

高重复频率全光纤被动锁模掺铒光纤激光器

窦志远 田金荣 李克轩 于振华 胡梦婷 霍明超 宋晏蓉

High-repetition-rate passively mode-locked erbium-doped all fiber laser

Dou Zhi-Yuan Tian Jin-Rong Li Ke-Xuan Yu Zhen-Hua Hu Meng-Ting Huo Ming-Chao Song Yan-Rong

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 064206 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.064206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[780W 全光纤窄线宽光纤激光器](#)

[780 W narrow linewidth all fiber laser](#)

物理学报.2014, 63(13): 134205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134205>

[掺铒光纤环形激光器中饱和吸收光栅瞬态特性引发跳模的实验研究](#)

[Experimental study on mode hopping triggered by transient characteristics of saturable absorber gratings in Er-doped fiber ring lasers](#)

物理学报.2014, 63(13): 134206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134206>

[氧化石墨烯被动锁模掺铒光纤激光器多脉冲现象的实验研究](#)

[Experimental studies of multiple pulses in a passively ytterbium-doped fiber laser based on graphene-oxide saturable absorber](#)

物理学报.2014, 63(8): 084202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.084202>

[147 fs 碳纳米管倏逝场锁模全光纤掺铒光纤激光器](#)

[A 147 fs mode-locked erbium-doped fiber laser with a carbon nanotubes saturable absorber in evanescent field](#)

物理学报.2014, 63(3): 034202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034202>

[脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮等离子体特性研究](#)

[Plasma characterization studies of laser dressing for bronze-bonded diamond wheel by a pulsed fiber laser](#)

物理学报.2013, 62(14): 144204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144204>

高重复频率全光纤被动锁模掺铒光纤激光器*

窦志远¹⁾ 田金荣¹⁾ 李克轩¹⁾²⁾ 于振华³⁾ 胡梦婷¹⁾
霍明超¹⁾ 宋晏蓉^{1)†}

1) (北京工业大学, 微纳信息光子技术研究所, 应用数理学院, 北京 100124)

2) (中国人民武装警察部队学院, 廊坊 065000)

3) (天津市现代激光光学技术研究院, 天津 300190)

(2014年8月9日收到; 2014年10月13日收到修改稿)

报道了一种高重复频率全光纤非线性偏振旋转锁模掺铒光纤激光器, 获得了重复频率 217 MHz 的锁模脉冲输出. 该激光器使用一个偏振相关隔离器和一个偏振控制器即可获得稳定的锁模脉冲输出, 结构简单, 系统稳定. 激光器锁模脉冲的脉冲宽度为 69 fs, 3 dB 光谱宽度为 56 nm, 射频频谱信噪比为 76 dB.

关键词: 掺铒光纤, 全光纤激光器, 高重复频率, 锁模

PACS: 42.55.Wd, 42.65.Re

DOI: 10.7498/aps.64.064206

1 引言

锁模光纤激光器既具有转换效率高、散热性能良好、结构紧凑、价格低廉的优点, 又可以获得皮秒或飞秒量级的超短脉冲, 在光通信、军事、光检测、医疗等研究领域^[1,2]有广泛的应用, 是激光技术领域^[3,4]的研究热点之一. 重复频率是锁模光纤激光器的主要技术指标之一, 高重复频率的光纤激光器是超精密光谱学(光学频率梳)和微波光子学等领域的关键器件, 最佳重复频率需要达到 200 MHz 以上. 目前有多种方式可以在光纤激光器中实现锁模, 例如采用半导体可饱和吸收镜^[5,6]、碳纳米管、石墨烯、氧化石墨烯、拓扑绝缘体和二硫化钼等材料类可饱和吸收体^[7-13]. 也可利用非线性干涉光纤环形镜实现锁模^[14-16], 但锁模脉冲的重复频率约为几十 MHz 量级. 目前有两种方式可以实现较高的重复频率, 一种是被动谐波锁模^[17,18], 这种方式的基频重复频率比较低, 通过脉冲分裂来实现较高的重复频率. 另一种是缩短腔长来提高基

频^[19,20], 但是由于受到光纤长度的限制, 光纤激光器的重复频率难以大幅度提高. 文献^[19]报道了基频为 1 GHz 的掺铒光纤激光器, 是在环形腔结构的光纤激光器中实现的最高基频重复频率. 文献^[20]报道了一种非线性偏振旋转锁模(NPR)掺铒光纤激光器, 实现了 464 MHz 的基频输出. 但该激光器采用分立器件的结构, 通常需要多个波片和偏振分束棱镜, 这样会导致腔结构复杂并增加不稳定性. 全光纤结构的 NPR 锁模光纤激光器只需要一个偏振相关隔离器和两个偏振控制器, 结构简单, 系统稳定^[21,22].

