

光纤激光器直接输出的高功率贝塞尔超短脉冲*

谢辰¹⁾ 胡明列^{1)†} 徐宗伟²⁾ 兀伟²⁾ 高海峰²⁾ 张大鹏¹⁾
秦鹏¹⁾ 王艺森¹⁾ 王清月¹⁾

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

2) (天津大学, 精密测量技术与仪器国家重点实验室, 天津市微纳制造技术工程中心, 天津 300072)

(2012年8月29日收到; 2012年10月1日收到修改稿)

构建了一种能够直接输出高功率贝塞尔超短脉冲的光纤激光放大器. 该方案基于在光纤端面特殊设计和制备的微型负轴锥镜, 针对常规超短脉冲光纤激光放大系统所设计, 不需要引入其他分立整形器件, 避免了目前基于轴锥透镜产生贝塞尔光束的通用方法所带来的额外烦琐准直工作, 极大简化了产生贝塞尔光束的方法. 其中的微型负轴锥镜由聚焦粒子束刻蚀法在一段掺镱大模场光子晶体光纤的端面制备, 它和光纤激光系统中的固有准直透镜构成了集成化的光束整形器件. 基于数值模拟结果成功搭建的系统与理论设计一致, 直接输出了在米量级具有高度准直无衍射特性的啾啾皮秒贝塞尔超短脉冲波包, 平均功率高达 10.1 W, 对应脉冲能量 178 nJ, 经过光栅对压缩后脉冲宽度可达 140 fs.

关键词: 衍射, 超短脉冲产生, 光纤器件, 光纤激光器

PACS: 42.25.Fx, 42.65.Re, 07.60.Vg, 42.55.Wd

DOI: 10.7498/aps.62.064203

1 引言

1987年, 贝塞尔光束 (Bessel beam) 由美国 Rochester 大学的研究者基于环缝 - 透镜方法首次从实验上实现, 该光束传输时的无衍射特性是超越衍射极限高斯光束的一个十分瞩目的特点^[1]. 1998年, 捷克的学者发现了贝塞尔光束的另一个重要特性: 当其受到扰动甚至部分光场被遮挡后, 经过一段距离的传输后能够自行恢复其初始的场分布^[2]. 由于以上两种特性, 贝塞尔光束获得了广泛的关注和深入的研究, 其上述两种奇异特性更是已被成功应用于长程光学俘获与束缚^[3]、高景深显微成像^[4]和高长径比纳米通道加工^[5]等诸多领域内. 由于环缝 - 透镜方法的效率过低, 轴锥镜已经成为目前产生贝塞尔光束的一种通用方法^[6]. 国内学者也从理论和实验上对基于该结构产生的贝塞尔电磁场进行了研究^[7-9]. 但这种体器件使

用起来不仅需要占据额外的空间, 还需要额外费时费力的准直调节, 否则会出现诸如棋盘格等的其他光场分布^[10]. 近年许多不同研究小组相应提出了一些基于不同光纤结构器件、无须准直调节而直接产生贝塞尔光束的简单易行方案, 其中基于光纤光栅^[11]或多模光纤^[12]激发 $LP_{0,n}$ 模式的方法主要适用于窄带单频连续激光; 不同光纤端面熔接聚合物透镜^[13]或者聚合物微结构^[14]的方法无法承受高能量高功率的宽光谱窄脉冲; 而多种基于光纤端面的微型正轴锥镜的方法多是基于小尺度的应用而设计^[14-17]; 目前尚无针对产生高功率高能量超短贝塞尔脉冲的激光系统所设计的集成化整形系统. 本文针对这一空白, 基于常规大模场面积光子晶体光纤放大系统设计了一种紧凑的贝塞尔光束整形器, 使得常规光纤激光系统能够在不引入额外分立整形器件的条件下直接输出高功率的超短贝塞尔脉冲波包, 避免了轴锥镜等分立整形器件的烦琐准直过程, 降低了对机械稳定性的要求, 能够

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CB808101, 2010CB327604)、国家自然科学基金 (批准号: 61078028, 60838004)、全国优秀博士学位论文作者专项资金 (批准号: 2007B34) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20110032110056) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: huminglie@tju.edu.cn

进一步推进光纤化产生贝塞尔光束的应用.

