

# 高重复频率被动锁模的掺 Er 光纤激光器

李婧, 戴永恒, 张志刚

北京大学信息科学技术学院量子电子学研究所, 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871

E-mail: [ljpkuchina@gmail.com](mailto:ljpkuchina@gmail.com)

2007-09-28 收稿, 2007-12-07 接受

国家科技支撑计划(批准号: 2006BAK03A20)和国家高技术研究发展计划资助项目

**摘要** 为满足现代众多科学应用领域对低时域抖动、高重复频率飞秒光纤激光器的需求, 在实验基础上解决了若干技术难点, 并利用非线性偏振旋转(NPR)锁模原理, 成功得到了重复频率在 100 MHz 以上自由运转被动锁模的掺 Er 飞秒光纤激光器. 激光器输出脉冲的重复频率为 101.94 MHz, 输出平均功率 34 mW, 光谱谱宽 25 nm, 傅里叶变换受限输出脉冲宽度为 105 fs.

**关键词**

掺铒飞秒光纤激光器

高重复频率

光学频率梳

光纤授时

近年来, 飞秒光纤激光器由于其良好的稳定性、小巧的体积、方便的携带方式以及易准直、低成本的优点而越来越受到人们的青睐. 研究人员也做了很多工作, 希望获得通信波长 1.5  $\mu\text{m}$  范围内高能量、窄脉宽的光纤激光器. 利用掺 Er(铒)光纤可以得到 1.5  $\mu\text{m}$  波长范围内的飞秒脉冲, Er 光纤的增益带宽可以支持小于 100 fs 的脉冲, 脉冲能量在几个纳焦量级, 脉冲的重复频率一般在 40~80 MHz 之间<sup>[1]</sup>.

在现代众多的应用领域, 特别是光学频率梳和光纤授时领域中, 需要低时域抖动、高重复频率的飞秒脉冲. 利用飞秒激光频率梳进行频率测量, 需要得到信噪比较高的拍频信号, 这就要求飞秒激光频率梳的每根光梳都有尽量高的功率, 在飞秒激光总输出功率一定的情况下, 重复频率越高, 梳齿之间的距离越大, 每根光梳获得的功率就越高. 所以, 如何获取高重复频率的飞秒激光光源就成为人们非常关心

的问题, 例如用于频率标准的钛宝石飞秒激光器的典型重复频率就在 1 GHz 左右<sup>[2-4]</sup>.

在基于光纤传输网络的授时及同步领域中, 也需要用到低时域抖动、高重复频率的飞秒光纤激光器. 计算表明, 光纤授时的时延抖动与激光器的重复频率成反比, 因此提高飞秒激光器的重复频率成为降低光纤授时时延抖动的关键技术之一<sup>[5-7]</sup>.

当前国际上商用掺 Er 飞秒光纤激光器的重复频率是 40~80 MHz, 这个量级远远不能满足目前各个领域对高重复频率飞秒光纤激光器的需要, 必须获得 100 MHz 以上量级的重复频率才能作为光学频率标准和光纤授时系统的光源. 因此, 研究如何得到高重复频率的掺 Er 飞秒光纤激光器, 不仅能够满足现代众多的科学应用领域, 特别是光学频率梳和光纤授时领域对低时域抖动、高重复频率飞秒脉冲光源的需要, 而且具有重要的科学应用价值.

本文中, 我们报道了高重复频率(>100 MHz)掺 Er 飞秒光纤激光器. 激光器在锁模工作的状态下, 输出重复频率为 101.94 MHz 连续稳定的飞秒脉冲激光, 输出的平均功率为 34 mW. 由于脉冲的重复频率随温度有一定的漂移, 需要加入控温系统及压电陶瓷(PZT)才能将激光器重复频率锁定, 因此, 我们得到的掺 Er 飞秒光纤激光器是工作在对腔长未加任何控制的“自由运转”状态下, 并且由于激光器的锁模方式为被动锁模, 我们得到的是自由运转被动锁模的掺 Er 飞秒光纤激光器.

由于激光器重复频率与腔长成反比, 因此要提高光纤激光器重复频率就要缩短激光器腔长. 这样带来两个问题: 其一是在短光纤中获得足够的增益? 由于激光腔长变短, 就意味着增益介质(Er 光纤)变短, 这会造成光在腔中得不到足够的增益; 其二是短腔中由于单位时间腔内脉冲数目增加, 单个脉冲能量减少, 可

能会造成腔内非线性效应不足,从而导致激光器无法锁模。针对这两个难点,我们需要采用高掺杂光纤,以提高单位长度增益光纤对抽运光的吸收。我们选择 Liekki 公司生产的高增益 Er 光纤,这是目前市场上同类产品中指标最高的;即使如此,我们也需要更高功率的抽运激光器,以提高单个脉冲的能量。同时,我们针对激光腔中各个器件,根据正负色散平衡的原则进行计算,得到理论计算数值,并且在实验中根据实际情况进行调整以得到最适合的数值。