本文利用一个偏振相关隔离器和一个偏振控制器在全光纤掺铒光纤激光器中实现了 NPR 锁模, 获得了波长 1.55 μm 、重复频率约为 217 MHz 的脉冲输出, 脉冲宽度 69 fs、光谱 3 dB 带宽 56 nm、信噪比 76 dB. 由于没有空间分立器件, 系统具有良好的稳定性. 据我们所知, 此激光器是采用全光纤非线性偏振旋转锁模方式获得的基频重复频率最高的掺铒光纤激光器.

* 国家自然科学基金(批准号: 61177047)和国家自然科学基金重点项目(批准号: 61235010)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yrsong@bjut.edu.cn

2 实验装置

全光纤锁模掺铒光纤激光器装置如图1所示. 抽运源为980 nm单模半导体激光器, 最大输出功率为545 mW. 抽运光通过波分复用器(WDM)注入掺铒光纤. WDM尾纤为OFS-980型光纤, 其二阶色散为 $4.5 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$, 长度约为0.16 m. 掺铒光纤(Er-110-4/125, Liekki)的长度约为0.35 m, 在980 nm处吸收系数为 $61 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$, 在1560 nm处色散参量为 $-10 \text{ fs} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. 增益光纤吸收效率较高, 相应的长度较短, 可获得更高的重复频率. 实验中采用后向抽运方式, 相对于前向抽运方式, 一定程度上可以减小非线性相移的累积. 输出耦合器(OC)的输出率为20%, 偏振相关隔离器(PDI)使腔内的激光单向运转. 由于PDI自身有起偏及检偏的作用, 所以一个PDI和一个偏振控制器(PC)即可实现NPR锁模. 腔内其余光纤皆为SMF-28单模光纤, 二阶色散为 $-22.8 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$. 激光器总腔长约为0.96 m, 净二阶色散量约为 -0.0048 ps^2 , 因此输出脉冲带有部分负色散, 需要色散补偿. 实验中采用色散位移光纤进行色散补偿, 以获得最短的脉冲输出.

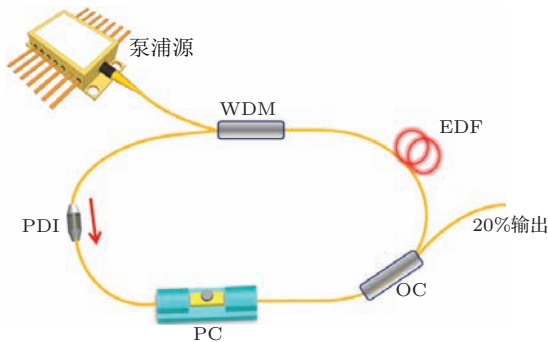


图1 (网刊彩色) 全光纤掺铒光纤激光器结构示意图

3 实验结果与分析

实验中提高抽运功率的同时精细调节偏振控制器, 当抽运功率为45 mW时, 开始出现连续激光输出. 当抽运功率增加到346 mW时, 激光器可以实现自启动锁模. 当抽运功率为545 mW时, 锁模平均功率为24 mW. 锁模状态在不受外界强烈的干扰下, 可以稳定工作24 h.

图2为抽运功率为545 mW时采用示波器(Infiniium 54833A, Agilent)测得的脉冲序列, 时间间隔约为4.62 ns, 对应的重复频率约为216.87 MHz. 锁模为连续锁模, 幅度调制非常小. 显示了脉冲能量良好的稳定性.

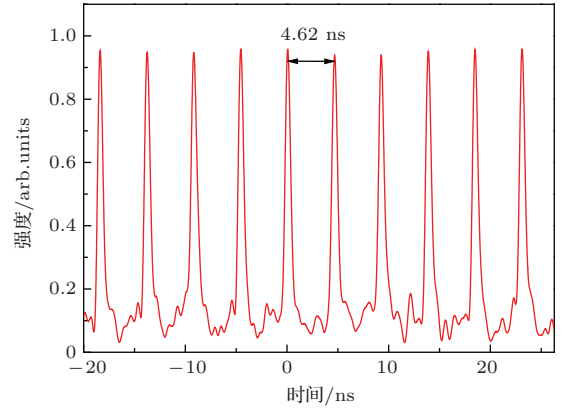


图2 锁模脉冲序列

实验中采用频谱分析仪(E4447A, Agilent)测量了锁模脉冲的频谱, 结果如图3所示. 可以确认锁模脉冲的重复频率约为216.87 MHz, 信噪比约为76 dB. 此为全光纤非线性偏振旋转锁模结构获得的最高基频重复频率. 图3内插图显示为4 GHz范围内的射频频谱, 分辨率设置为1 kHz, 从中可以看出脉冲时序非常稳定.