2 基于光纤产生贝塞尔光束的模型

该集成化贝塞尔光束整形器的模型原理如图 1 所示: 它基于一个常规光纤激光放大系统的输出准直系统, 且该系统内的光纤输出的发散基模高斯光场必然经过一个焦距为 f 的准直透镜 (或准直器) 进行准直, 而光纤端面应置于透镜的焦点附近. 此外, 位于光纤端面基于熔石英材料的微型负轴锥镜 (IMAX) 是该整形器能够承受高功率超短脉冲的关键所在. 在单模光纤中传输的基模场到达光纤端面时, 透过 IMAX 并经其调制, 再通过一段长为 $z_1 = f + \Delta$ 的自由光路传输至准直透镜后 (离焦量 Δ), 即可经由透镜在其后空间获得贝塞尔光束.

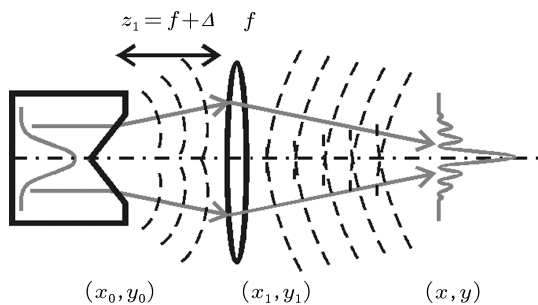


图 1 模型原理图

对于透镜后方的电场, 可以利用菲涅尔衍射积分^[18]经过以下步骤计算获得. 假设单模光纤内基模电场的模场半径为 w_0 , 则位于光纤端面的 (x_0, y_0) 平面上对应的横向电场分布为 $E_0(x_0, y_0) = \exp[-(x_0^2 + y_0^2)/w_0^2]$; 而底边半径为 r_{AX} , 高为 h_{AX} 的 IMAX 的复振幅传递函数为

$$T(x_0, y_0) = \begin{cases} 1, & \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \equiv r \geq r_{AX} \\ \exp \left[i\gamma k \left(\sqrt{x_0^2 + y_0^2} - r_{AX} \right) \right], & r < r_{AX}, \quad \gamma > 0 \end{cases} \quad (1)$$

这里 γ 是一个和 IMAX 的结构参数、光纤材料以及周围环境等有关的参数. 进而位于透镜前表面 (x_1, y_1) 上的光场 $E_1(x_1, y_1, z_1)$ 为

$$\begin{aligned} E_1(x_1, y_1, z_1) &= \frac{\exp(ikz_1)}{i\lambda z_1} \iint_{(x_0, y_0)} T(x_0, y_0) E_0(x_0, y_0) \\ &\times \exp \left\{ i \frac{k}{2z_1} \left[(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \right] \right\} \\ &\times dx_0 dy_0, \end{aligned} \quad (2)$$

而再利用薄透镜的传递函数

$$T_L(x_1, y_1) = \exp \left[-i \frac{k}{2f} (x_1^2 + y_1^2) \right], \quad (3)$$

可得透镜后方距其纵向距离为 z 处的 (x, y) 平面上的光场分布

$$\begin{aligned} E_z(x, y, z) &= \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \iint_{(x_1, y_1)} T_L(x_1, y_1) E_1(x_1, y_1) \\ &\times \exp \left\{ i \frac{k}{2z} \left[(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \right] \right\} dx_1 dy_1. \end{aligned} \quad (4)$$

3 实验系统及测量结果

实验上, 选取了一段长 1.5 m 的商用掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤 (LMA-PCF) 作为代加工的光纤^[19]. 该光纤为双包层结构, 其纤芯数值孔径为 $0.03 \mu\text{m}$, 支持模场直径约为 $30 \mu\text{m}$ 的单模运转, 对 976 nm 波段抽运光的吸收为 9 dB/m; 内包层直径为 $200 \mu\text{m}$, 由六角型排布的空气孔阵列构成, 数值孔径为 $0.55 \mu\text{m}$, 且其中包含应力双折射材料构成的保偏元件, 保证纤芯处于真正的单一偏振态的单模运转. 利用聚焦粒子束刻蚀 (FIB) 的方法在上述光纤一个端面上的纤芯位置加工了 IMAX, 为便于加工与光纤激光器实验, 在加工前对 LMA-PCF 进行了端面气孔塌陷及研磨处理. 微型负轴锥镜的形貌结构如图 2(a) 所示, 顶部开口直径约为 $20 \mu\text{m}$, 深度约为 $3 \mu\text{m}$, FIB 加工后的相应 LMA-PCF 端面如图 2(b) 所示.

