

# 基于微纳光纤环的多波长锁模光纤激光器

蔡宇, 钱禹豪, 万洪丹, 张琳, 张祖兴

南京邮电大学光电工程学院先进光子技术实验室, 江苏南京 210023

**摘要** 提出了一种基于微纳光纤环的多波长锁模光纤激光器, 该光纤激光器由“8”字形激光腔和微纳光纤环两个部分构成。光纤激光器锁模机制是基于非线性放大环的等效饱和吸收作用, 并在单向激光腔一侧加入微纳光纤环, 该环是由单模光纤火焰拉锥后扭曲制成的。由于不同波长的光在通过微纳光纤环扭曲区域时会产生相位差, 从而导致了多波长锁模现象。实验中, 通过增加抽运功率和调节偏振控制器获得双波长的锁模脉冲。该多波长锁模光纤激光器具有全光纤结构, 在光传感、光学测量、微波光子学、光信号处理、太赫兹波产生和波分复用光传输系统等领域都有着非常重要的应用。

**关键词** 激光器; 多波长激光; 微纳光纤环; 锁模激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0901001

## Multiwavelength Mode-Locked Fiber Laser Based on Micro-Fiber Loop

Cai Yu, Qian Yuhao, Wan Hongdan, Zhang Lin, Zhang Zuxing

Laboratory of Advanced Photonic Technology, School of Optoelectronic Engineering,  
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China

**Abstract** The multiwavelength mode-locked fiber laser with a micro-fiber loop is proposed. The fiber laser is composed of two parts, the 8-shaped laser cavity and the micro-fiber loop. The mode-locked mechanism is based on the equivalent saturable absorption effect of nonlinear amplifying loop mirror. The micro-fiber loop fabricated through twisting the taped fiber is incorporated on the side of the unidirectional laser cavity, which results in a phase difference when the light with different wavelengths pass through the micro-fiber loop. Thus, the multi-wavelength mode-locked can be realized. In the experiment, the dual-wavelength mode-locked pulses are obtained by increasing the pump power and adjusting the polarization controller. The multi wavelength mode-locked fiber laser with all-fiber configuration has potential applications in optical sensing, optical measurement, microwave photonics, optical signal processing, terahertz generation and wavelength division multiplexing optical transmission system.

**Key words** lasers; multiwavelength laser; micro-fiber loop; mode-locked laser

**OCIS codes** 140.3510; 140.4050; 140.3500

## 1 引言

20世纪90年代以来,人类社会进入了一个前所未有的信息交换量急剧增长的时期,这同时也对通信网传递信息的能力提出了更高的要求。现代光纤通信系统<sup>[1]</sup>需要不断增加信道数量,最简单直接的方法就是不停地增加单波长激光器,但是这就使得通信系统变得臃肿,成本变大。然而多波长锁模激光器能够同时为多个波长信道提供光源,这样就能够实现密集波分复用(DWDM)的传输。同时,多波长锁模激光器在光传感、光学测量、微波光子学、光信号处理、太赫兹波产生等方面也都有着非常重要的应用<sup>[2]</sup>。因此,多波长锁

收稿日期: 2017-03-11; 收到修改稿日期: 2017-04-25

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20161521)、江苏省特聘教授资助项目(RK002STP14001)、江苏省“六大人才高峰”资助项目(2015-XCL-023)、南京邮电大学人才引进项目(NY214002, NY215002)

作者简介: 蔡宇(1994—),男,硕士研究生,主要从事锁模光纤激光器方面的研究。E-mail: 18362972258@163.com

导师简介: 张祖兴(1975—),男,博士,教授,主要从事激光技术、光纤传感和光信号处理方面的研究。

E-mail: zxzhang@njupt.edu.cn(通信联系人)

