

# 高重复频率飞秒光纤激光技术进展

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)

**摘要** 简要回顾了飞秒光纤激光技术的发展,并报道了高重复频率光纤激光器的最新进展。通过模拟计算,证明高重复频率下锁模脉冲有随光纤缩短而变窄的趋势。选用合理的光学元件、光纤长度和色散匹配,研制出重复频率为 330 MHz 的掺铒光纤激光器,490 MHz 的色散控制掺镱光纤激光器和 600 MHz 重复频率的全正色散掺镱光纤激光器。此类光纤激光器可用作天文光学频率梳的理想光源。

**关键词** 超快光学;飞秒光纤激光器;锁模;光纤

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0900130

## Advances in High Repetition Rate Femtosecond Fiber Lasers

Zhang Zhigang

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication System and Networks, Institute of Quantum Electronics, School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** The development of femtosecond fiber lasers is briefly reviewed, and the recent advances in the high repetition rate femtosecond fiber lasers are reported. With the simulation, It's demonstrated that the output pulse width is a function of the pulse repetition rate or the fiber length. With properly selected optical components and the dispersion management,  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber laser of 330 MHz repetition rate, dispersion  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber laser of 490 MHz repetition rate, all-normal dispersion  $\text{Yb}^{3+}$ -doped laser of 600 MHz repetition rate are developed. Those kinds of fiber lasers can be excellent optical sources for astro-combs.

**Key words** ultrafast optics; femtosecond fiber lasers; mode locking; optical fibers

**OCIS codes** 140.3510; 140.7090; 320.7100; 320.7140

### 1 飞秒光纤激光器的发展

飞秒光纤激光器和飞秒钛宝石激光器几乎是同时发展起来的,甚至比钛宝石激光器还要早<sup>[1]</sup>。钛宝石激光器输出脉宽经过短短几年的时间,就从 100 fs 左右迅速缩短到 5 fs 以下<sup>[2,3]</sup>;如果不追求短脉冲,钛宝石激光器的特有优势是具有非常宽的可调谐谱。而光纤激光器经过了近 20 年漫长的时间,其脉宽还在几十飞秒徘徊。

随着飞秒激光器的应用不断扩展,钛宝石激光器本身的高价格(主要是其抽运激光器)、低稳定性和大体积等弊病日益显著,而光纤激光器以其低成本、高稳定性和小体积等优点逐渐被人们重视。但是和钛宝石激光器相比,光纤激光器有两个主要问

题: 1) 脉宽还不能短到与钛宝石激光器相比, 2) 输出脉冲能量还不够高。其实对于大多数应用来说,脉冲宽度只要求在 100 fs 左右。而对脉冲能量,对于许多应用,例如生物光学成像,也只需要几个纳焦量级。对于需要高能量的场合,光纤激光的放大也很方便。因此,飞秒光纤激光器还是大有可为的。

#### 1.1 飞秒光纤激光技术发展历史回顾

飞秒光纤激光技术,按照其脉冲成型原理,经历了这样几个发展阶段:

1) 孤子型<sup>[1]</sup>: 脉冲的形成依赖于自相位调制和负色散的平衡。脉冲的波形为双曲正割型;

2) 色散控制型<sup>[4]</sup>: 腔内有正负两种色散,色散基本平衡,脉冲经过展宽-压缩过程。脉冲形状可用

**收稿日期**: 2011-07-07; **收到修改稿日期**: 2011-07-28

**基金项目**: 国家支撑计划(2006BAF03A20)、国家 863 计划(2008AA031901)和国家自然科学基金(10974006, 60927010, 11027404)资助课题。

**作者简介**: 张志刚(1955—),男,博士,教授,主要从事超短脉冲激光器和应用方面的研究。

E-mail: zhgzhang@pku.edu.cn

高斯型模拟;

3) 自相似型<sup>[5]</sup>:腔内正色散更多一些,脉冲的光谱呈抛物线型;