实验系统基于主振荡 - 放大器结构, 所设计的装置如图 2(c) 所示. 采用一个全正色散锁模域内的耗散孤子锁模光纤激光器 (OSC) 作为种子源, 该种子源在 56.9 MHz 下输出平均功率为 37 mW 的稳定锁模脉冲序列. 脉冲经过一个半高全宽 12 nm 的滤波片 (SF-12) 后注入由上述经过改造的 LMA-PCF 所构成的光纤放大系统内进行非线性放大, 该放大器由一个中心波长 976 nm 且最高输出功率 20 W 的高功率激光二极管 (LD) 抽运源进行后向抽运. 滤波器的引入能够有效去除种子脉冲两沿过高的非线性啁啾, 从而使脉冲被放大至更高能量和功率水平时的时域分布不会出现过大的畸变. 同时振荡器和放大器之间安置一个隔离度超过 40 dB 的光学隔离器 (ISO), 以此保证来自放大器的脉冲不会反向注入振荡器而干扰种子源的稳定性. 经过改造的增益 LMA-PCF 一端作为放大器的输出端, 其上的

IMAX 与输出端的焦距 11 mm 的非球面透镜 (AL) 构成了一个整形器, 它能够将纤芯内放大的高斯基模场变换成无衍射的贝塞尔光场. 输出的线偏振贝

塞尔脉冲经过两个滤除残余抽运光的双色镜 (DM) 后, 由一个半波片 (HWP) 和一个偏振分束器 (PBS) 的组合调节输出功率, 并经过一对透射光栅对压缩.

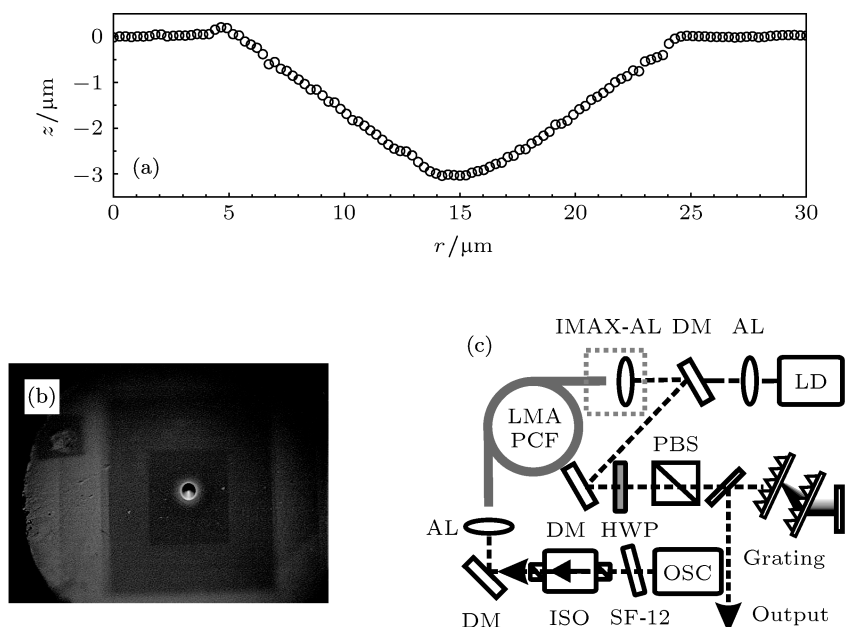


图2 FIB 加工后 (a) 微型负轴锥镜的形貌轮廓; (b) 光纤端面的光学显微镜图像; (c) 实验装置示意图: LMA-PCF, 掺 Yb 大模场面积光子晶体光纤; AL, 非球面透镜; IMAX-AL, 微型负轴锥-透镜; DM, 双色镜; LD, 大功率激光二极管; HWP, 半波片; PBS, 偏振分束器; Grating, 光栅对脉冲压缩器; ISO, 光学隔离器; SF-12, 12 nm 干涉滤波片; OSC, 光纤锁模振荡器