模光纤激光器近年来成为研究热点之一。目前在室温下得到多波长锁模脉冲的方法有采用马赫-曾德尔干涉技术的被动锁模大功率光纤激光器<sup>[3]</sup>,实现了 1 μm 波段的四波长锁模脉冲输出;Graydon 等<sup>[4]</sup>利用双芯掺铒光纤制成环形腔激光器,在室温下获得三波长的激光输出,但波长个数和波长间隔等不可方便控制;在 1.5 μm 波段,将基于双折射效应的梳状滤波器引入非线性偏振旋转(NPR)、非线性光纤环形镜(NOLM)和非线性放大环形镜(NALM)等锁模技术中,实现多波长锁模<sup>[5]</sup>。虽然这些方法都能够得到多波长激光输出,但是存在着成本较高、结构较复杂等弊端。

近年来人们对梳状滤波器和不同锁模技术结合的多波长锁模激光器进行了大量的研究,但是基于微纳光纤的多波长锁模的研究相对较少。微纳光纤<sup>[6]</sup>具有倏逝场强、质量小等很多新颖的光学传输特性,将其应用于多波长锁模激光器中有助于改善激光器结构。2014年,Zhao 等<sup>[7]</sup>采用在微纳光纤表面光学沉积石墨烯的方法,在掺铒光纤环腔中,实现了双波长(1061.8 nm 和 1068.8 nm)的耗散孤子锁模。2016年,Wang 等<sup>[8]</sup>利用锥形光纤,在环形腔中实现了在 2 μm 波段的多波长锁模,但是其输出脉冲序列并不理想。微纳光纤环可以通过倏逝波耦合的方式制成谐振腔,这样能在激光腔内作为梳状滤波器,起到滤波效应,有效地解决掺铒光纤的均匀展宽问题,实现多波长锁模。另外,纳秒方波脉冲激光在光通信、光纤传感、激光加工和焊接等领域有着重要的应用<sup>[9-11]</sup>。

本文将微纳光纤环和锁模技术相结合,基于微纳光纤环的滤波和非线性光纤放大环镜的等效可饱和吸收,搭建了多波长锁模光纤激光器,产生了多波长锁模耗散孤子。所提出的基于微纳光纤环的多波长锁模光纤激光器思路新颖,不同于传统的梳状滤波器<sup>[12-14]</sup>,采用全光纤结构,令整个光纤激光器结构紧凑。实验通过增加抽运功率和调节偏振控制器,获得了双波长的纳秒级锁模脉冲。

## 2 实验装置

### 2.1 微纳光纤环的制备

微纳光纤环是由单模光纤火焰拉锥后扭曲制成的,微纳光纤环的结构如图 1(a)所示。图 1(b)是实验室自制微纳光纤环的光学显微镜照片,该环包含锥形光纤组成的圆环和扭曲区域两部分。在制作时,首先将一根普通单模光纤通过火焰拉锥法进行拉锥,拉锥后的光纤包括过渡区和锥腰两个部分。锥腰部分的直径是均匀的,而过渡区(连接锥腰部分和未拉伸部分)是非均匀的。然后将两端的未拉锥光纤固定住并进行多次扭曲,在制作过程中必须对光纤扭曲的足够紧,确保扭曲区域的横截面为哑铃状,如图 1(a)中插图。

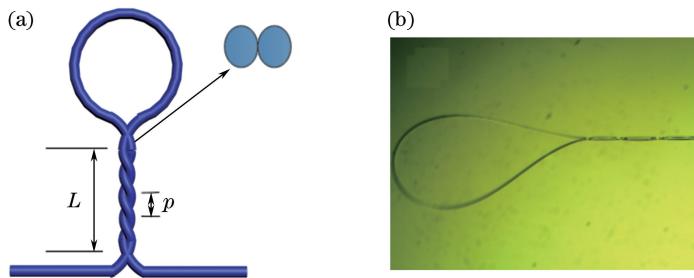


图 1 (a)微纳光纤环结构示意图;(b)实验室制作成的微纳光纤环的光学显微镜照片

Fig. 1 (a) Schematic of micro-fiber loop; (b) optical microscopy photo of fabricated micro-fiber loop