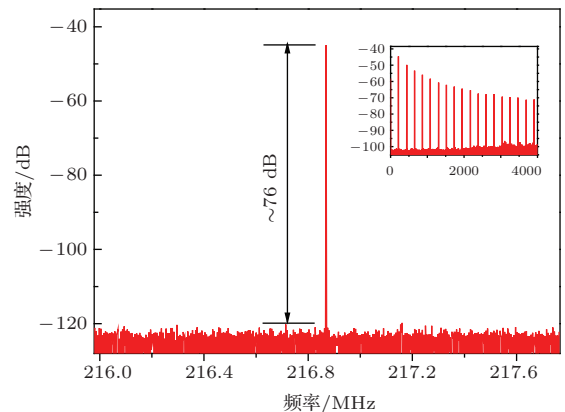


图3 (网刊彩色) 锁模脉冲的射频频谱

实验中通过改变SMF-28单模光纤的长度, 可以改变激光器的腔长, 以获得不同重复频率的锁模脉冲输出. 采用光谱分析仪(AQ6317B, Ando)对腔长分别为1.15, 1.05, 0.96 m时的锁模脉冲光谱进行了测量, 对应的重复频率分别为180.62, 198.98, 216.87 MHz, 结果如图4所示. 可以看到三种腔长

下对应光谱的 3 dB 带宽分别为 35, 39, 56 nm. 在腔长分别为 1.15, 1.05 m 时, 光谱有着明显的 Kelly 边带. 腔长为 1.05 m 对应的孤子边带比腔长为 1.15 m 的更弱; 当腔长为 0.96 m 时, 已经基本观察不到孤子边带. 腔长越短, 腔内净二阶色散量更加接近于零, 脉冲演化趋向于展宽脉冲形式, 所以孤子边带会逐渐消失, 这与近年的研究结果一致^[23]. 可以看到, 腔长为 0.96 m 时, 中心波长在 1570 nm 附近, 3 dB 带宽约为 56 nm, 在 sech^2 脉冲近似下, 支持约 46.2 fs 的脉冲宽度.

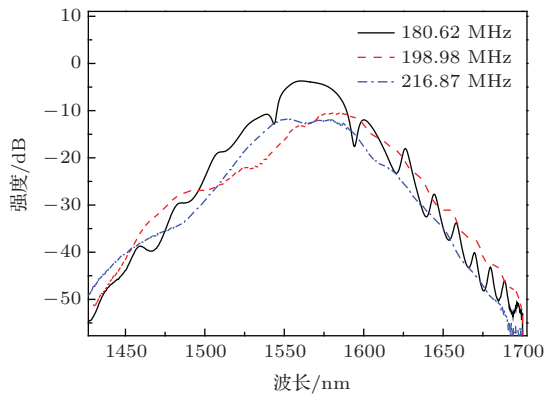


图4 (网刊彩色) 锁模脉冲的光谱

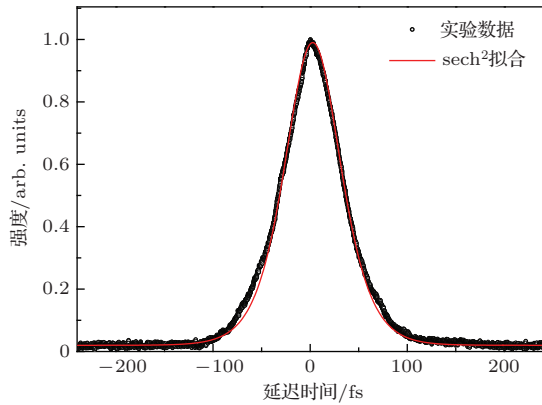


图5 (网刊彩色) 锁模脉冲自相关

由于有残余色散, 实验中采用长为 28.5 cm、色散参量为 $-38 \text{ fs}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 的色散位移光纤对输出激光色散补偿, 并采用自相关仪 (FR-103XL, Femtochrome) 对补偿后的锁模脉冲进行了自相关测量, 图 5 为实验结果. 可以看出锁模脉冲的脉冲宽度约为 69 fs. 计算得到脉冲的时间带宽积为 0.47, 大于傅里叶变换极限, 说明脉冲中仍含有少量啁啾. 实验中对腔外的色散补偿光纤做了细调, 仍然无法将脉冲压缩到更短. 我们认为这是由于腔

内的高阶非线性效应以及高阶色散导致脉冲难以进一步压缩.