首先对基于 IMAX-AL 系统的贝塞尔光束整形系统按照第二节所述进行了数值模拟, 其中的参数均和实验所用到的相一致. 依照实验, 模型中不同的离焦量 Δ (对应不同的透镜位置 $z_1 = f + \Delta$) 能够对放大器输出的远场模式进行调节. 利用常规的数值积分求解菲涅尔衍射积分公式, 针对 (2) 和 (4) 式进行数值模拟获得的输出光束沿纵向 (传输方向) 演化结果如图 3(a) 所示. 该光束的横向分布正是贝塞尔光束, 它在距离 IMAX-AL 系统内的非球面透镜约 1.5 m 内能够实现明显的无衍射传输. 依据前述的设计构建的放大系统输出的光束经过衰减后入射至一台基于 CMOS 的相机上, 测得的光场沿纵向的分布如图 3(b) 所示. 实验结果稳定性与数值模拟预期符合, 在所测量的纵向距离范围 (据 IMAX-AL 中的非球面镜距离 0.4—1.5 m) 内, 测得的贝塞尔脉冲中心主瓣的半高全宽 (FWHM) 基本恒定在 290 μm 上下, 比模拟结果略窄, 且光场沿纵向的相对强度分布也与模拟结果有所差异. 导致这些差别的原因是多方面的, 诸如模拟的初始场是严格的高斯分布, 而实际 LMA-PCF 的基模场并不一定严格遵循此分布. 此外, 商用 LMA-PCF 的材料参数未知以及 IMAX 加工的非完美性

等均会对输出场的特性造成不确定的影响. 相对于同样 FWHM 尺寸束腰 (290 μm) 的高斯光束而言, 经过同样的约 1 m 传输距离后, 其 FWHM 会展宽 12 倍. 同时, 为了更进一步确认该光束的特性, 还测量了其自恢复功能. 实验中使用了一个不规则不透明物体遮挡住输出贝塞尔光束中心主瓣的全部和第一级亮环的绝大部分, 被遮挡后的光场沿遮挡屏后纵向位置的分布如图 3(c) 所示. 图中虚线左侧部分显示了该光束的自恢复演化过程, 在传输了约 25 cm 后, 该光场又恢复到了典型的中心明亮的类贝塞尔函数分布, 并保持与未受扰动的贝塞尔光束中心主瓣相同的 FWHM 尺寸继续无衍射传输.

通过加大 LD 的输出功率至满量程 20 W 时, 直接输出啁啾脉冲的平均功率可高达 10.1 W. 在最高输出功率指标下, 放大后脉冲的光谱如图 4(a) 所示, 呈现陡峭沿结构, 而相应的啁啾脉冲自相关曲线呈现三角型 (图 4(b) 的插图). 这是由于脉冲在全正色散光纤内的放大过程中引起的时域边沿陡峭所致, 且放大的脉冲已经积累了大量的非线性啁啾. 这一点在光栅对压缩器对脉冲去啁啾后的自相关曲线图 4(b) 中体现得更加明显: 脉冲被

压缩至最窄约 140 fs 时仍存在一个无法去除的基底. 经过一对 1250/mm 的透射光栅对压缩后, 能够输出 7.2 W 的功率, 对应能量 134 nJ. 考虑到该波包的时-空域形状, 在没有任何其他聚焦元件的情况

下, 其峰值光强约为 1.4 GW/cm^2 . 进一步采用其他透镜或者光学镜组 (例如望远镜) 对该光束进行聚焦或者缩束, 光束仍能够保持超越衍射极限高斯光束的无衍射贝塞尔电磁场分布.

