基于微纳光纤脉冲压缩器的皮秒脉冲掺镱光纤激光器

喻佳澜[1],刘 萌[1,2],李相越[1],汪徐德[3],罗爱平[1,2],徐文成[1,2],罗智超[1,2]

(1. 华南师范大学 广州市特种光纤光子器件重点实验室,广东 广州 510006;
2. 华南师范大学 广东省微结构功能光纤与器件工程技术研究中心,广东 广州 510006;
3. 淮北师范大学 物理与电子信息学院,安徽 淮北 235000)

摘 要: 1.0 μm 波段的超短脉冲激光器在激光加工、光学精密测量和生物医学等领域具有重要应用价值,但由于掺镱光纤激光器工作在全正色散区域,激光器直接输出的脉冲通常宽度较大。文中利用改变微纳光纤尺寸可以使其在 1.0 μm 波段提供反常色散的特点,将微纳光纤作为色散补偿元件在掺镱光纤激光器腔外对脉冲进行压缩来获得超短脉冲。实验中,自主拉制的微纳光纤锥腰直径为 3 μm,锥腰长度为 5 cm。掺镱光纤激光器直接输出脉冲宽度为 37.6 ps,经微纳光纤压缩后脉冲宽度为 8.5 ps。该结果提供了一种更简便低廉的压缩脉冲方法。

关键词: 微纳光纤; 掺镱光纤激光器; 脉冲压缩
中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0803005

Picosecond pulse Yb-doped fiber laser based on pulse compressor of microfiber

Yu Jialan[1], Liu Meng[1,2], Li Xiangyue[1], Wang Xude[3], Luo Aiping[1,2], Xu Wencheng[1,2], Luo Zhichao[1,2]

(1. Guangzhou Key Laboratory for Special Fiber Photonic Devices and Applications,
South China Normal University, Guangzhou 510006, China;
2. Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center for Microstructured Functional Fibers and Devices,
South China Normal University, Guangzhou 510006, China;
3. School of Physics and Electronic Information, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China)

Abstract: Ultra-short pulse lasers at 1.0 μm waveband have important applications in many fields such as laser processing, optical precision measurement, biomedicine etc. However, because the Yb-doped fiber laser operates in the all-normal dispersion regime, the pulse width of the laser output is usually large. Because the microfiber could provide anomalous dispersion at 1.0 μm waveband by changing its size, in

收稿日期: 2018-04-13; **修订日期:** 2018-05-03
基金项目: 国家自然科学基金(11474108,11304101,61307058,61378036,11504121);广东省自然科学基金杰出青年基金(2014A030306019);广东省科技创新青年拔尖人才(2014TQ01X220);广东省高等学校优秀青年教师培养计划培养(YQ2015051);广东省科技项目(2016B090925004);广东省光电子器件与系统(GD201602);广东高校青年创新人才项目(2017KQNCX051);广州市科技计划项目(201607010245);安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2017A381);华南师范大学青年教师科研培育基金(17KJ09)
作者简介: 喻佳澜(1994-),男,硕士生,主要从事超快激光方面的研究。Email:dashenyjn123@163.com
导师简介: 罗智超(1982-),男,研究员,硕士生导师,博士,主要从事超快激光及非线性孤子动力学方面的研究。Email:zcluo@scnu.edu.cn
通讯作者: 刘萌(1989-),女,讲师,博士,主要从事超快光纤激光技术及孤子动力学方面的研究。Email: mliu@m.scnu.edu.cn

order to achieve ultra-short pulse the microfiber was employed as dispersion compensation device to compress the Yb-doped fiber laser pulse. In this work, the diameter and length of taper waist of the home-made microfiber were 3 μm and 5 cm, respectively. The pulse width of the Yb-doped fiber laser was 37.6 ps, while it was compressed to be 8.5 ps by the microfiber. These results offer a more simple and inexpensive method for pulse compression.