扭曲区域的哑铃状横截面为非圆形对称,可以产生双折射,当入射光通过该区域时会产生偏振分离。这是由于输入光在经过扭曲区域时被分为顺时针和逆时针传输的两束光,这两束光在传输时产生干涉。传输时的相位差为  $(2\pi/\lambda) \times B \times L$ ,  $\lambda$  为输入波长,  $L$  为扭曲区域的长度,  $B$  为扭曲区域的双折射系数。扭曲区域的长度为  $L = p \times N$ ,  $p$  为每个扭曲区域的长度,  $N$  为扭曲的圈数,所以相位差<sup>[15]</sup>可以进一步表示为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \times B \times p \times N. \quad (1)$$

不同波长的光经过双折射区域时的相位延迟不同,在输出端接上光谱仪时会出现干涉图样,干涉图样的自由光谱范围(FSR)可以通过计算得到。

微纳光纤环透射光谱可以表示为<sup>[15]</sup>

$$T \propto \left[ \cos \left( \frac{1}{2} \times \Delta\phi \right) \right]^2 = \left[ \cos \left( \frac{\pi \times B \times p \times N}{\lambda} \right) \right]^2, \quad (2)$$

从(2)式可以得到 FSR 为

$$F_{\text{FSR}} = \frac{1}{B \times p \times N} \times \lambda^2. \quad (3)$$

在实验中,为了得到较好的波长选择效果,所制成的拉锥光纤的锥腰部分直径约为  $8 \mu\text{m}$ ,长度约为  $30 \text{ mm}$ ,扭曲的圈数为 11,根据测得的 FSR 值反推扭曲区域双折射系数  $B$  约为  $1.6 \times 10^{-2}$ 。

### 2.2 实验装置

图 2(a)所示为测量微纳光纤环透射光谱的实验装置。通过使用宽带光源(FL-ASE-EB-D-2-2-FC/APC,深圳光波湖科技,深圳)向微纳光纤环中注入放大自发辐射(ASE),然后使用波长分辨率为  $0.02 \text{ nm}$  的光谱分析仪(OSA,AQ6370D,YOKOGAWA,日本)测量传输光谱。微纳光纤环直接测量所得透射谱减去宽带光源的光谱即可得到光纤环真实透射谱,测量结果如图 2(b)所示,从光谱中可以看出,微纳光纤环透射谱 FSR 约为  $10 \text{ nm}$ 。需要指出的是,所得微纳光纤环透射谱不是非常均匀,可能原因有两个:1)在拉锥光纤的拉制过程中引入了一定损耗,且扭曲区域对不同波长光的透射率存在一定的差异;2)在封装的过程中,用紫外胶固化时扭曲区域出现了松紧不均匀的问题,固化后紫外胶的张力也可能对扭曲区域传的输特性产生一些影响。不过,这些问题可以通过改进制作工艺、提高制作熟练度来解决。另外,正是由于实验室制作和使用的微纳光纤环都采用紫外胶固化方法进行了封装,因此保障了其波长稳定性。

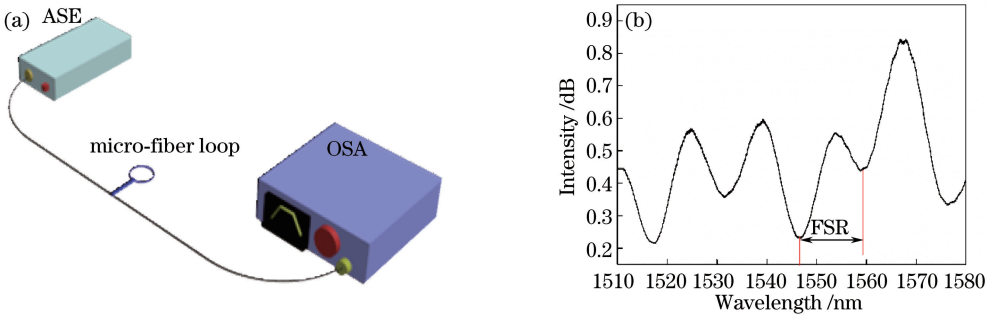


图 2 (a)测量微纳光纤环透射光谱的实验装置;(b)微纳光纤环的透射谱

Fig. 2 (a) Experimental setup for measuring the transmission spectrum of micro-fiber loop;  
(b) transmission spectrum of micro-fiber loop

