

## 可调谐全正色散掺镱光纤激光器

朱晓军, 许小梅

(南通大学 电子信息学院, 江苏 南通 226019)

**摘要:** 利用相位长周期光纤光栅作为光谱滤波器, 熔接于全正色散掺镱光纤激光系统中, 从而实现了具有波长可调谐的连续激光输出和被动锁模激光脉冲输出, 可调谐激光波长范围分别为 11.4 nm 和 10.5 nm。通过调节偏振片改变激光腔内的偏振状态, 输出锁模脉冲实现脉冲宽度的可调谐, 其调谐范围为 3.6~1.2 ns。在 530 mW 的最大泵浦功率下, 得到了重复频率为 2.5 MHz、最大单脉冲能量为 38.9 nJ 的锁模脉冲输出和最大输出功率为 124 mW 的连续激光输出。

**关键词:** 可调谐; 掺镱光纤激光器; 非线性偏振旋转; 长周期光纤光栅; 全正色散  
**中图分类号:** TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3516-05

## Tunable all-normal dispersion Yb-doped fiber laser

Zhu Xiaojun, Xu Xiaomei

(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract:** Both tunable continuous-wave (CW) and passively mode-locked pulses of all-normal dispersion (ANDi) Yb-doped fiber laser (YDFL) with phase-shifted long period fiber grating (PS-LPFG) as a all-fiber format spectrum fused in the laser cavity was reported and demonstrated, in which the output wavelengths can be tuned over a spectral range of 11.4 nm for the CW mode and 10.5 nm for the mode-locking mode, respectively.

**Key words:** tunable; Yb-doped fiber laser; nonlinear polarization rotation; long period fiber grating; all normal dispersion

收稿日期: 2014-03-05; 修订日期: 2014-04-10

基金项目: 江苏省自然科学基金(SBK201341292); 南通市科技计划项目(BK2013042);

江苏省高校省级重点实验室开放课题(KJS1204); 南通大学人才引进项目(03080670)

作者简介: 朱晓军(1983-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光纤器件与光纤激光器方面的研究。Email: zhuxj0122@ntu.edu.cn

## 0 引言

波长可调谐光纤激光器是高速大容量光通信系统、波分复用、时分复用系统中的关键部件,广泛应用光纤传感、光纤通信以及光测量和光检测等领域。近年来,具有纳秒量级输出的高能量脉冲激光在光学微加工、生物探测等领域具有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。纳秒脉冲产生的传统方法是使用调 Q 技术,但是调 Q 激光器的脉冲宽度一般在十几个或者几十个纳秒,很难实现脉宽在几百个皮秒到几个纳秒的脉冲。2008 年, Renninger 等人使用 62 m 长的单模光纤,在全正色散(All-normal-dispersion, ANDi)激光腔中,输出了脉冲宽度为 150 ps、重复频率为 3 MHz 的巨啁啾被动锁模激光脉冲。

此后,通过增加激光腔腔体长度,在 ANDi 激光系统中实现具有高脉冲能量和低重复频率的皮秒、纳秒量级的被动锁模激光器成为研究的热点<sup>[4]</sup>。Tian<sup>[5]</sup>等人报道了利用 503.3 m 的单模光纤,实现被动锁模掺铒光纤激光输出,其输出脉宽为 910 ps、重复频率为 397 kHz。然而其腔体内没有可调谐滤波元件无法实现输出激光波长的可调谐。2009 年和 2010 年, Schultz<sup>[6]</sup>和 Kong<sup>[7]</sup>等人通过旋转激光系统中体光谱滤波器和体双折射晶体的角度,来实现锁模脉冲输出波长的可调谐,但是由于激光腔体内分立体滤波器的使用,使得激光腔结构无法实现全光纤化。2011 年,在 ANDi 系统中,用相位长周期光纤光栅(Phase-Shifted Long Period Fiber Grating, PS-LPFG)作为全光纤结构滤波器,实现了纳秒级锁模脉冲的波长可调谐的初步结果<sup>[8]</sup>。

