

文章编号: 0253-2239(2010)s100307

29.69 MHz 全光纤被动锁模激光器实验

沈世奎 左 林 杨爱英* 宁春梅 孙雨南

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 全光采样实验中选用飞秒光纤激光器作为采样脉冲源, 用性能稳定的 976 nm 激光器作为抽运光源, 利用非线性偏振旋转效应等效可饱和吸收体作为锁模器件, 通过调节全光纤在线偏振控制器实现了自由运转被动锁模的掺铒环形腔飞秒光纤激光器, 在抽运功率为 176 mW 时, 激光器输出脉冲的重复频率为 29.69 MHz, 光谱谱宽 16.8 nm, 输出脉冲的平均功率可达 8.1 mW。该激光器简单稳定, 其全光纤环形腔结构更有利于小型化, 方便使用。

关键词 激光器; 全光采样; 飞秒脉冲; 全光纤环形腔; 非线性偏振旋转; 被动锁模掺铒光纤激光器

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100307

Experiment of 29.69 MHz All-Fiber Passively Mode-Locked Laser

Shen Shikui Zuo Lin Yang Aiyang Ning Chunmei Sun Yunan

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract All-optical sampling needs femtosecond fiber laser as sampling pulse source. A passively mode-locked erbium-doped femtosecond fiber laser, pumped by 976 nm laser diode, using nonlinear polarization rotation mode-locking mechanism and inline polarization controllers is reported. At pump power of 176 mW, average output power is about 8.1 mW, with 29.69 MHz repetition rate and 16.8 nm spectrum width. The laser is easily mode-locked and stable. All-fiber ring cavity construction makes it compactable and convenient.

Key words lasers; all-optical sampling; femto-second pulse; all-fiber ring cavity; nonlinear polarization rotation; passive mode-locked erbium-doped fiber laser

OCIS codes 060.0060; 060.3510; 060.2380; 140.3510

1 引 言

近年来, 光纤飞秒激光器以其稳定、体积小、便携和易实现等优点越来越受关注, 研究人员在理论和实验上都做了很多工作, 以实现符合需要的窄脉宽光纤激光器。K. Tamura 等^[1]在 1993 年就报道了脉冲宽度为 77 fs 的飞秒激光器, 2006 年赵德双等^[2]报道了自起振锁模抽运阈值为 11.5 mW, 光谱宽度为 7.6 nm, 重复频率为 14.0 MHz 的全光纤结构锁模激光器。2007 年 D. Y. Tang 等^[3]报道了光谱宽度为 61.3 nm, 半峰全宽为 46.2 fs 的超窄脉冲激光器, 重复频率为 38.3 MHz, 平均输出功率

为 79.9 mW。Jian Chen 等^[4]报道了基本重复频率为 194 MHz 的高重复频率锁模输出, 且重复频率可从 74 MHz 变化到 194 MHz。2008 年李婧等^[5]报道了重复频率为 101.94 MHz, 平均输出功率为 34 mW 的飞秒锁模脉冲输出。邓定桓等^[6]报道了光谱宽度为 53 nm, 脉冲宽度为 75 fs, 重复频率为 25.9 MHz 的全光纤结构的被动锁模激光器。其中文献^[3~5]都采用准直镜、波片和偏振分束器等空间光学器件, 文献^[2]和^[6]采用全光纤环结构, 比较发现, 采用空间光器件的锁模激光器重复频率要高于采用全光纤器件的重复频率, 而全光纤结构的激

收稿日期: 2010-09-09; 收到修改稿日期: 2010-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(60777024, 60978007)资助课题。

作者简介: 沈世奎(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光性能监测方面的研究。E-mail: ssk_01@bit.edu.cn

导师简介: 孙雨南(1946—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信、高速光信号处理、集成光学和非线性光学等方面的研究。E-mail: syn@bit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yangaiying@bit.edu.cn

光器更紧凑,方便使用,稳定性更好。

作为实验室的全光采样实验研究^[7,8]所需的脉冲采样源,飞秒激光器的性能至关重要,直接影响着全光采样的效果,我们之前实现了采用光纤连接器的光纤环锁模实验,得到了重复频率为 6.028 MHz 的脉冲序列输出,其光谱的中心波长为 1570.3 nm,光谱宽度为 33.2 nm,输出平均功率 1.07 mW,傅里叶变换受限输出脉冲宽度为 78 fs。本文在此基础上,改进了光纤环结构,通过光纤熔接制作了全光纤结构的锁模激光器,调节腔内偏振控制器实现了被动锁模窄脉冲输出,最大输出平均功率大于 16 mW,自起振阈值 145 mW,重复频率为 29.69 MHz,光谱的带宽达到 16.8 nm。