4) 全正色散型<sup>[6]</sup>:腔内无色散补偿。脉冲的缩短靠光谱滤波器滤掉脉冲两端的啁啾波长分量。脉冲光谱近似方波形状。

初期孤子型锁模激光器的输出能量都在纳焦以下。这主要是因为受孤子锁模中的面积定理的限制,当抽运功率的加大超过一定程度,脉冲就会分裂为高阶孤子。为了提高输出脉冲的能量,麻省理工学院的研究者提出了色散控制型锁模的概念<sup>[4]</sup>,即在腔内加入正色散光纤,让脉冲在腔内有一个展宽/放大-压缩的过程。这样输出的脉冲不仅能量高,而且脉冲短。但是,脉冲能量仍然在纳焦徘徊。为了提高脉冲能量,康奈尔大学的研究者接过了麻省理工学院的引领旗帜,率先提出了光纤激光器中自相似型<sup>[5]</sup>和全正色散锁模<sup>[6]</sup>的概念。自相似型锁模光纤激光器中,净色散不仅为正,而且数值也不小,因此脉冲在高能量下不至于分裂。更有甚者,特别是在 $1\ \mu\text{m}$ 波长的光纤激光器中,腔内可以没有任何色散补偿元件,全部为普通单模正色散光纤。此时输出的脉冲能量可达几十纳焦<sup>[7]</sup>。除了脉宽和能量,不断增加的新应用也要求光纤激光器提高脉冲的重复频率。普通的环形腔飞秒光纤激光器的重复频率多在 $40\sim 50\ \text{MHz}$ 。作为光学频率梳的光源,重复频率要求大于 $200\ \text{MHz}$ ,以满足频率计数器的分辨率要求。

更高重复频率光纤激光器的必要性在于其作为天文光学频率梳的光源,要求频率间隔在 $20\ \text{GHz}$ 以上<sup>[8]</sup>。天文光学频率梳是天文光谱仪的定标源。这样高的重复频率不是光纤激光器的长处。固体激光器和半导体激光器做高重复频率比光纤激光器要容易得多。但是,光纤激光器相对于固体激光器的优势是无水冷,相对于半导体激光器的优势是脉冲短。弥补这个缺陷的通用做法是用法布里-珀罗(F-P)标准具将重复频率倍增到 $20\ \text{GHz}$ 以上<sup>[9]</sup>。而这同样要求重复频率越高越好,因为F-P标准具的有限线宽也会使激光器源的边模透过,导致光谱定标误差产生<sup>[9]</sup>。高重复频率即大频率间隔可减少边模的透过。

## 1.2 飞秒光纤激光技术主要研究方向

当前国际上飞秒光纤激光器的主要研究方向是:

1) 超低重复频率、直接从光纤激光振荡器中获得高脉冲能量输出。飞秒光纤激光器的应用扩展很

大程度上取决于单脉冲能量的大小。为了简化系统,最好直接从光纤激光振荡器中输出几十甚至几百纳焦的脉冲能量。这样不但可以直接应用于成像和加工领域,继续放大也会减轻放大器的级数,并缓解放大后脉冲压缩的压力。用增加腔长、降低脉冲重复频率的是最常用的技术。需要解决的关键科学问题是在长腔下,色散、非线性和脉宽的关系。在长光纤腔中,特别是在全正色散的情况下,锁模本身虽然不困难,但脉冲很难压缩。降低光纤色散,如果不降低光纤的非线性,仍然会有脉冲不能被压缩的问题;如果减少腔内光谱滤波器的带宽,可以使非线性减少并使脉冲可压缩,但是窄带宽会使最后压缩的脉冲变宽。因此需要很好地研究解决;

2) 超高重复频率、超低噪声,以备光学频率梳和微波光子学的应用。超高重复频率和超低噪声是光纤激光器在超精密光谱学和微波光子学应用的需要。至兆赫兹量级的超高重复频率可以为高精度光谱仪定标、也可以作为新的微波源。这就需要大大降低激光器的噪声。这方面的研究集中在超高重复频率光纤激光器的锁模机理、色散控制与噪声的关系、高稳定度参考源等方面;

3) 进一步缩短脉冲。小于 $20\ \text{fs}$ 的脉冲一直是光纤激光器与钛宝石激光器竞争的坎。一方面由于光纤激光器增益介质带宽的限制,不支持小于 $20\ \text{fs}$ 的脉冲;另一方面,由于光纤中的色散补偿问题,脉冲也很难做到变换受限脉冲。但是,最近的模拟和实验表明,在短光纤情况下光纤激光器中非线性和色散的相互作用,有可能使脉冲宽度超越激光增益带宽,最终小于 $20\ \text{fs}$ ;

4) 新型锁模技术的探索。例如碳纳米管、石墨烯等。虽然已经有很多文献发表,但是真正实用的器件还很少;