文中利用 PS-LPFG 作为全光纤结构的光谱滤波器,在 ANDi 系统中分别实现了连续激光输出和锁模脉冲输出波长的可调谐。可调谐激光波长由 PS-LPFG 的带通滤波器唯一确定。对于连续激光输出,其波长可调谐范围为 1 028.2~1 039.6 nm;对于被动锁模激光器,其输出激光波长可调谐范围为 1 028.66~1 039.1 nm。同时,通过调节偏振片,被动锁模脉冲实现了 1.2~3.6 ns 的脉冲宽度可调谐。在最大泵浦功率 530 mW,锁模激光的最大输出功率为 97 mW,连续激光的最大输出功率为 124 mW。

## 1 实验装置

使用 CO<sub>2</sub> 激光器进行 PS-LPFG 的刻写,其激光

聚焦光斑直径为~100 μm。PS-LPFG 的相位变化发生在光栅中心位置,整个光栅写入的光栅周期数为 70,刻写光栅采用康宁公司的 HI1060 单模光纤。图 1 为 PS-LPFG 带通滤波器可调谐的实验装置图及 PS-LPFG 在不同的弯曲曲率下的透射光谱图。图 1(a)为实现 PS-LPFG 带通滤波器输出光谱可调谐实验装置图。将 PS-LPFG 放置在光纤夹具中心位置,两端分别固定在光纤夹具上(Fiber holder),其中一端光纤固定于可自由移动的位移平台上,通过调节位移平台可以改变光栅的弯曲曲率。光栅在自由伸长状态下位移平台的位置设为零(z=0)。当光纤一端固定(Fiber holder 1),调节另一端的光纤夹具(Fiber holder 2)引起光栅的曲率发生变化,致使透射光谱的波长发生变化,实现带通(Bandpass, BP)滤波器透射光谱的可调谐如图 1(b)所示。通过调节位移平台的位置,光栅的透射光谱实现了蓝移。透射光谱随着光栅曲率的增加而向短波长方向移动,透射波长实现了波长可调谐。因此,通过调节位移平台的位置,改变 PS-LPFG 的曲率,就可以实现 PS-LPFG 带通滤波器中心波长的可调谐。当位移平台位置从 z=0~z=0.10 mm 改变时,带通滤波器中心波长实现从 1 028.3~1 039.1 nm 的波长连续可调,最大连续可调谐波长范围为 10.8 nm。由于 PS-LPFG 和光纤天然的兼容特性,实现了光谱滤波器的全光纤化。通过调节 PS-LPFG 的曲率,实现输出激光波长的可调谐。

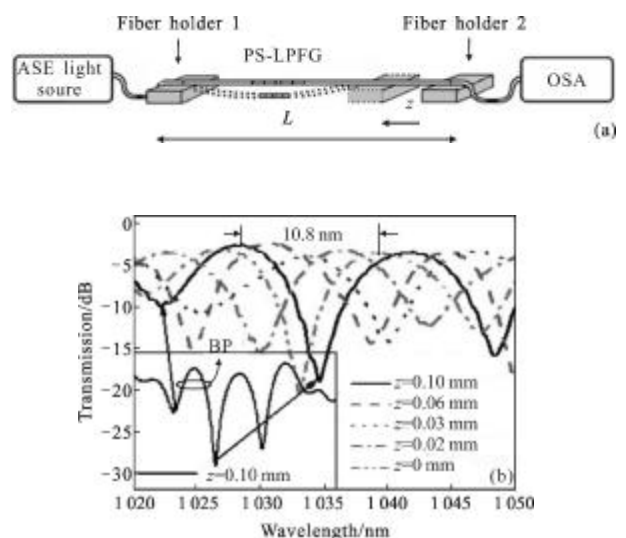


图 1 可调谐实验装置透射光谱图

Fig.1 Tunable transmission spectra experiment device

$\lambda/4$ ,  $\lambda/2$ :  $1/4$  波片和  $1/2$  波片以及 ANDi 掺镱光纤激光系统结构装置如图 2 所示。其中,采用掺镱光纤(Yb-Doped Fiber, YDF)作为增益光纤,长度为 28 cm。掺镱光纤在 976 nm 的吸收为 612 dB/m。输出波长为 976 nm 的激光二极管提供激光泵浦,通过波分复用器(WDM)和增益光纤相连接,其最大泵浦功率为 530 mW。长度为 72.4 m 的单模光纤 (SMF)与 WDM 的另外一端相连接提供大的光纤色散。PS-LPFG 作为全光纤结构的光谱滤波器连接于增益光纤的另外一端。利用非线性偏振旋转(Nonlinear Polarization Rotation, NPR)效应作为被动锁模机理来实现 ANDi 掺镱光纤环形激光系统的锁模脉冲输出,其通过一个  $1/2$  波片以及一个偏振光分束器(Polarizing Beam Splitter, PBS) 和两个  $1/4$  波片来实现,其中偏振光分束器的输出端作为激光的输出端。整个 ANDi 光纤环形腔系统总长度为 78 m, 对应于 2.5 MHz 的脉冲重复频率。