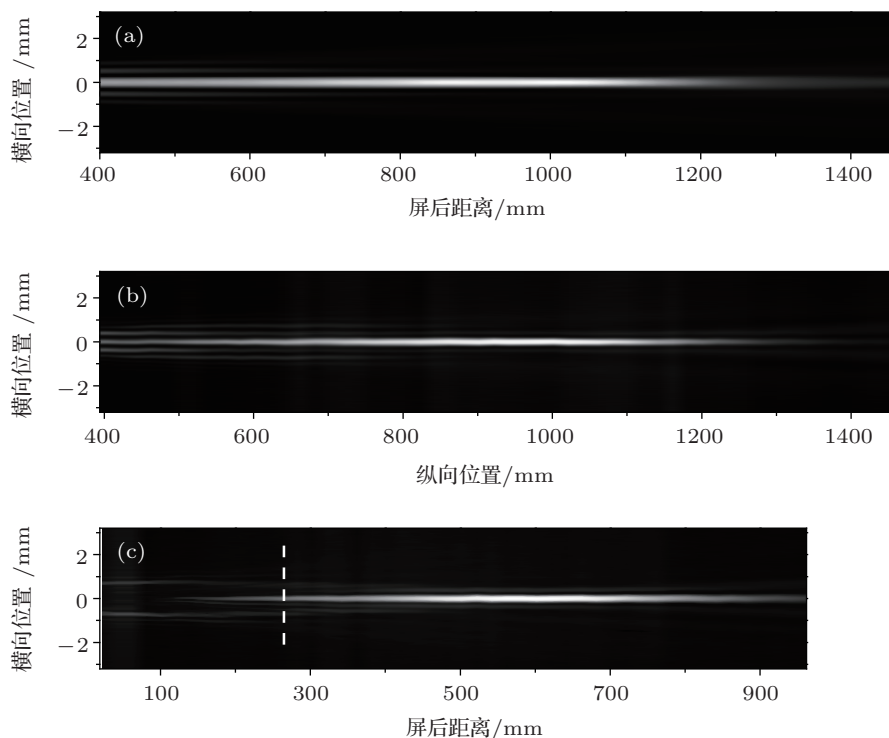


图 3 (a) 数值模拟和 (b) 实验测得的由放大器直接输出超短 Bessel 脉冲的空间分布; (c) 被挡住中心后, 该脉冲的空间自恢复特性, 虚线左侧部分为未恢复时的分布

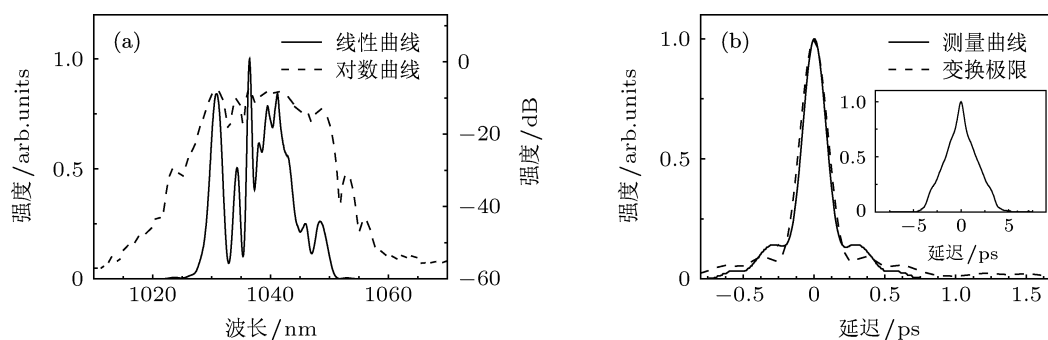


图 4 输出脉冲的 (a) 线性 (实线) 和对数 (虚线) 光谱; (b) 压缩后脉冲的自相关曲线 (实线) 和由光谱导出变换极限脉冲对应的自相关曲线 (虚线), 插图为未压缩脉冲的自相关曲线

4 结论

本文设计了一种基于光纤端面微型负轴锥镜和透镜的集成化整形器件, 该设计用于光纤激光系统内, 能够将光纤内高斯分布的基模场整形形成无衍射贝塞尔光束. 基于该设计在一段增益光纤的端面利用聚焦粒子束刻蚀技术制备了微型负轴锥镜, 进而以此构成能够直接输出高功率贝塞尔超短脉冲

光纤激光放大系统. 该系统在 56.9 MHz 重复频率下直接输出的啁啾皮秒贝塞尔光束显示了固有的无衍射传输特性和自恢复特性, 其特性与数值模拟定性地符合. 输出脉冲的平均功率达到 10.1 W, 经过透射光栅对压缩后脉宽可达 140 fs, 剩余功率 7.2 W. 该方案对于更加集成化的高长径比微纳结构加工、生物光声成像和高功率光学子弹合成等领域具有潜在的应用前景.