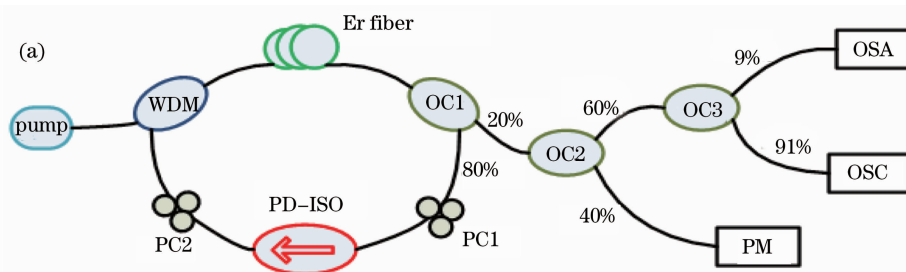
2 实验原理和装置

被动锁模光纤环形腔激光器的原理结构如图 1(a)所示,抽运光经 980/1550 的波分复用器(WDM)耦合进环形腔,经过高掺杂掺铒光纤,再经耦合器 OC1,其中 20%作为输出,80%在腔内继续传输,两偏振控制器(PC1 和 PC2)以及偏振相关隔离器(PD-ISO)构成等效可饱和吸收体作为锁模器件,组成环形腔激光器。

利用非线性偏振旋转(NPR)效应实现被动锁

模的基本原理是通过 PD-ISO 后的线偏光经偏振控制器(PC2)后变成椭圆偏振光,椭圆偏振光幅值不同的两个正交分量经掺铒光纤得到增益放大,并受到腔内光纤自相位调制和交叉相位调制的作用产生不同的非线性相移,从而使偏振态发生变化。调节另一偏振控制器(PC1)使偏振隔离器能透过脉冲中央的高强度部分而阻挡低强度的边缘,形成等效可饱和吸收体;脉冲经多次循环,中央逐渐窄化,边缘逐渐被衰减,最终实现稳定锁模窄脉冲输出。

实验中光纤环结构如图 1(b)所示,选择 CorActive 公司的 L1500 掺铒光纤作为环形腔腔内的增益介质,抽运激光器(Oclaro 公司,LC96A7-20R)的最大输出功率为 400 mW,中心波长为 976 nm,采用前向抽运方式。两个手动挤压式偏振控制器[General Photonic 公司,PLC-003-S-25 型,图 1(c)为放大图]直接夹持在 PD-ISO 的尾纤上,控制腔内传输脉冲的偏振态,输出经 OC2 和 OC3 分束后分别进入光谱仪 OSA(中国电子科技集团公司第四十一研究所,AV6362),功率计 PM 和示波器 OSC(Tektronix TDS3032B,300 MHz 带宽,2.5 Gs/s 以及 YOKOGAWA DL6104,1 GHz 带宽,5 Gs/s),其中示波器前有光电探测器,测得相应的光谱结构、平均功率和时间序列图。



Er fiber: Er-doped fiber; WDM: 980/1550 Mux; OC: optical coupler;
PC: polarization controller; PD-ISO: polarization-dependent isolator;
OAS: optical spectrum analyzer; OSC: oscilloscope; PM: optical-power meter

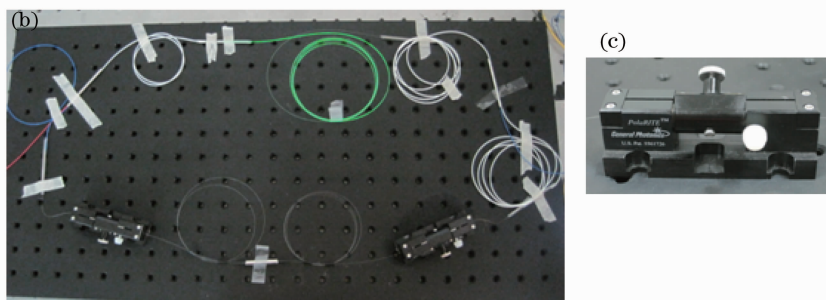


图 1 NPR 环形腔飞秒激光器。(a)原理图,(b)实验装置图,(c)偏振控制放大图

Fig.1 NPR femtosecond ring cavity laser. (a) schematic diagram, (b)experimental setup, (c) detail of GP PLC-003 drop-in polarization controller