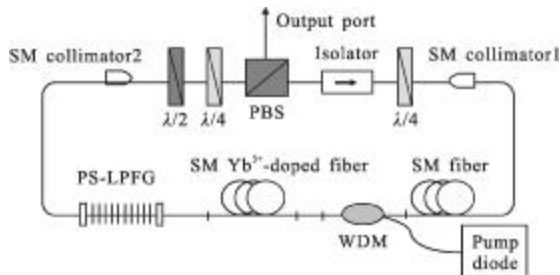


图 2 波长可调谐 ANDi 掺镱光纤激光系统结构图

Fig.2 Wavelength tunable Yb-doped fiber laser ANDi system structure diagram

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 波长可调谐的 ANDi 被动锁模光纤激光器

ANDi 掺镱光纤系统中,利用 NPR 效应作为锁模机理,当泵浦功率大于锁模阈值(260 mW)以后,通过调节偏振片得到了稳定锁模脉冲输出。通过调节 PS-LPFG 的曲率实现了被动锁模输出激光波长的可调谐。图 3 是在不同 PS-LPFG 曲率下得到的被动锁模输出光谱图。其中,泵浦功率为 480 mW。通过改变 PS-LPFG 的曲率,锁模激光波长实现了 1 028.66~1 039.1 nm 的连续可调谐,可调谐光谱范围为 10.5 nm。图 3(b)表示的是 PS-LPFG 透射谱和被动锁模输出光谱的对比图,其中位移平台位置为  $z=0.10$  mm。由图可以看出锁模脉冲输出光谱中心波长对应于 PS-

LPFG 带通滤波器的中心波长,锁模激光输出光谱的中心波长为 1 028.66 nm,对应于 PS-LPFG 带通滤波器的中心波长为 1028.28 nm。因此,ANDi 被动锁模激光输出的波长位置由 PS-LPFG 唯一确定。通过精确控制 PS-LPFG 的曲率半径就可以控制锁模激光

