波片时,光束随传输距离的变化;(b)加中心波长为800 nm、带宽为10 nm的滤波片后,光束随传输距离的变化;(c)加中心波长为1050 nm、带宽为10 nm的滤波片后,光束随传输距离的变化

Fig.4 Characteristic of self-reconstructing of supercontinuum Bessel beams. (a) Changes of beams along the transmission distance without a filter; (b) changes of beams along the transmission distance after a filter at center wavelength of 800 nm and bandwidth of 10 nm; (c) changes of beams along the transmission distance after a filter at center wavelength of 1050 nm and bandwidth of 10 nm

从上述的实验中可以看出,塌陷后的光子晶体光纤直接输出的光无论在全光谱或800 nm、1050 nm都具有同心环光强分布,从无衍射性和自恢复性说明它们都是贝塞尔光束,所以输出光束在全光谱范围内都是贝塞尔光束。

## 4 结 论

研究了NPE锁模激光器输出的飞秒激光耦合到一端被塌陷一定距离的高非线性光纤,可以直接输出宽谱贝塞尔光束,并分别验证了该光束在宽光谱和单频光都具有无衍射性和自恢复性。这种方案避免了轴棱锥等空间光路的准直过程,而且是全光纤的,可以降低对机械和环境稳定性的要求,使宽谱贝塞尔光束在光学相干断层扫描、光通讯、传感等领域具有潜在的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 P L Hsiung, Y Chen, T Ko, *et al.*. Optical coherence tomography using a continuous-wave, high-power, Raman continuum light source[J]. *Opt Express*, 2004, 12(22): 5287-5295.
- 2 I Hartl, X D Li, C Chudoba, *et al.*. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber[J]. *Opt Lett*, 2001, 26(9): 608-610.
- 3 Guo Yiping, Wang Zhaoying, Jia Dongfang, *et al.*. Research on supercontinuum fiber source for optical coherence tomography system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(12): 124-128.

- 郭以平, 王肇颖, 贾东方, 等. 用于光学相干层析的超连续光纤光源研究[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(12): 124-128.
- 4 D J Jones, S A Diddams, J K Ranka, *et al.*. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis[J]. *Science*, 2000, 288(5466): 635-639.
- 5 C Dunsby, P M P Lanigan, J McGinty, *et al.*. An electronically tunable ultrafast laser source applied to fluorescence imaging and fluorescence lifetime imaging microscopy[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, 37(23): 3296-3303.
- 6 H Takara, T Ohara, T Yamamoto, *et al.*. Field demonstration of over 1000-channel DWDM transmission with supercontinuum multi-carrier source[J]. *Electronics Letters*, 2005, 41(5): 270-271.
- 7 M Ere-Tassou, C Przygodzki, E Fertein, *et al.*. Femtosecond laser source for real-time atmospheric gas sensing in the UV-visible [J]. *Opt Commun*, 2003, 220(4-6): 215-221.
- 8 P Li, K Shi, Z Liu. Manipulation and spectroscopy of a single particle by use of white-light optical tweezers[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(2): 156-158.
- 9 J Durnin, J J Miceli Jr, J H Eberly. Diffraction-free beams[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- 10 J Durnin. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory[J]. *J Opt Soc Am A*, 1987, 4(4): 651-654.
- 11 Z Bouchal, J Wagner, M Chlup. Self-reconstruction of a distorted nondiffracting beam[J]. *Opt Commun*, 1998, 151(4-6): 207-211.
- 12 R M Herman, T A Wiggins. Production and uses of diffractionless beams[J]. *J Opt Soc Am A*, 1991, 8(6): 932-942.
- 13 Lu Wenhe, Wu Fengtie, Zheng Weitao. Generation of non-diffraction Bessel-like beam using a lens axicon[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1618-1621.
- 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.
- 14 A Vasara, J Turunen, A T Friberg. Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms[J]. *J Opt Soc Am A*, 1989, 6(11): 1748-1754.
- 15 A J Cox, D C Dibble. Nondiffracting beam from a spatially filtered Fabry-Perot resonator[J]. *J Opt Soc Am A*, 1992, 9(2): 282-286.
- 16 P Steinvurzel, K Tantiwanichapan, M Goto, *et al.*. Fiber-based Bessel beams with controllable diffraction-resistant distance[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(23): 4671-4673.
- 17 X Zhu, A Schülzgen, L Li, *et al.*. Generation of controllable nondiffracting beams using multimode optical fibers[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94(20): 201102.
- 18 S R Lee, J Kim, S Lee, *et al.*. All-silica fiber Bessel-like beam generator and its applications in longitudinal optical trapping and transport of multiple dielectric particles[J]. *Opt Express*, 2010, 18(24): 25299-25305.
- 19 C Xie, M Hu, Z Xu, *et al.*. High power femtosecond Bessel-X pulses directly from a compact fiber laser system[J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(15): 151111.
- 20 Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng, *et al.*. Enhanced spectral broadening by femtosecond pulses in large-air-filling fraction microstructure fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(12): 1429-1432.
- 胡明列, 王清月, 栗岩峰, 等. 飞秒激光在大空气比微结构光纤中增强的非线性光谱展宽[J]. *中国激光*, 2004, 31(12): 1429-1432.
- 21 Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.*. Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0101001.
- 柴路, 胡明列, 方晓惠, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0101001.
- 22 Zhang Juhui, Hu Minglie, Liu Bowen, *et al.*. Amplification of dissipative soliton and supercontinuum generation[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0405003.
- 张巨慧, 胡明列, 刘博文, 等. 耗散孤子脉冲的放大和超连续光谱的产生[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0405003.
- 23 Hu Minglie. Study on Propagation of Femtosecond Laser Pulses in Photonic Crystal Fibers[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. 23.
- 胡明列. 飞秒激光脉冲在光子晶体光纤中传输特性的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004. 23.

栏目编辑: 王晓琰