3 实验结果和讨论

被动锁模激光器输出脉冲的重复频率与腔长是成反比的,所需重复频率越高,腔长则需越短。为获得更高的重复频率,实验中掺铒光纤长度为2 m,由重复频率29.69 MHz可计算得光纤环的总长度为6.74 m,则环内器件的尾纤总长为4.74 m。掺铒光纤L1500在1550 nm波长的色散参数为 $-20.9 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,群速度色散(GVD)约为 $0.0266 \text{ ps}^2/\text{m}$,则总累积正色散为 0.0532 ps^2 ,而腔中其它光纤器件及尾纤则是由普通单模光纤构成,包括输出耦合器的尾纤、偏振相关隔离器的尾纤以及波分复用器的尾纤,工作在反常色散区,具有负的GVD系数,色散参数为 $18 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,群速度色散约为 $-0.023 \text{ ps}^2/\text{m}$,累积总负色散为 -0.10902 ps^2 ,总色散为 -0.05582 ps^2 ,则腔内平均GVD系数为 $-0.008282 \text{ ps}^2/\text{m}$ 。通过仿真分析了不同GVD系数下脉冲宽度的变化情况,从仿真曲线可以看出,在GVD系数为负,大约在 $-0.01 \text{ ps}^2/\text{m}$ 时,脉冲宽度最窄,曲线跟文献[9]中对色散和脉冲宽度的仿真相吻合。有前面计算可知,本实验中的光纤环环内GVD正好接近仿真中的最佳群速度色散值。

逐渐增大抽运激光器的驱动电流,当抽运功率增大到176 mW时,调节偏振控制器,实现锁模输出,此时输出平均功率为8.1 mW,在示波器上观察到的锁模脉冲序列如图2所示,从图中可以看出其脉冲间隔稳定,形状相同,表示其锁模情况良好,同时从示波器上可直接读出脉冲重复频率为29.69 MHz。脉冲一旦形成,如果没有扰动,锁模激光器可以在光学平台上稳定工作很长时间,长达几个小时其在示波器屏幕上的脉冲形状都保持不变。

光谱仪上的光谱结构如图3所示,中心波长为1555.5 nm,3 dB宽度为16.8 nm,光谱具有较小的边模,由于实验条件的限制,无法对锁模脉冲宽度进

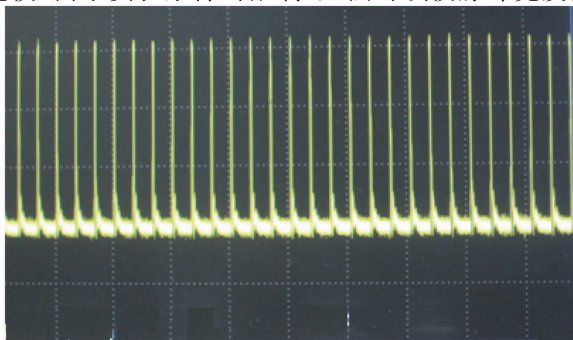


图2 示波器显示的环形腔输出脉冲序列
Fig. 2 Pulse train of the output pulses from the ring cavity in oscilloscope

行自相关测量,因此,在脉冲为双曲正割型函数的假设条件下,由近似傅里叶变换极限可知其最窄脉冲宽度约151 fs。由于测量飞秒脉冲宽度的二次谐波法自相关仪仍在搭建中,不能直接测量输出脉冲的时域宽度,只能通过光谱宽度推算,实际系统中由于啁啾等影响,输出脉冲的实际宽度要大于傅里叶变换极限宽度,在后面的测量中,还需通过自相关仪直接测量脉宽。