多波长锁模光纤激光器的实验结构如图 3 所示。多波长锁模光纤激光器采用“8”字形激光腔,锁模机制是 NALM 的等效饱和和吸收作用,该腔分为左右两个环形腔,中间通过一个 50:50 的耦合器相连接。抽运源的中心波长为  $976 \text{ nm}$ ,最大输出功率为  $700 \text{ mW}$ ,通过一个  $980 \text{ nm}/1550 \text{ nm}$  波分复用器(WDM)耦合入左侧腔中的掺铒光纤(EDF)中,光纤长为  $65 \text{ cm}$ ;采用长为  $2800 \text{ m}$  的单模光纤(SMF)构成超长腔,用来增强非线性效应;偏振控制器(PC)用于调节左侧激光腔内光的偏振态;隔离器(ISO)用于保证光波在右侧的激光腔

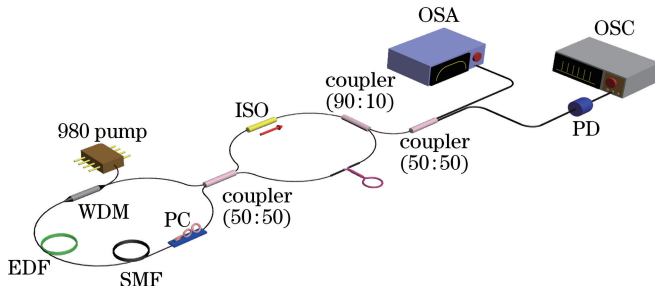


图 3 基于微纳光纤环多波长锁模光纤激光器实验装置示意图

Fig. 3 Setup for multiwavelength mode-locked fiber laser with micro-fiber loop

中单向传输;微纳光纤环加入右侧单向环,起到梳状滤波器的效果,并产生多波长锁模;90:10 的耦合器使得 90% 的光在腔内循环,另外 10% 的输出光用于测量。

采用光谱分析仪测量激光器的输出光谱,通过带有光电转换器(PD)的数字示波器(OSC, SDA 6000A, LeCroy, 美国)测量输出的脉冲。

### 3 实验结果与分析

当抽运功率为 210 mW 时,通过适当调节 PC,在示波器上能够看到稳定的锁模脉冲序列,输出的脉冲序列均匀、重复频率为 67 kHz、脉宽为 40 ns,如图 4(a)所示。同时可以在光谱分析仪上观测到双波长光谱,从图 4(b)中可以看出,双波长的中心波长分别在 1556.51 nm 和 1565.95 nm 处。

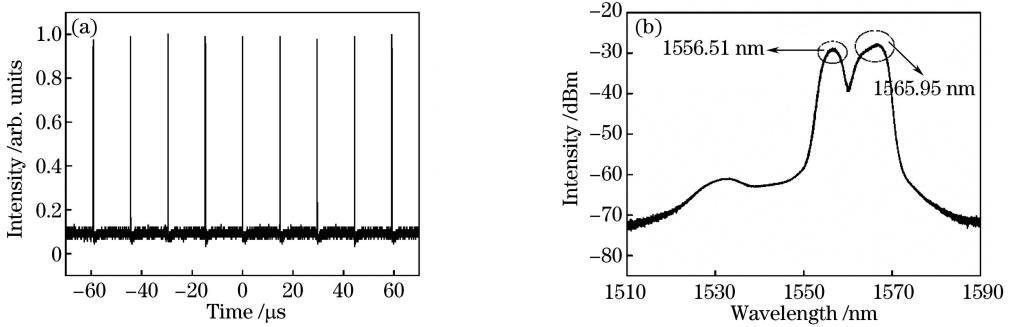


图 4 (a) 双波长锁模脉冲序列; (b) 双波长光谱

Fig. 4 (a) Dual-wavelength mode-locked pulse train; (b) dual-wavelength optical spectrum