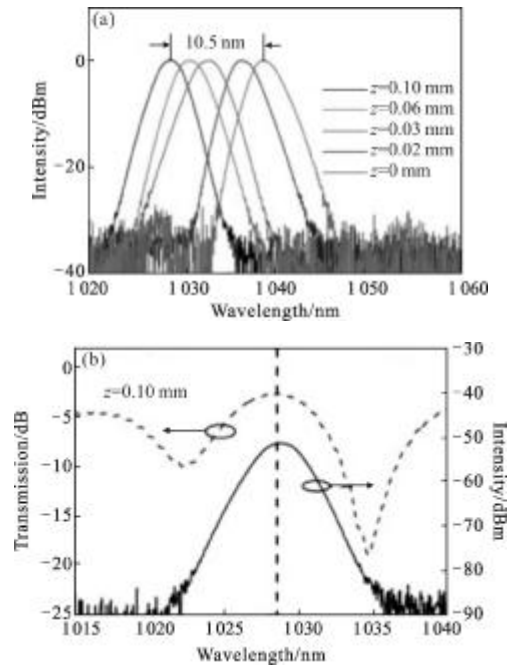


图 3 不同 PS-LPFG 曲率下被动锁模输出光谱图

Fig.3 Passively mode-locked outputs at various bending of PS-LPFG

脉冲输出光谱位置,实现输出锁模脉冲波长的可调谐性。值得注意的是在锁模激光波长可调谐的过程中,激光器一直工作于锁模状态,这是其他激光器难以达到的<sup>[7-8]</sup>。为了证实被动锁模激光输出脉冲的稳定性,分别利用频谱分析仪(Agilent E4440A)和高频示波器(Lecroy wavepro7100)进行锁模激光脉冲以及频谱的测量如图 4 所示( $z=0.10$  mm)。图 4(a)是使用高频示波器测量的锁模脉冲序列图,由图可知,输出脉冲序列能量强度均匀,锁模状态稳定。图 4(b)是在最大泵浦功率为 530 mW 条件下测量的单脉冲形状,其中,最大脉冲宽度为 2.24 ns,对应于 85.5 mW 的平均功率输出,得到最大的单脉冲能量为 34.34 nJ。图 4(c)是在稳定锁模脉冲输出条件下,基频的频谱响应图,其中频谱测量范围为 15 kHz,测量精度为 1 Hz。由图 4 可知在被动锁模状态下,基频脉冲的信号强度大于 53 dB。图 4(d)为当测量频域范围扩大到 50 MHz

下的频谱图,其中测量精度为 1 kHz。由图可知,输出脉冲频谱的基频为 2.5 MHz 和 78 m 的激光腔体总长度相一致。可以看出, PS-LPFG 作为全光纤结构的光谱滤波器实现 ANDi 系统的被动锁模, 输出激光工作稳定。实际的测量中,稳定的锁模输出状态可以连续保持好几天而脉冲强度不会发生任何形式的衰减。

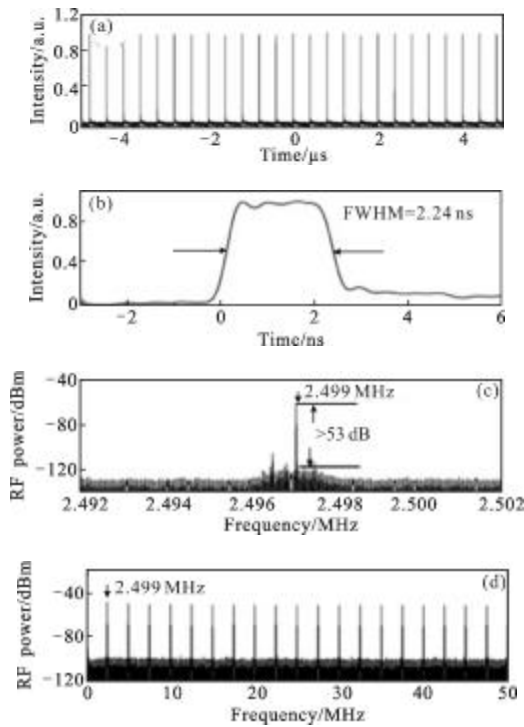


图 4 稳定激光锁模脉冲序列及频谱图

Fig.4 Mode-locked pulses trains and radio-frequency spectrum

在 ANDi 被动锁模谐振腔中, 由于谐振腔内不引入任何色散补偿元件,腔体内的色散都为正,激光输出脉冲主要依赖于激光器的耗散过程, 因此这类脉冲称作耗散孤子脉冲。而耗散孤子脉冲是由腔体内的非线性饱和吸收、线性增益、频谱滤波、损耗和相位调制等耗散过程所共同决定。所以,通过旋转偏振片来改变腔体内的非线性饱和吸收, 以此来实现锁模脉冲宽度的可调谐如图 5 所示。当 PS-LPFG 曲率位置保持在  $z=0.10$  mm,通过调节 1/4 波片改变激光系统中的偏振状态,实现脉冲宽度(Full Width at Half Maximum, FWHM)由 1.2~3.6 ns 连续可调谐。需要指出的是在图 5 中,每个输出脉冲顶部都类似“平顶”的形状,而这种类似“平顶”的脉冲形状恰是 ANDi 锁模脉冲的重要特征之一。这是由于在 ANDi

激光系统中, 输出脉冲具有很强的啁啾而且啁啾呈现线性。当系统腔长增加时,腔体内的色散也随之增大,导致输出脉冲线性展宽,出现了类似“平顶”的脉冲形状。在最大泵浦功率为 530 mW 时,经过功率计测量得到的最大锁模脉冲输出平均功率为 97 mW。通过调节偏振片,改变激光腔体内的偏振状态,实现锁模激光脉冲宽度的可调谐。另外结合 PS-LPFG 带通滤波器导致的输出脉冲光谱的可调谐, 就可以实现同时具有脉冲宽度可调和输出激光波长可调的多用途光纤激光系统。