5) 波长扩展。常规的锁模光纤激光器集中在掺镱和掺铒光纤上,波长限定为 $1\ \mu\text{m}$ 和 $1.5\ \mu\text{m}$ 。很多应用需要其他波长,例如 $920, 1300$ 和 $2000\ \text{nm}$ 。因此这些波长的飞秒光纤激光器成为新的研究方向。

国际上主要的飞秒光纤激光器研究团队是麻省理工学院(MIT)和康奈尔大学,他们起着引领方向的作用。其他研究团队例如Max-Planck研究所目标是高重复频率光纤频率梳<sup>[10]</sup>,东京大学<sup>[11]</sup>、剑桥大学<sup>[12,13]</sup>和亚利桑那大学<sup>[14]</sup>侧重于碳纳米管和石墨烯锁模;席勒大学偏向高功率光子晶体光纤激光器<sup>[15]</sup>等。新加坡南洋理工学院也曾创造过最短脉冲的世界纪录<sup>[16]</sup>。国内的飞秒光纤激光器的研究

主要是跟踪国外的发展,尚缺乏独创的理论和技術。中国科学院西安光学精密机械研究所在国内最先开展飞秒光纤激光器和放大器的研究,并最早实现了产品化<sup>[16,17]</sup>。天津大学主攻大模场面积高平均功率光子晶体色散控制锁模和全正色散锁模光纤激光器<sup>[18~20]</sup>,北京大學的研究重点是高重复频率光纤激光器和光纤频率梳。国防科学技术大学、中国科学院上海光学精密机械研究所和湖南大学等很多大学和研究所也有各种飞秒光纤激光器的研究<sup>[21~23]</sup>。

## 2 高重复频率光纤激光器所面临的挑战和最新进展

### 2.1 天文光学频率梳面临的挑战

北京大學研究組的研究方向集中在基于光纤飞秒激光器的光学频率梳,特别是天文光学频率梳。如前所述,天文光学频率梳的要求重复频率在20 GHz以上。用F-P腔直接产生这样高的重复频率不是光纤激光器的特长。为了避开固体激光器的弱点,通常采用高重复频率光纤激光器加F-P腔滤波到高重复频率的方案。为了避免透射边模对光谱定标的影响,应尽量提高光纤激光器的重复频率。最早实现250 MHz重复频率的是Max-Planck研究所<sup>[10]</sup>,现在已经成为Menlo System光学频率梳的光源;麻省理工学院也报道了重复频率为301 MHz的掺铒光纤激光器,其抽运功率是1.4 W<sup>[24]</sup>,而输出功率仅有61 mW;在小功率抽运高重复频率激光器方面,只有台湾工业技术研究院的小组报道了重复频率300 MHz的掺铒光纤激光器<sup>[25]</sup>,输出功率为60 mW,带宽约为30 nm,对应脉宽93 fs。Max-Planck研究所在会议上报告了两种570 MHz掺铒光纤锁模激光器,分别工作在色散控制锁模和全正色散锁模状态。在色散控制锁模状态下,带宽可支持50 fs以下的脉宽;在全正色散状态下,由于是用单个光栅作为滤波和波长控制元件,带宽只能支持840 fs脉冲<sup>[26]</sup>。MIT小组也实现了491 MHz线性腔掺铒光纤锁模<sup>[27]</sup>,由于是可饱和吸收体锁模,脉冲宽度为180 fs。Max-Planck研究所和MIT的以上激光器都是空间耦合抽运,所以其长期稳定性还需要进一步验证。

提高重复频率就是要剪短光纤。但是剪短光纤有如下限制:

1) 增益光纤。光纤激光器必须有足够的增益,才能保证激光器的运转和锁模。短光纤意味着高掺

杂;

2) 波分复用(WDM)抽运耦合器。WDM起着将抽运激光耦合到单模光纤中的作用。但是WDM本身占一定的空间。例如掺铒光纤的WDM封装长度一般7~9 cm,加上尾纤,长度合计十几厘米,这个长度显然不能忽略;

3) 隔离器。环形腔内光要求单向运转,这就需要一个隔离器。光纤式隔离器使用很方便,但是其封装长度也在5 cm以上;