- [1] Durnin J, Miceli J J, Eberly J H 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1499
- [2] Bouchal Z, Wagner J, Chlup M 1998 *Opt. Commun.* **151** 207
- [3] Karásek V, Čžmár T, Brzobohatý O, Zemánek P, Garcés-Chávez V, Dholakia K 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 143601
- [4] Botcherby E J, Juškaitis R, Wilson T 2006 *Opt. Commun.* **268** 253
- [5] Bhuyan M K, Courvoisier F, Lacourt P A, Jacquot M, Salut R, Furfaro L, Dudley J M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 081102
- [6] McGloin D, Dholakia K 2005 *Contemp. Phys.* **46** 15
- [7] Zhang Q A, Wu F T, Zheng W T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 034205 (in Chinese) [张前安, 吴逢铁, 郑维涛 2012 物理学报 **61** 034205]
- [8] Wu F T, Ma L, Zhang Q A, Zheng W T, Pu J X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 014202 (in Chinese) [吴逢铁, 马亮, 张前安, 郑维涛, 蒲继雄 2012 物理学报 **61** 014202]
- [9] Wu F T, Jiang X G, Liu B, Qiu Z X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3125 (in Chinese) [吴逢铁, 江新光, 刘彬, 邱振兴 2009 物理学报 **58** 3125]
- [10] Bin Z, Zhu L 1998 *Appl. Opt.* **37** 2563
- [11] Steinvurzel P, Tantiwanichapan K, Goto M, Ramachandran S 2011 *Opt. Lett.* **36** 4671
- [12] Zhu X, Schulzgen A, Li L, Peyghambarian N 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 201102
- [13] Kim J, Jeong Y, Lee S, Ha W, Shin J S, Oh K 2012 *Opt. Lett.* **37** 623
- [14] Liberale C, Cojoc G, Candeloro P, Das G, Gentile F, De Angelis F, Di Fabrizio E 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 474
- [15] Grosjean T, Saleh S S, Suarez M A, Ibrahim I A, Piquerey V, Charraut D, Sandoz P 2007 *Appl. Opt.* **46** 8061
- [16] Cabrini S, Liberale C, Cojoc D, Carpentiero A, Prasciolu M, Mora S, Degiorgio V, De Angelis F, Di Fabrizio E 2006 *Microelectron Eng.* **83** 804
- [17] Eah S K, Jhe W, Arakawa Y 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 4969
- [18] Goodman J W 1996 *Introduction to Fourier Optics* (2nd Ed.) (New York: Mc-Graw Hill) p63
- [19] Song Y J, Hu M L, Liu B W, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6425 (in Chinese) [宋有建, 胡明列, 刘博文, 柴路, 王清月 2008 物理学报 **57** 6425]

High power Bessel ultrashort pulses directly output from a fiber laser system *

Xie Chen¹⁾ Hu Ming-Lie^{1)†} Xu Zong-Wei²⁾ Wu Wei²⁾ Gao Hai-Feng²⁾
Zhang Da-Peng¹⁾ Qin Peng¹⁾ Wang Yi-Sen¹⁾ Wang Qing-Yue¹⁾

1) (Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

2) (State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Centre of MicroNano Manufacturing Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 29 August 2012; revised manuscript received 1 October 2012)

Abstract

High power Bessel pulses directly output from a fiber-based amplifier system are demonstrated. A compact solution based on the inverse micro-axicon (IMAX) on fiber end is proposed for the conventional ultrashort pulse fiber laser system to enable the direct generation of high power Bessel pulses from lasers without any additional exhausting alignments. The IMAX is fabricated on one facet of a ytterbium-doped large mode area fiber by focusing ion beam technique and constitutes an integrated beam shaper in combination with an inherent collimating lens in the fiber laser system. The experimental results accord qualitatively with the simulations. The system can directly generate chirped Bessel pulses with diffraction-free propagation in meter-scaled free space. The highest average power of such a wavepacket can reach 10.1 W, corresponding to 178 nJ, and the pulse duration can be dechirped to 140 fs.

Keywords: diffraction, ultrashort pulse generation, fiber-optic elements, fiber laser

PACS: 42.25.Fx, 42.65.Re, 07.60.Vg, 42.55.Wd

DOI: 10.7498/aps.62.064203

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2011CB808101, 2010CB327604), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61078028, 60838004), the Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation, China (Grant No. 2007B34), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20110032110056).

† Corresponding author. E-mail: huminglie@tju.edu.cn