Key words: microfiber; Yb-doped fiber laser; pulse compression

0 引 言

超短脉冲光纤激光器在光通信、工业加工、光信息处理等领域具有广阔的应用前景[1-3],所以近些年受到了研究人员的广泛关注。其中,掺镱超短脉冲光纤激光器由于具有吸收和增益带宽宽、可调谐范围大、可获得高能量脉冲等优点而成为激光技术领域的研究热点。不同于掺铒光纤激光器,掺镱光纤激光器工作在全正色散区域,在色散和非线性效应的共同作用下,掺镱光纤激光器输出的脉冲通常带有大量啁啾。这使得掺镱光纤激光器的锁模脉冲可以承受更强的非线性效应,有效地避免了光波分裂,从而实现更高能量的脉冲输出[4-5]。也正因为如此,通常掺镱光纤激光器直接输出的脉冲宽度较大,因此为了获得超短脉冲,可以在腔外引入色散补偿元件来实现脉冲压缩。目前最常用的腔外色散补偿元件是光栅对[6-7],它可以承受较高的峰值功率,并且可以灵活的调节色散补偿量。但是光栅对也有一些缺陷,比如,光栅对会导致光束畸变、衍射损耗较大等。另外,最近研究表明多种光纤器件也可以作为新型色散补偿元件用于 1.0 μm 波段的脉冲压缩,比如光子晶体光纤[8]、啁啾光纤光栅[9]、高阶模光纤[10]等。但是这些器件仍面临着许多的挑战,如光子晶体光纤与单模光纤的熔接目前仍是个难点问题;啁啾光纤光栅能承受的峰值功率有限;而高阶模光纤需要额外配合一段长周期布拉格光栅共同使用来实现低阶模与高阶模之间的相互转换。此外,前面提到的这些色散补偿元件还有一个共同缺陷是它们的价格都很昂贵,不利于降低成本。

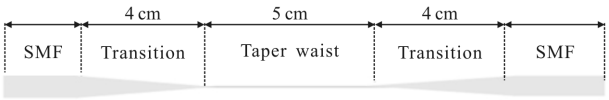
另一方面,微纳光纤由于具有很强的倏逝场、色散和非线性系数可调等独特的优势,在无源光纤器件、光传感、非线性光学等领域发展迅速[11-13]。尤其是随着微纳光纤芯径的变化,其波导色散可以实现大小正负的调谐[14]。最近,研究人员提出利用微纳光纤作为色散补偿元件用于掺镱光纤激光器中获得飞秒量级脉冲输出[15-16]。受此启发,可以通过设计微纳光纤的结构使之在 1.0 μm 波段提供反常色散,用于腔外压缩脉冲。此外,微纳光纤制作简便、成本低廉、易与光纤集成,是优良的色散补偿元件。

文中搭建了基于非线性偏振旋转(NPR)锁模的掺镱光纤激光器,直接输出光谱中心波长为1 060.5 nm,脉冲重复率为 37.05 MHz,脉冲宽度为 37.6 ps。随后利用一段锥腰长度为 5 cm,锥腰直径为 3 μm 的微纳光纤进行腔外压缩,最终得到脉冲宽度为8.5 ps 的锁模脉冲输出。该结果证实,微纳光纤确实可以作为优良的色散补偿元件用于脉冲压缩。

1 微纳光纤的制备与特性

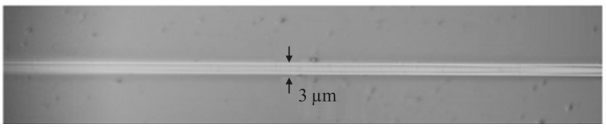
实验中,利用火焰刷技术将单模光纤拉锥成微纳光纤[17]。具体的拉制过程如下:首先将单模光纤中间~2 cm 的涂覆层剥除,将光纤涂覆层碎屑和灰尘擦拭干净,防止在加热过程中光纤表面形成一层碳化物质,严重影响拉锥效果。接下来利用酒精灯将剥除涂覆层的光纤加热至熔融状态,然后对单模光纤的两端施加拉力,通过对拉伸力度和速度的控制,得到直径为 10~20 μm 的微纳光纤。最后,缓慢地控制火焰加热范围和拉伸速度,对光纤直径进行微调来获得理想尺寸的微纳光纤。拉制过程完成以后需对微纳光纤进行封装:固定两端未拉制的单模光纤,并将微纳光纤置于盒子内,防止其受到灰尘污染和环境影响。图 1(a)是微纳光纤结构的示意图,可以看到微纳光纤主要包括三部分:标准单模光纤、过渡区域和锥腰。实验中使用的微纳光纤锥腰直径为 3 μm,锥腰长度为 5 cm,单边过渡区域长度为 4 cm。图 1(b)展示