实现飞秒光纤激光器的技术难点是如何保证短腔的成功熔接。因为短腔内的光学元器件都只有一定长度的尾纤,稍有不慎,熔接失败,就会致使光学元件报废,而光学元件的报废有可能导致整个光路需要重新搭建,因此需要非常

细心和娴熟的操作,必须经过反复练习才能达到这个要求。

图 1 为飞秒光纤激光器原理图,锁模原理是非线性偏振旋转(NPR)。波长 980 nm 的抽运光通过波分复用器(WDM)耦合到掺 Er 光纤中,产生的脉冲在正色散光纤中脉宽增宽并在增益介质 Er 的作用下获得较大的增益,经过光纤准直器(collimator)后离开光纤部分,进入空气部分。空气部分由两大部分组成:偏振分光镜(PBS)以及波片组。由于系统是利用非线性偏振旋转效应进行锁模,因此可以通过调节波片组来控制偏振方向,使激光器锁模。图 2 为飞秒光纤激光器偏振控制系统实物照片。激光通过偏振分光镜后,一部分能量被输出,而另一部分经过光纤准直器后再次进入光纤部分。光纤隔离器(isolator)可

以避免由于不确定的系统扰动造成光脉冲向两个方向传播,引起系统不稳定的振荡<sup>[8]</sup>。

激光器中,正色散光纤(Er 光纤)长 40 cm,群速度色散(GVD)为  $0.011 \text{ ps}^2/\text{m}$ ,总累积正色散为  $0.0044 \text{ ps}^2$ 。负色散光纤包括三部分:两个光纤准直器的尾纤、光纤隔离器的尾纤以及波分复用器的尾纤(均为单膜光纤),总长为 140 cm,群速度色散为  $-0.023 \text{ ps}^2/\text{m}$ ,总累积负色散为  $-0.0322 \text{ ps}^2$ 。空气隙长 11 cm,色散忽略不计。

抽运功率为 370 mW 时,激光输出功率为 34 mW。图 3 是通过频谱仪测得的飞秒激光器的重复频率,频谱仪测量激光器输出脉冲的重复频率为 101.94 MHz。图 4 为飞秒光纤激光器锁模时测得的输出光光谱图,光谱谱宽约为 25 nm,由此计算