图 6 为抽运功率和输出功率 (色散补偿后) 的关系曲线. 在连续光变为锁模时, 输出功率有一个跃升. 由于色散补偿光纤引入了较大的损耗, 最大平均输出功率为 11.2 mW, 对应单脉冲能量为 51.6 pJ, 峰值功率为 748 W.

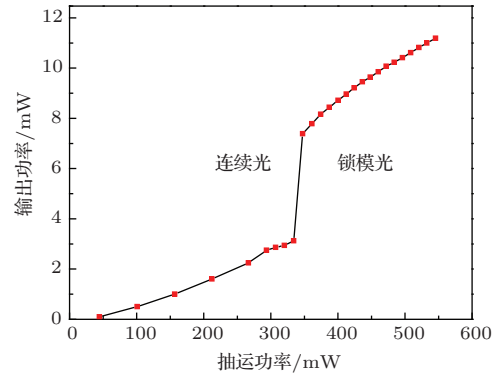


图6 输出功率随抽运功率的变化

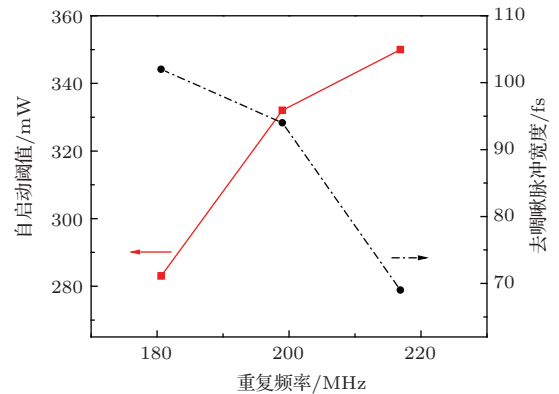


图7 激光器自启动阈值和去啁啾脉冲宽度随激光器重复频率的变化

在实验中通过剪裁 SMF-28 单模光纤的长度, 改变激光器的腔长, 获得了不同重复频率的锁模脉冲输出, 并对不同重复频率下的锁模自启动阈值及去啁啾脉冲宽度进行了测量, 结果如图 7 所示. 可以看出, 随着重复频率的升高 (对应腔长缩短), 锁模自启动阈值在升高. 这是由于 NPR 锁模机理造成的. 随着腔长的缩短, 脉冲经过的光纤长度减少, 非线性效应减少, 同一脉冲前后沿和中心部分的偏振变化量减弱, 检偏器无法有效地衰减脉冲前后沿, 锁模无法形成; 此时需要通过增加抽运, 提升腔内的功率, 增强双折射效应, 使得脉冲前后沿和中心偏振差异足够大, 从而检偏器就可以很好地切

掉脉冲前后沿, 实现锁模脉冲输出. 所以腔长越短, 自启动阈值越高. 实验中设定腔外色散补偿光纤长度一定, 因此随着腔长减小, 腔内总二阶色散量减小, 光谱变宽, 输出脉冲宽度变窄.

4 结 论

本文报道了一种结构简单的 NPR 锁模全光纤掺铒光纤激光器, 实现了基频最高约为 217 MHz 高重复频率的稳定锁模输出, 经过色散补偿后, 可以获得最窄脉冲宽度为 69 fs, 射频频谱信噪比为 76 dB 的飞秒脉冲. 通过减短腔长, 可获得更宽的光谱、更窄的脉宽, 但自启动阈值也越高. 据我们所知, 此激光器是采用 NPR 锁模获得的基频重复频率最高的全光纤掺铒光纤激光器.