了微纳光纤锥腰部分的显微镜图,图 1(c)为往微纳光纤通入可见光后观察到散射的倏逝场情况。



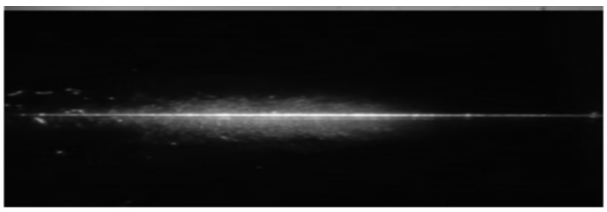
(a) 微纳光纤结构示意图

(a) Structure of microfiber



(b) 微纳光纤锥腰部分的显微图

(b) Microscopy image of the taper waist of microfiber



(c) 可见光进入微纳光纤散射出的倏逝场情况

(c) Scattering evanescent field of the microfiber through injecting the visible light

图 1 微纳光纤

Fig.1 Microfiber

2 实验装置

实验中搭建的掺镱光纤激光器结构如图 2 所示,该激光器采用 NPR 方式实现锁模,激光腔内无反常色散元件,因此激光器工作在全正色散区域。激光腔中的光集成器件(OIM)将 980/1 060 nm 波分复用器、偏振相关隔离器、耦合比为 20:80 的耦合器的功能集成在一起,可将泵浦光耦合进入腔内、保证光的单向传输和输出激光。976 nm 的泵浦光经过 OIM 进入激光腔, 对一段 70 cm 高掺杂的掺镱光纤(Nufern,SM-YDF-HI) 进行泵浦, 其中掺镱光纤在 975 nm 处的吸收率为 250 dB/m。两个四分之一波片(QWP)和一个二分之一波片(HWP)用于调节光的偏振态。5 nm 的带通滤波器(BPF)放置在腔内实现滤波效应。各器件的尾纤均为 HI 1060 单模光纤,激光腔总腔长为 5.52 m。通过精细地调节三个波片,激光器可以实现稳定的锁模运转。在激光器的输出端放置前期制备好的微纳光纤,用于脉冲压缩。实验中利用光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6317C)来测量激光器的输出光谱;12.5 GHz 光电探测器 (Newport 818-BB-35F) 和 16 GHz 带宽的高速示波器(Tektronix DSA71604B) 测量脉冲序列; 频谱分析仪(Agilent E4407B)对脉冲质量进行检测。为了得到脉冲宽度的准确值,利用商用自相关仪(Femtochrome FR-103WS)进行测量。

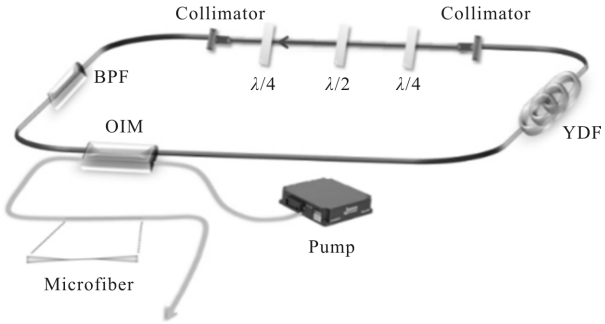
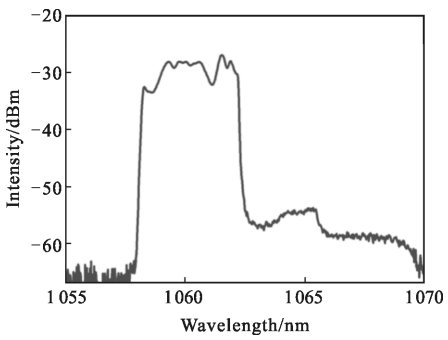


图 2 掺镱光纤激光器实验装置图

Fig.2 Experimental setup of Yb-doped fiber laser

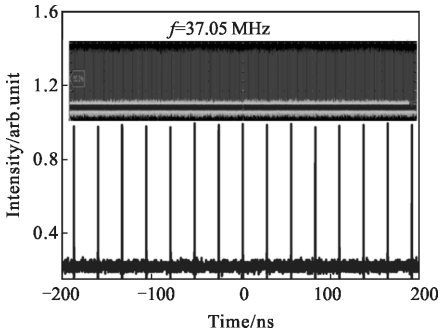
3 实验结果

实验中激光器通过调节波片可以实现 NPR 锁模脉冲输出。图 3 展示了在泵浦功率为 360 mW 时,激光器工作在稳定的锁模状态, 输出功率为19 mW。图 3(a)为该状态下的锁模光谱,光谱呈矩形,为典型的耗散孤子光谱形状[18],中心波长为 1 060.5 nm,带宽为 3.1 nm。图 3(b)为相应的锁模脉冲序列,脉冲间隔为 26.99 ns,对应于基频重复率 37.05 MHz。图 3(b)的插图展示了大范围内的脉冲序列, 可以看到脉冲强度无明显波动, 说明此时的锁模状态很稳定。随后,利用自相关仪测量此时的脉冲宽度为 37.6 ps,时