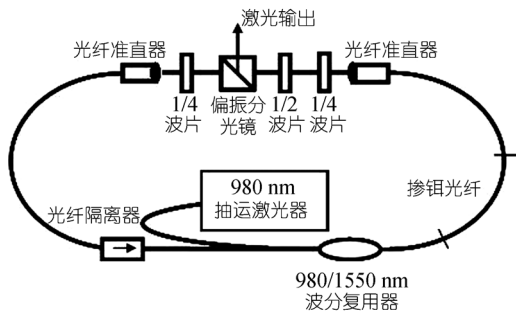


图 1 飞秒光纤激光器原理图

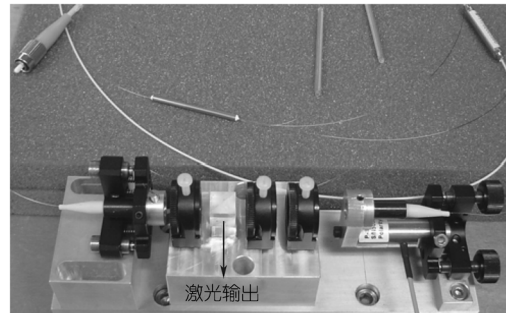


图 2 飞秒光纤激光器偏振控制系统实物照片

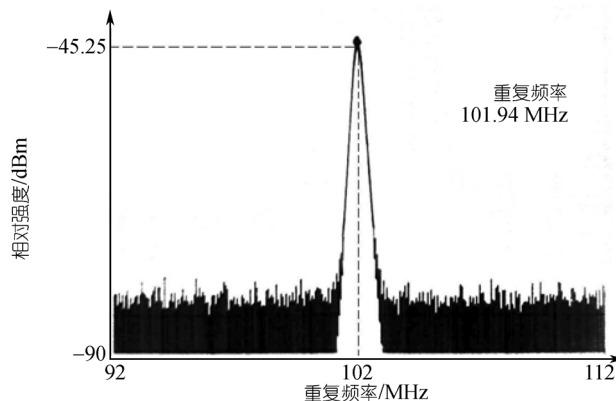


图 3 飞秒光纤激光器输出脉冲重复频率

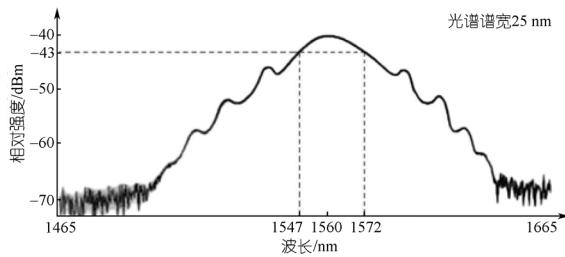


图4 飞秒光纤激光器输出光谱图

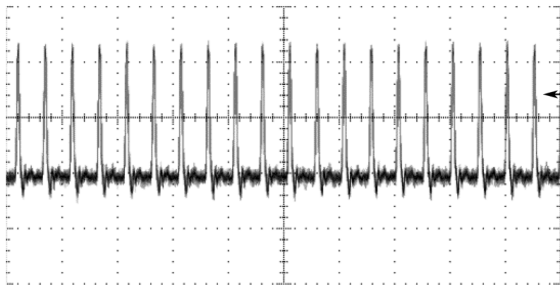


图5 飞秒光纤激光器输出脉冲列

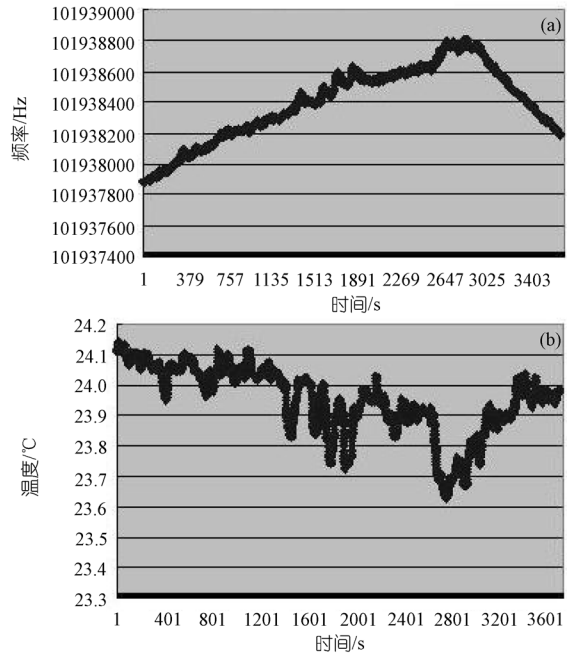


图6 飞秒激光脉冲重复频率的漂移与即时室温的变化

(a) 频率变化图; (b) 温度变化图

傅里叶变换受限输出脉宽为 105 fs. 图5所示为示波器测得的光脉冲列.

但是, 脉冲的重复频率随温度还是有一定的漂移. 图6所示为飞秒激光脉冲重复频率的漂移和即时的室温变化. 计算相关结果为  $-0.828814476$ , 可见飞秒激光器重复频率变化与温度有着紧密的负相关性, 要锁定飞秒激光器的重复频率, 首先必须对激光腔控温. 我们

已经进行了前期的准备工作, 将用于控温的制冷硅以及调整激光器腔长的 PZT(压电陶瓷)置入了系统(图2所示).

总之, 本研究实现了重复频率在 100 MHz 以上的自由运转被动锁模的掺 Er 飞秒光纤激光器, 重复频率为 101.94 MHz, 输出平均功率 34 mW, 光谱谱宽 25 nm, 傅里叶变换受限输出脉冲宽度为 105 fs.

今后的工作是把激光器的重复频率和初始频率锁定, 使它可以真正在频标领域以及授时领域得到广泛应用. 通过对控温后的飞秒光纤激光器重复频率抖动的测量, 可以计算出压电陶瓷的行程及响应带宽, 并据此设计制作飞秒光纤激光器重复频率锁定电路, 锁定其重复频率, 而其初始频率则可利用  $f-2f$  法进行锁定<sup>[9,10]</sup>.

参考文献

- 1 Tamura K, Ippen E P, Haus H A, et al. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser. *Opt Lett*, 1993, 18(13): 1080—1082
- 2 Ma L S, Bi Z Y, Bartels A, et al. Optical frequency synthesis and comparison with uncertainty at the  $10^{-19}$  level. *Science*, 2004, 303(5665): 1843—1845[DOI]
- 3 Reichert J, Holzwarth R, Udem T, et al. Measuring the frequency of light with mode-locked lasers. *Opt Commun*, 1999, 172(1-3): 59—68[DOI]
- 4 Udem T, Reichert J, Holzwarth R, et al. Accurate measurement of large optical frequency differences with a mode-locked laser. *Opt Lett*, 1999, 24(13): 881—883
- 5 Foreman S M, Holman K W, Hudson D D, et al. Remote transfer of ultrastable frequency references via fiber networks. *Rev Sci Instr*, 2007, 78: 021101[DOI]
- 6 Kim J, Löhlf F, Chen J, et al. Long-term femtosecond timing link stabilization using a single-crystal balanced cross-correlator. *CLEO 2007, Paper CMKK2*
- 7 Lenz G, Tamura K, Haus H A, et al. All-solid-state femtosecond source at 1.55  $\mu\text{m}$ . *Opt Lett*, 1995, 20(11): 1289—1291
- 8 Tamura K R. Additive pulse mode-locked erbium-doped fiber lasers. Ph.D. Dissertation. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 1994
- 9 Xu L, Spielmann C, Poppe A, et al. Route to phase control of ultrashort light pulses. *Opt Lett*, 1996, 21(24): 2008—2010
- 10 Adler F, Moutzouris K, Leitenstorfer A, et al. Two-branch Er:fiber laser system for long-term optical frequency metrology. *CLEO 2005, Paper CThU4*