由图 4 可知,激光器输出的两个波长间隔大概是 10 nm,与之前实验对微纳光纤环结构测得的透射谱 FSR 相吻合。为了验证微纳光纤环在激光器中的滤波作用,将其从激光腔中去除,但是锁模脉冲仍可以产生,图 5 所示为没有微纳光纤环的锁模激光器输出光谱,仅重复频率和脉冲宽度有一点差别。

根据耗散孤子理论,随着抽运功率的增加,矩形脉冲的脉宽逐渐变宽,但峰值功率保持恒定。实验观察发现多波长锁模激光器的阈值在 180 mW,当抽运功率大于阈值功率之后,适当调节 PC,示波器测量得到的锁模脉冲序列会很稳定。保持 PC 状态恒定,增加抽运功率,图 6 所示为锁模脉冲随抽运功率增加的展宽演化图,图 6 插图是脉冲宽度与抽运功率的关系图。从图 6 中能够明显发现,随着抽运功率的增加,输出矩形脉冲的脉宽也在增加。随着抽运功率从 240 mW 增加到 370 mW,脉宽从 55.7 ns 增加到 124 ns,脉冲能量达到 12.63 nJ。这与文献报道的耗散孤子脉冲(DSR)特性相吻合,并且相比较之前的报道,得到了更大的脉冲能量。由于微纳光纤环是由微纳光纤扭曲制成,存在着损耗较大的因素,所以本文实验结果局限于此,但是可以通过增加抽运功率和对微纳光纤环的进一步优化,来得到更高的脉冲能量。该激光器在实验室环境下能连续工作多个小时,并且隔天激光器还能自启动。