4) 准直器。环形腔激光器一般还有一段空间光路。这就需要两个准直装置将光耦合进出光纤。准直器也有尾纤需要考虑。

由于以上原因,真正做到重复频率500 MHz以上的不多。即使有,也多半是空间耦合方式,很难长期稳定工作。国际上很多研究组都在致力于解决这些问题。

高重复频率下锁模机制上的问题也很严重。光纤激光器中锁模主要有两种方式:1)可饱和吸收体锁模<sup>[28]</sup>;2)非线性偏振旋转(NPE)锁模<sup>[29]</sup>。可饱和吸收体对于线性腔锁模是非常方便的,但是其“慢饱和”脉冲形成机制不允许脉冲运转在超宽带短脉冲模式。一般线性腔的输出脉宽都在几百飞秒至皮秒量级。

基于光学克尔效应非线性偏振旋转相对于脉宽是一种“快饱和”机制。其允许非常宽的光谱和极短的脉宽。但是用NPE锁模不容易在线性腔中实现,所有的短脉冲记录都是在环形腔中实现的。

NPE锁模一般要求非线性相移在 $\pi$ 以上<sup>[30]</sup>。短光纤腔中,有限的抽运功率下,单脉冲能量下降(远小于纳焦量级),长度的减小加上功率减小,导致非线性相移减小,锁模困难。

分析指出,虽然脉冲能量变小,但是由于光纤变短,色散变小,脉冲展宽也变小。因此,非线性相移未必非常小。另外,NPE要求非线性相移在 $\pi$ 以上也需要实验证实。

### 2.2 高重复频率光纤激光器的实现

基于以上认识,北京大學研究组进行了研究,在掺铒和掺铒光纤激光器中获得了若干成果。北京大學研究组2010年年初实现了在小抽运功率下在掺铒光纤激光器重复频率达到225 MHz的锁模运转,脉宽达37.4 fs<sup>[31]</sup>。最近,通过进一步缩短光纤,重复频率已经达到250 MHz。色散控制的掺铒光纤激光器的重复频率已达500 MHz,全正色散掺铒光纤激光器的重复频率已达600 MHz。这些激光器

将成为产生激光频率梳的最关键器件。本论文将从模拟到实验介绍本课题组在光纤激光器方面取得的进展。

1) 计算机模拟证明, 光纤越短(重复频率越高), 所能得到的脉宽越窄。

脉宽随腔内介质长度的缩短(包括光纤的缩短)而缩短, 称其为“长度定律”。长度定律在固体激光器中已经显示了正确性。例如钛宝石激光器中最初的晶体长度是 20 mm, 色散补偿最好的情况下, 脉宽可达 60 fs<sup>[2]</sup>。进一步缩短脉宽需要将晶体长度缩短(这当然是因为棱镜对无法补偿与钛宝石晶体的高阶色散的缘故)。随着晶体的缩短和所选用的棱镜材料的折射率的减少, 高阶色散补偿得越来越好, 所得到的脉冲越来越短<sup>[32~34]</sup>。最短脉冲的产生当然是用精心设计的啁啾镜精密补偿色散的结果, 此时激光晶体的长度只有 2 mm 左右, 而脉冲宽度可达 5 fs 以下<sup>[35]</sup>。固体激光器中长度定律的物理本质主要是高阶色散补偿。例如在 800 nm 波长范围, 没有棱镜对材料可以补偿腔内三阶以上的色散, 只有缩短晶体才能总体上减少高阶色散。啁啾镜虽然可以设计补偿三阶色散, 但是每个啁啾镜每次提供的色散很小且不均匀。多次反射导致不均的色散也会让脉冲发生畸变。只有最短的晶体才能使腔内净色散最小。

这样的规律是否也发生在光纤激光器中? 是否光纤越短, 所产生的脉宽越窄? 早期的光纤激光器文献说明, 孤子锁模的脉宽对应于光纤的总色散<sup>[36]</sup>, 此时脉冲的解是双曲正割型; 而色散控制光纤激光器中的脉冲对应于正色散光纤的色散总量。此时脉冲的解是高斯型<sup>[37]</sup>。人们曾经尝试用精确补偿色散的方式降低脉宽, 但是在一定的光纤总长度下, 即使总色散为零, 所得到的脉宽总是受到限制<sup>[16]</sup>。

实际上, 与固体激光器不同, 由于色散不是均匀分布的, 光纤激光器中的脉宽在光纤中的各个位置也是不同的, 不能得出简单的解析解来解释。因此计算机模拟显得十分必要。