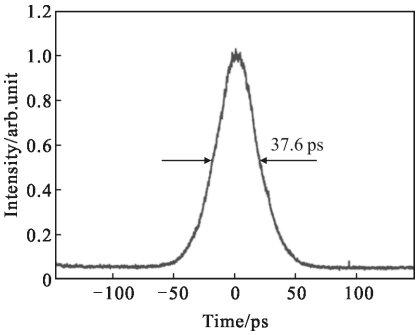
(a) 输出光谱

(a) Output spectrum



(b) 脉冲序列,插图:大范围脉冲序列

(b) Pulse train, Inset: Pulse train with larger range



(c) 自相关曲线

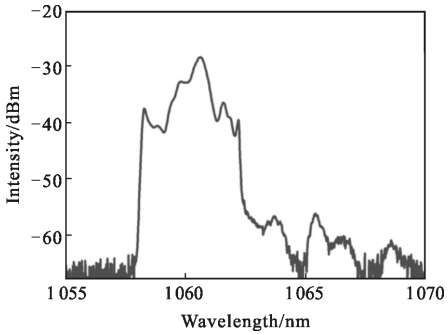
(c) Autocorrelation trace

图 3 耗散孤子锁模状态

Fig.3 Dissipative soliton state

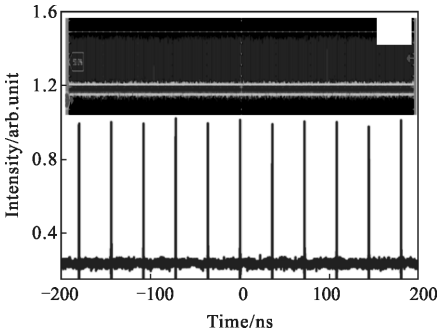
间带宽积为 31.1,远大于 0.441,说明此时脉冲带有大量啁啾。

为了获得超短脉冲,将拉制好的微纳光纤放置在激光器的输出端。激光器直接输出脉冲功率为 19 mW,经过微纳光纤后的功率为 2 mW,可知微纳光纤损耗为 9.78 dB。实验中微纳光纤损耗较大,实际制备微纳光纤过程中可以通过控制微纳光纤的直径和均匀度来减小插入损耗。经过微纳光纤之后的激光特性如图 4 所示。图 4(a)展示了压缩后的光



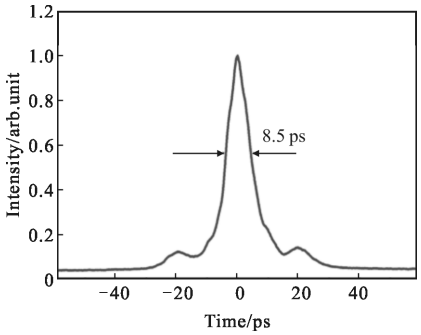
(a) 输出光谱

(a) Output spectrum



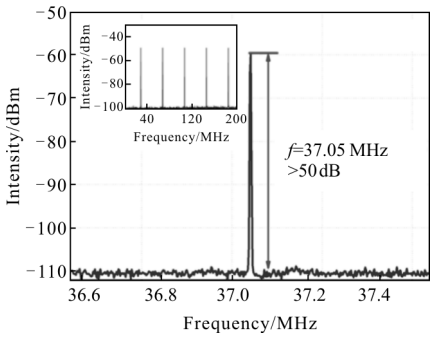
(b) 脉冲序列

(b) Pulse train



(c) 自相关曲线

(c) Autocorrelation trace



(d) 射频谱图,插图:200 MHz 范围的射频谱图

(d) Radio frequency spectrum, Inset: Radio frequency spectrum with 200 MHz range

图 4 经微纳光纤压缩后激光的特性

Fig.4 Laser characteristics after microfiber compression

谱情况,与图 3(a)对比可以发现光谱宽度无变化,但压缩后光谱出现了较明显的调制,这是由微纳光纤拉制不均匀引入的滤波效应导致的。图 4(b)和(c)给出了相应的脉冲序列和自相关迹,从自相关迹可以看出脉冲宽度为 8.5 ps,自相关底部有强度较低的基座,这可能是三阶色散未被补偿导致的[8]。为了检验

压缩后的脉冲质量,测量了压缩后脉冲的射频谱,如图 4(d)所示。从图中可以看出,脉冲基频重复率为 37.05 MHz,信噪比大于 50 dB,图 4(d)的插图中给出了 200 MHz 范围的射频谱图，这些结果证实此时脉冲稳定性和质量良好。