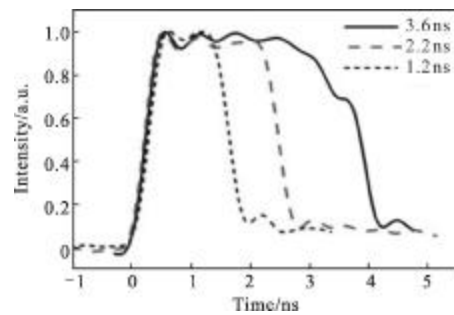


图 5 不同偏振状态下脉冲宽度的可调谐

Fig.5 Output pulse duration tuning at various polarizations states

### 2.2 波长可调谐的连续激光器

在激光系统中,激光输出波长是由 PS-LPFG 滤波器唯一决定的,输出激光波长和 PS-LPFG 的带通滤波器的中心波长一一对应。因此,通过改变 PS-LPFG 曲率, 调节 PS-LPFG 带通滤波器中心波长位置,就可以改变输出激光的波长位置,实现连续激光输出波长的可调谐如图 6 所示。其中,激光器的出光阈值为 53 mW。通过调节 PS-LPFG 的曲率,连续激光输出波长实现了从 1 028.2~1 039.6 nm 的连续可调,可调谐范围为 11.4 nm。经过测量得到了连续激

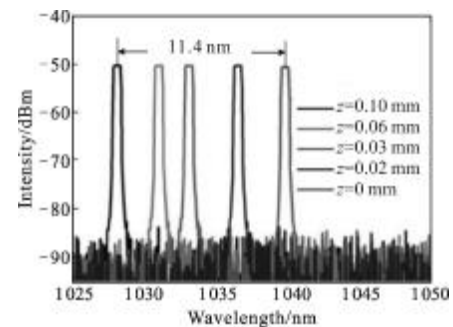


图 6 波长可调谐的连续光输出

Fig.6 Wavelength tuning with continuous-wave laser output



光输出激光的最大边模抑制比大于 30 dB。在最大为 530 mW 的泵浦功率下,得到了 124 mW 的最大连续激光输出。

### 3 结 论

使用 PS-LPFG 作为全光纤结构的光谱滤波器熔接于 ANDi 激光系统中,实现了锁模激光和连续激光输波长的可调谐,最大可调谐范围分别为 10.5 nm 和 11.4 nm。当最大泵浦功率为 530 mW 时,锁模脉冲的最大平均功率为 ~97 mW,连续激光的最大输出功率为 ~124 mW。通过调节腔体内的偏振状态,实现了锁模激光脉冲在 1.2~3.6 ns 范围的可调谐。

#### 参考文献:

- [1] Liu Hongjun, Gao Cunxiao, Huang Nan, et al. Generation of high-power tunable picosecond fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1438-1441. (in Chinese)  
刘红军, 高存孝, 黄楠, 等. 高功率可调谐皮秒光纤激光产生技术[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(8): 1438-1441.
- [2] Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang, et al. Recent progress of high-power fiber lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 135-138. (in Chinese)  
楼祺洪, 周军, 朱健强, 等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(2): 135-138.
- [3] Renninger W H, Chong A, Wise F W. Giant-chirp oscillators for short-pulse fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(24): 3025-3024.
- [4] Kobtsev S, Kukarin S, Fedotov Y. Ultra-low repetition rate mode-locked fiber laser with high-energy pulses [J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 21936-21941.
- [5] Tian X, Tang M, Shum P P, et al. High-energy laser pulse with a submegahertz repetition rate from a passively mode-locked fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(9): 1432-1434.
- [6] Schultz M, Karow H, Prochnow O, et al. Ytterbium femtosecond fiber laser without dispersion compensation tunable from 1015 nm to 1050 nm[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(3): 2567-2570.
- [7] Kong L J, Xiao X S, Yang C X. Tunable all-normal-dispersion Yb-doped mode-locked fiber lasers [J]. *Laser Physics*, 2010, 20(4): 834-837.
- [8] Zhu X J, Wang C H, Liu S X, et al. Tunable high energy giant chirped passively mode-locked Yb-doped fiber laser [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(9): 1625-1628.