对 1.55  $\mu\text{m}$  波长的环形腔激光器中孤子锁模、色散控制锁模和自相似锁模等 3 种锁模状态进行了模拟。根据增益光纤以及激光器中用到的其他光纤的色散率数据。光纤的总长度根据重复频率调整。需要指出的是, 模拟只针对环形腔, 并针对 NPE 快饱和锁模。结果如图 1 所示。图中, 无论是孤子锁模、色散控制锁模, 还是自相似锁模, 都显示了脉宽

随重复频率增加而减小的趋势。所不同的是, 孤子锁模在 1 GHz 重复频率下能达到的最短脉宽是 40 fs 左右, 而色散控制的锁模, 在 400 MHz 以上的重复频率下就可以接近 20 fs, 并且随重复频率增加的变化很小。

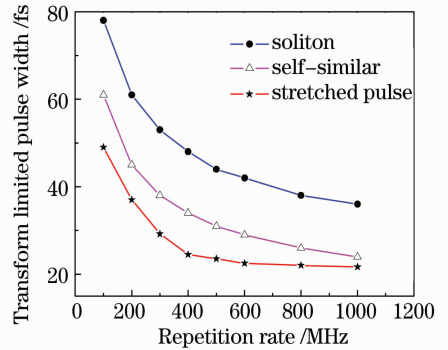


图 1 三种类型的光纤激光器中变换受限脉宽与重复频率(光纤长度)的关系

Fig. 1 Dependence of the transform limited pulse width on the pulse repetition rate (alternatively fiber length) in three types of fiber laser oscillators

对波长在 1.035  $\mu\text{m}$  的全正色散掺镱光纤锁模激光器的模拟(见图 2)也证明, 减少光纤长度(减少总色散)也导致光谱的展宽即可压缩的脉宽变窄。对于全正色散来说, 还有两个因素必须考虑: 1) 增益的大小, 即单脉冲能量的大小, 否则锁模比有色散补偿的激光器困难得多; 2) 光谱滤波器的带宽。全正色散锁模必须伴有限制带宽的光谱滤波装置, 例如双折射滤光片。其厚度决定了光谱带宽。在图 2 的模拟中, 光谱滤波器的带宽保持不变。

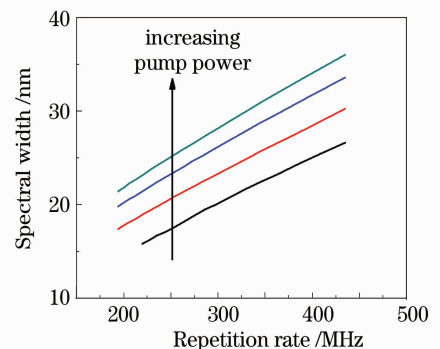


图 2 全正色散光纤激光器中脉冲的光谱宽度与重复频率(光纤长度)的关系

Fig. 2 Dependence of spectral width on the pulse repetition rate (fiber length) in all-normal dispersion fiber lasers, with the pump power as a parameter

2) 解决了一系列技术问题, 使超高重复频率激光器有技术上的可行性。有了理论上的证明, 还需

要具体的实现。具体的解决方案如下：

① 增益光纤。首先，尽量选用高掺杂光纤，掺铒光纤最高掺杂是 500 dB/m。而掺镱光纤最高掺杂可达 2400 dB/m；

② WDM。设计了一种新型的 semi-WDM 耦合器。这种耦合器实际上是膜片式 WDM 的一半，即去掉一半耦合透镜和光纤，直接从空间输出，起着准直器的作用。这样就把 WDM 和准直器合成为一体；

③ 隔离器。对于工作在 1.5  $\mu\text{m}$  波长的激光器，有一种片式隔离器可以用。其厚度只有几毫米，这样就大大减少了腔长。但是对于 1.03  $\mu\text{m}$  的激光器，片式隔离器的吸收损耗过大。还是以继续用块状法拉第隔离器为好；