4 结 论

文中采用光纤和空间光路组合的方式搭建了基于 NPR 锁模的掺镱光纤激光器,激光器直接输出中心波长为 1 060.5 nm，带宽为 3.1 nm，脉冲宽度为 37.6 ps 的脉冲序列。随后利用自主拉制的微纳光纤(锥腰直径为 3 μm,锥腰长度为 5 cm,单边过渡区域长度 4 cm)在腔外对脉冲进行压缩,最终获得宽度为 8.5 ps 的脉冲输出。该实验验证了微纳光纤可在掺镱光纤激光器工作波段提供反常色散，并作为一种性能优良、成本低廉的脉冲压缩器应用于激光技术等领域。

参考文献:

[1] Mourou G, Brocklesby B, Tajima T, et al. The future is fibre accelerators[J]. ***Nature Photonics***, 2013, 7(4): 258-261.

[2] Samira Karimelahi, Ladan Abolghasemi. Rapid micromachining of high aspect ratio holes in fused silica glass by high repetition rate picosecond laser [J]. ***Applied Physics A***, 2014, 114(1): 91-110.

[3] Ates S M, Korkmaz F M, Caglar I S, et al. The effect of ultrafast fiber laser application on the bond strength of resin cement to titanium [J]. ***Lasers Med Sci***, 2017, 32(5): 1121-1129.

[4] Chong A, Buckley J, Renninger W, et al. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser [J]. ***Optics Express***, 2006, 14(21): 10095-10100.

[5] Grelu P, Akhmediev N. Dissipative solitons for mode-locked lasers [J]. ***Nature Photonics***, 2012, 6(2): 84-92.

[6] Ilday F Ö, Buckley J, Kuznetsova L, et al. Generation of 36-femtosecond pulses from a ytterbium fiber laser [J]. ***Opt Express***, 2003, 11(26): 3550-3354.

[7] Zhou Xiangyu, Dai Yoshitomi, Yohei Kobayashi, et al. Generation of 28-fs pulses from a mode-locked ytterbium fiber oscillator[J]. ***Opt Express***, 2008, 16(10): 7055-7059.

[8] Zhang Zuxing, Sene C, Hamid R, et al. Sub-50fs Yb-doped laser with anomalous-dispersion photonic crystal fiber [J]. ***Opt Letters***, 2013, 38(6): 956-958.

[9] Erden Ertorer, Moez Haque, Li Jiangzhao. Femtosecond laser filaments for rapid and flexible writing of fiber Bragg grating [J]. ***Opt Express***, 2018, 26(7): 9323-9331.

[10] Schultz M, Prochnow O, Ruehl A, et al. Sub -60 -fs ytterbium-doped fiber laser with a fiber based dispersion compensation [J]. ***Opt Letters***, 2007, 32(16): 2372-2374.

[11] Richardson D J, Koukharenko E, Xu F, et al. Optical fiber nanowires and microwires: fabrication and, applications [J]. ***Advances in Optics & Photonics***, 2009, 1(1): 107-161.

[12] Tong Limin, Zi Fei, Guo Xin, et al. Optical microfibers and nanofibers: A tutorial[J]. ***Optics Communications***, 2012, 285 (23): 4641-4647.

[13] Wu Xiaoqin, Wang Yipei, Tong Limin. Optical microfiber sand their applications [J]. ***Physics***, 2015, 44(6): 356-359.

[14] Tong Limin, Lou Jingyi, Mazur Eric. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides [J], ***Opt Express***, 2004, 12(6):1025-1035.

[15] Yang Peilong, Teng Hao, Fang Shaobo, et al. 65-fs Yb-doped all-fiber laser using tapered fiber for nonlinearity and dispersion management [J]. ***Opt Letters***, 2018, 43(8): 1730-1733.

[16] Wang Lizhen, Xu Peizhen, Li Yuhang, et al. Femtosecond mode-locked fiber laser at 1 μm via optical microfiber dispersion management[J]. ***Scientific Reports***, 2018, 8: 4732.

[17] Brambilla G, Finazzi V, Richardson D J. Ultra-low-loss optical fiber nanotapers [J]. ***Opt Express***, 2004, 12 (10): 2258-2263.

[18] Zhao L M, Tang D Y, Wu J. Gain-guided soliton in a positive group-dispersion fiber laser [J]. ***Opt Letters***, 2006, 31: 1788.