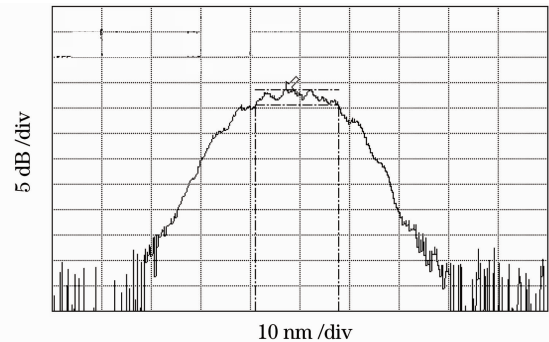


图3 环形腔输出光谱结构图

Fig. 3 Spectrum of the output pulse from the ring cavity

保持偏振控制器状态不变,降低抽运功率,仍然可以保持锁模状态,当抽运功率降低到67 mW时,出现失锁,重新再增大抽运功率,在抽运功率为145 mW时又出现锁模,说明光纤环锁模激光器存在最低阈值功率,对比其他文献报道的锁模实验,文献[6]中阈值为80 mW,文献[2]中报道的阈值为11.5 mW,发现光纤环的自起振阈值较高,可能是因为光纤环在熔接过程中的损耗较大,腔内总损耗比较大,所以在后续工作中要减小损耗,从而减低自起振阈值。增大抽运功率,锁模输出的平均功率随之增大,呈线性关系,如图4所示,在抽运功率增大到362.3 mW时,锁模输出平均功率为16.1 mW。从图中可以看出,该锁模激光器的效率不高,斜率效率大约在5%,低于文献

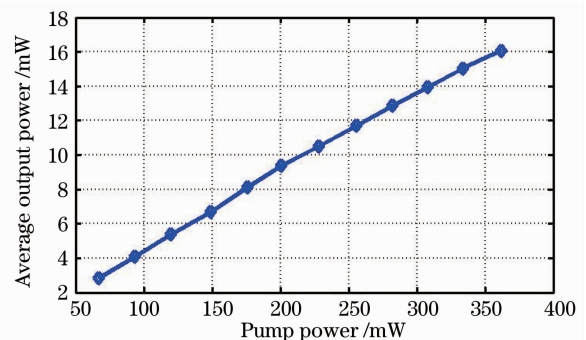
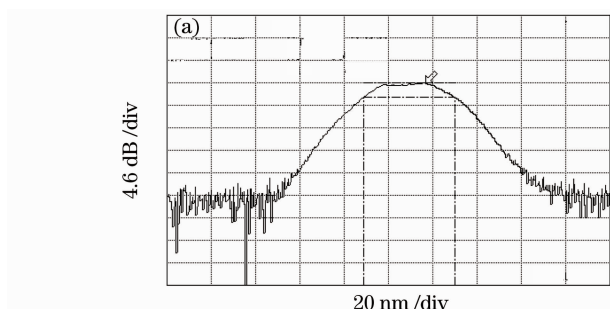


图4 锁模平均输出功率与抽运光功率的关系图
Fig. 4 Mode-locked average output power versus input pump power

[6]中的转换效率。可能原因是抽运激光器的功率未能完全利用,因为抽运激光器与光纤环中 WDM 间的法兰盘连接,WDM 输出端和掺铒光纤间的熔接,都有可能损失抽运功率,造成激光器的效率低。

保持抽运功率在 176 mW,调节偏振控制,还可以实现其它状态的锁模输出,如图 5 所示,由于总环长不变,重复频率不变,光谱结构发生改变,3 dB 宽度更宽,达 41.2 nm,中心波长为 1574.8 nm,但是输出序列的幅度均匀性不好,比图 2 中的序列均匀性差,此时的平均输出功率改变为 9.8 mW。原因



在于偏振控制器和隔离器构成了等效的可饱和吸收体,作为环内的锁模器件,不同的偏振态组合,就构成了不同的可饱和吸收体,对环内循环叠加的光脉冲的吸收也不同,最终锁模输出的中心波长不同,平均功率也不相同。

此时降低抽运功率,依然保持稳定锁模输出,在抽运功率降低到 103.6 mW 时,光谱结构变化不大,但是示波器上的输出序列发生变化,产生了多个不同形状的序列共存,且多个序列之间相互转换,无法实现稳定的锁模输出,如图 6 所示^[6,10]。

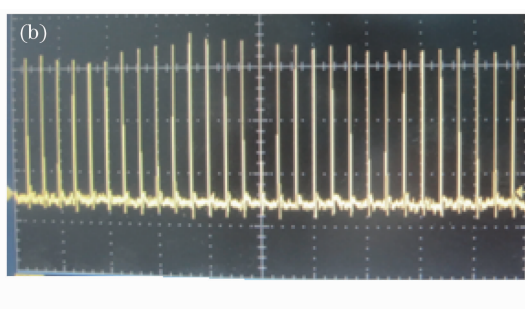


图 5 不同偏振态下的锁模输出。(a)光谱,(b)序列图

Fig. 5 Output mode-locked pulse under different polarizations. (a) spectrum, (b) pulse train