参考文献

- [1] Qin P, Chen W, Song Y J, Hu M L, Chai L, Wang Q Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 240601 (in Chinese) [秦鹏, 陈伟, 宋有建, 胡明列, 柴路, 王清月 2012 物理学报 **61** 240601]
- [2] Fermann M E, Hartl I 2013 *Nature Photon.* **7** 868
- [3] Zhang X, Song Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 064204
- [4] Dou Z Y, Song Y R, Tian J R, Liu J H, Yu Z H, Fang X H 2014 *Opt. Express* **22** 24055
- [5] Luo Z C, Luo A P, Xu W C 2011 *IEEE Photon. J.* **3** 64
- [6] Tang D Y, Zhang H, Zhao L M, Wu X 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 153904
- [7] Dong X Z, Yu Z H, Tian J R, Li Y L, Dou Z Y, Hu M T, Song Y R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 034202 (in Chinese) [董信征, 于振华, 田金荣, 李彦林, 窦志远, 胡梦婷, 宋晏蓉 2014 物理学报 **63** 034202]
- [8] Sun Z, Rozhin A G, Wang F, Hasan T, Popa D, O'Neill W, Ferrari A C 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 253102
- [9] Yu Z H, Wang Y G, Zhang X, Dong X Z, Tian J R, Song Y R 2014 *Laser Phys.* **24** 015105
- [10] Li H P, Xia H D, Wang Z G, Zhang X X, Chen Y F, Zhang S J, Tang X G, Liu Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 024209
- [11] Yu Z H, Song Y R, Tian J R, Dou Z Y, Guoyu H Y, Li K X, Li H W, Zhang X P 2014 *Opt. Express* **22** 11508
- [12] Huang S S, Wang Y G, Li H Q, Lin R Y, Yan P G 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 084202 (in Chinese) [黄诗盛, 王勇刚, 李会权, 林荣勇, 闫培光 2014 物理学报 **63** 084202]
- [13] Xia H D, Li H P, Lan C Y, Li C, Zhang X X, Zhang S J, Liu Y 2014 *Opt. Express* **22** 17341
- [14] Liu X S, Zhan L, Luo S Y, Gu Z C, Liu J M, Wang Y X, Shen Q S 2012 *Opt. Express* **20** 7088
- [15] Ning Q Y, Liu H, Zheng X W, Yu W, Luo A P, Huang X G, Luo Z C, Xu W C, Xu S H, Yang Z M 2014 *Opt. Express* **22** 11900
- [16] Peng J S, Zhan L, Gu Z C, Qian K, Luo S Y, Shen Q S 2012 *Opt. Commun.* **285** 731
- [17] Peng J S, Zhan L, Luo S Y, Shen Q S 2013 *J. Lightwave Technol.* **31** 3009
- [18] Luo Z C, Liu M, Liu H, Zheng X W, Luo A P, Zhao C J, Zhang H, Wen S C, Xu W C 2013 *Opt. Lett.* **38** 5212
- [19] Li C, Gao X, Wang G Z, Jiang T X, Wang A M, Zhang Z G 2014 *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) San Jose, California United States, June 8-13, 2014 Paper SW3E.2*
- [20] Zhang J, Niu F Z, Chen X, Gao X, Liu Y Z, Wang A M, Zhang Z G 2014 *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) San Jose, California United States, June 8-13, 2014 Paper SW3E.1*
- [21] Liu X M 2011 *Phys. Rev. A* **84** 023835
- [22] Peng J S, Zhan L, Gu Z C, Qian K, Luo S Y, Shen Q S 2012 *Phys. Rev. A* **86** 033808
- [23] Baumgartl M, Ortac B, Limpert J, Tünnermann A 2012 *Appl. Phys. B* **107** 263

High-repetition-rate passively mode-locked erbium-doped all fiber laser*

Dou Zhi-Yuan¹⁾ Tian Jin-Rong¹⁾ Li Ke-Xuan¹⁾²⁾ Yu Zhen-Hua³⁾ Hu Meng-Ting¹⁾
Huo Ming-Chao¹⁾ Song Yan-Rong^{1)†}

1) (*Institute of Information Photonics Technology, College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

2) (*Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang 065000, China*)

3) (*Tianjin Institute of Modern Laser Optics Technology, Tianjin 300190, China*)

(Received 9 August 2014; revised manuscript received 13 October 2014)

Abstract

We demonstrate a high-repetition-rate Er-doped all fiber laser with nonlinear-polarization-rotation mode-locking. The highest repetition rate of the laser is 217 MHz. The fiber laser has a very simple and compact structure and can output a stable mode-locking pulse only by using one polarization-dependent isolator and a polarization controller. The pulse width, spectral width and signal-to-noise ratio are measured to be 69 fs, 56 nm and 76 dB respectively.

Keywords: Er-doped fiber, all-fiber laser, high-repetition, mode locking

PACS: 42.55.Wd, 42.65.Re

DOI: [10.7498/aps.64.064206](https://doi.org/10.7498/aps.64.064206)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61177047) and the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61235010).

† Corresponding author. E-mail: yrsong@bjut.edu.cn