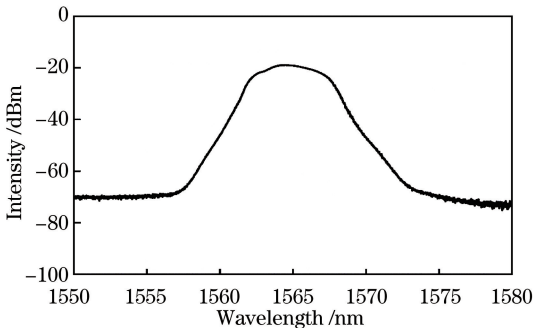


图 5 未有微纳光纤环时锁模光纤激光器输出光谱

Fig. 5 Output spectrum of mode-locked fiber laser without micro-fiber loop

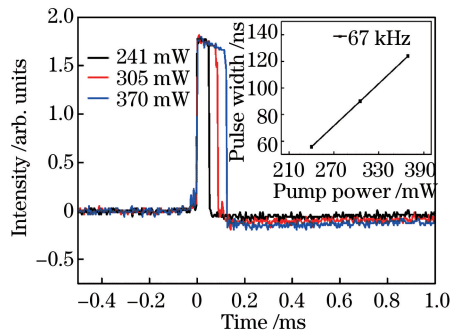


图 6 锁模脉冲随抽运功率增加的展宽演化图

Fig. 6 Mode-locked pulse evolution plots versus the pump power



## 4 结 论

报道了一种基于微纳光纤环滤波和非线性光纤放大环境锁模的多波长耗散孤子锁模光纤激光器,获得了双波长锁模脉冲输出。和已报道的多波长锁模光纤激光器不同之处在于,将微纳光纤环作为梳状滤波器加入NALM锁模激光腔中。由于微纳光纤环扭曲区域的双折射效应,使得不同波长的光在通过扭曲区域时会产生相位差,从而起到光纤滤波器的作用,并实现多波长锁模。与传统的梳状滤波器相比,微纳光纤环采用了全光纤结构,结构更加紧凑。为实现多波长锁模光纤激光器提供了另一种可行的方法,在光传感、光学测量、微波光子学、光信号处理、太赫兹波产生和波分复用光传输系统等领域都有着非常重要的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Boivin L, Wegmueller M, Nuss M C, *et al.* 110 channels  $\times$  2.35 Gb/s from a single femtosecond laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 11(4): 466-468.
- [2] Zhong Yihui, Zhang Zuxing, Tao Xiangyang. Research progress of passively mode-locked fiber laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(8): 46-51.  
钟义晖, 张祖兴, 陶向阳. 被动锁模光纤激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(08): 46-51.
- [3] Tu C, Guo W, Li Y, *et al.* Stable multiwavelength and passively mode-locked Yb-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. Optics Communications, 2007, 280(2): 448-452.
- [4] Graydon O, Loh W H, Laming R I, *et al.* Triple-frequency operation of an Er-doped twincore fiber loop laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(1): 63-65.
- [5] Xu Z W, Zhang Z X. All-normal-dispersion multi-wavelength dissipative soliton Yb-doped fiber laser[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 10(8): 085105.
- [6] Du Yao, Chen Zhe, Yu Jianhui, *et al.* All micro-fiber polarization filter based on evanescent field coupling[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0610002.  
杜 垚, 陈 哲, 余健辉, 等. 耦合型微纳光纤偏振滤波器研究[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0610002.
- [7] Zhao N, Liu M, Liu H, *et al.* Dual-wavelength rectangular pulse Yb-doped fiber laser using a microfiber-based graphene saturable absorber[J]. Optics Express. 2014, 22(9): 10906-10913.
- [8] Wang Y, Li J, Zhai B, *et al.* Tunable and switchable dual-wavelength mode-locked Tm<sup>3+</sup>-doped fiber laser based on a fiber taper[J]. Optics Express, 2016, 24(14): 15299.
- [9] 徐 佳, 吴思达, 王 璞, 等. 高脉冲能量、纳秒级石墨烯被动锁模掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603013.
- [10] Yang Tieshan, Wang Xiuhong, Sun Ruoyu, *et al.* Ytterbium-doped nanosecond-pulsed all-fiber laser based on dissipative soliton resonance and its frequency-doubling[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0302006.  
杨铁山, 王秀红, 孙若愚, 等. 基于耗散孤子共振的纳秒脉冲掺镱全光纤激光器及其倍频[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0302006.
- [11] Zou Feng, Wang Zhaokun, Wang Ziwei, *et al.* Gigahertz narrow-linewidth high-peak power nanosecond fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(7): 0701001.  
邹 峰, 王兆坤, 王子薇, 等. 吉赫兹级窄线宽、高峰值功率纳秒光纤激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0701001.
- [12] Yun L, Liu X, Mao D. Observation of dual-wavelength dissipative solitons in a figure-eight erbium-doped fiber laser [J]. Optics Express, 2012, 20(19): 20992-20997.
- [13] Jin X, Wang X, Wang X, *et al.* Tunable multiwavelength mode-locked Tm/Ho-doped fiber laser based on a nonlinear amplified loop mirror[J]. Applied Optics, 2015, 54(28): 8260-8264.
- [14] Li H, Zhao J, Yan P, *et al.* Tunable and switchable multi-wavelength dissipative soliton generation in a graphene oxide mode-locked Yb-doped fiber laser[J]. Optics Express, 2014, 22(10): 11417-11426.
- [15] Han C, Ding H, X Li, *et al.* Temperature insensitive refractive index sensor based on single-mode micro-fiber Sagnac loop interferometer[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(18): 181906.