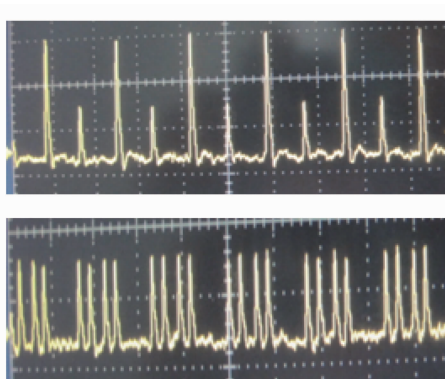
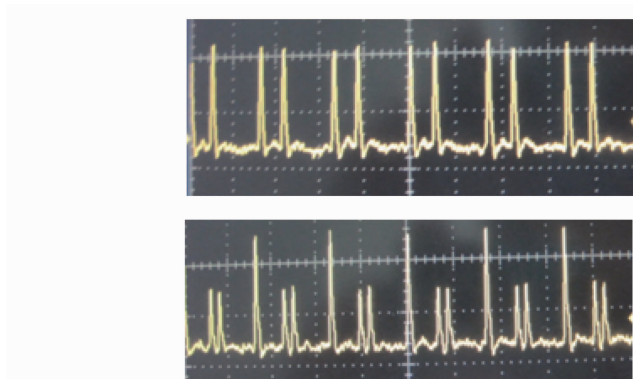


图 6 不同形状的输出序列

Fig. 6 Different pulse trains

4 结 论

利用非线性偏振旋转效应在掺铒光纤环形激光器中实现了稳定锁模的超窄脉冲输出,得到了重复频率为 29.69 MHz,光谱宽度为 16.8 nm,傅里叶变换极限宽度为 151 fs,平均输出功率为 8.1 mW 的飞秒脉冲。实验中发现,增大抽运功率,最大平均输出功率可达 16.1 mW;同时偏振控制器的状态不同,得到的锁模输出也不同。接下来将依据实验结果进行相应分析,继续改进光纤环结构,降低腔长,从而提高重复频率,提高平均输出功率,增大转换效率,降低光纤环形腔的自起振阈值功率,并能用自相

关仪测出脉冲的实际宽度。利用该锁模脉冲激光器进行初步全光采样实验研究,根据实验结果进一步完善该脉冲源,最终实现能够满足全光采样实验所需性能要求的采样脉冲源。

参 考 文 献

- 1 K. Tamura, E. P. Ippen, H. A. Haus *et al.*. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(13): 1080~1082
- 2 Zhao Deshuang, Liu Yongzhi, Wang Bingzhong *et al.*. Femtosecond passively mode-locked Er³⁺-doped fiber ring laser [J]. *J. Appl. Opt.*, 2006, **27**(3): 220~224
赵德双,刘永智,王秉中等. 飞秒被动锁模环形腔掺 Er³⁺ 光纤激光器[J]. *应用光学*, 2006, **27**(3): 220~224
- 3 D. Y. Tang, L. M. Zhao. Generation of 47-fs pulses directly

- from an erbium-doped fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(1): 41~43
- 4 Jian Chen, Jason W. Sickler, Erich P. Ippen *et al.*. High repetition rate, low jitter, low intensity noise, fundamentally mode-locked 167 fs soliton Er-fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(11): 1566~1568
- 5 Li Jing, Dai Yongheng, Zhang Zhigang. High repetition rate passively mode-locked erbium-doped fiber laser [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(5): 706~708
- 6 Deng Dinghuan, Zhan Li, Xia Yuxing. 75-femtosecond all-fiber ultrashort pulse laser[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(13): 1937~1940
- 7 Liu Maotong, Yang Aiyong, Sun Yu'nan. Software-synchronized optical sampling based on PPLN waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s): 283~288
- 刘茂桐, 杨爱英, 孙雨南. 基于周期极化铌酸锂波导的软件同步光采样[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s): 283~288
- 8 Yang Aiyong, Wu Xiangyu, Sun Yu'nan. Robustness estimation of software-synchronized all-optical sampling for fiber communication systems [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(3): 194~197
- 9 Gao Weiqing, Xu Lixin, Ming Hai *et al.*. Theoretical analysis of passively mode-locked erbium-doped fiber laser with positive dispersion cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 82~86
- 高伟清, 许立新, 明海等. 正色散腔被动锁模掺铒光纤激光器的理论分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 82~86
- 10 L. M. Zhao, D. Y. Tang, T. H. Cheng *et al.*. Generation of multiple gain-guided solitons in a fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(11): 1581~1583