④ 准直器。用 semi-WDM，准直器和 WDM 合成在一起，因此纵有尾纤，也比两个分立的元件所用的尾纤要短。

3) 实验验证了模拟结果。以掺铒和掺镱光纤激光器为例(见图 3)，列出输出脉冲的特性，并分析

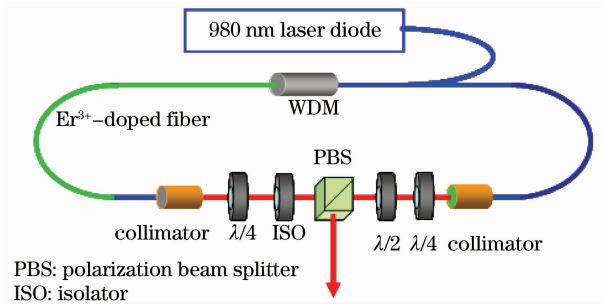


图 3 超短腔掺铒飞秒光纤激光器结构

Fig. 3 Schematic of the ultrashort-cavity femtosecond Er<sup>3+</sup>: fiber laser

其带来的启示。

① 色散控制的掺铒光纤激光器。

根据模拟结果(见图 4)，光纤激光器重复频率在 200 MHz 以上，脉冲宽度会降低到 40 fs 以下。这当然也取决于抽运功率和色散补偿情况。在实验的激光器中，抽运功率为 600 mW，腔内净色散为 -2150 fs<sup>2</sup>。用正色散棱镜对压缩后的脉冲宽度为 37 fs(假定高斯波形)。半峰全宽为 135 nm，支持 28 fs 的脉冲。

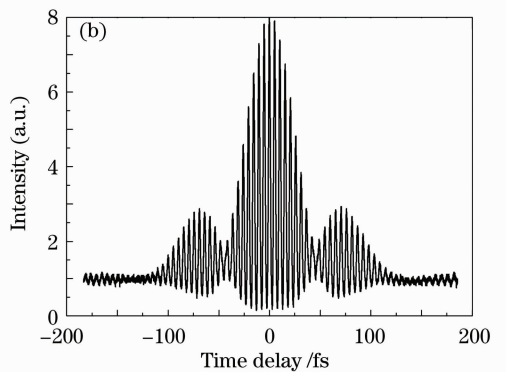
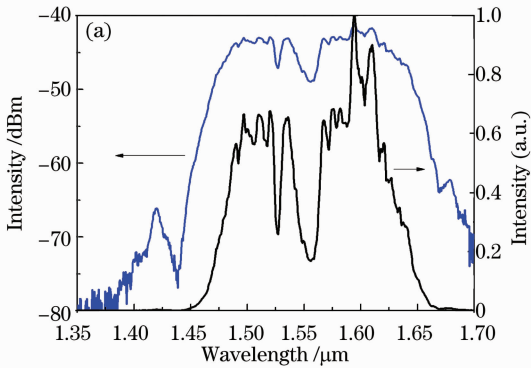


图 4 225 MHz 掺铒光纤激光器输出脉冲的光谱(a)和自相关曲线(b)

Fig. 4 (a) Spectra and (b) autocorrelation trace of the 225 MHz Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser pulse

② 光栅对补偿色散的掺镱光纤激光器

由于在 1.035  $\mu\text{m}$  波长附近石英光纤都是正色散，方便的色散补偿元件就是光栅对。选用 600 groove/mm 的反射式镀金光栅作为补偿元件，semi-WDM 作为抽运耦合器件(见图 5)。为了缩短空间长度，光栅也被切成半英寸见方。采用光栅对作为腔内色散补偿的优点在于能够自由调节腔内净色散，使得锁模激光器工作在零色散点附近，从而得到较窄的线宽和较低的相位噪声。调节光纤长度，激光器可以工作在 330~490 MHz 的重复频率内。由于腔内隔离器的吸收较大，平均输出功率只有 70 mW，光谱宽度为 30 nm，压缩后脉冲宽度为 48 fs(见图 6)。由于功率低，减少色散，即缩短光栅对间隔导致

锁模不稳定。因此未能进一步优化色散。

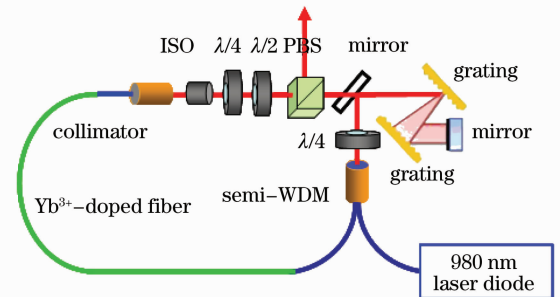


图 5 含光栅对色散补偿的掺镱飞秒光纤激光器结构

Fig. 5 Schematic of an ultrashort cavity femtosecond Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser with grating pair as the dispersion compensator



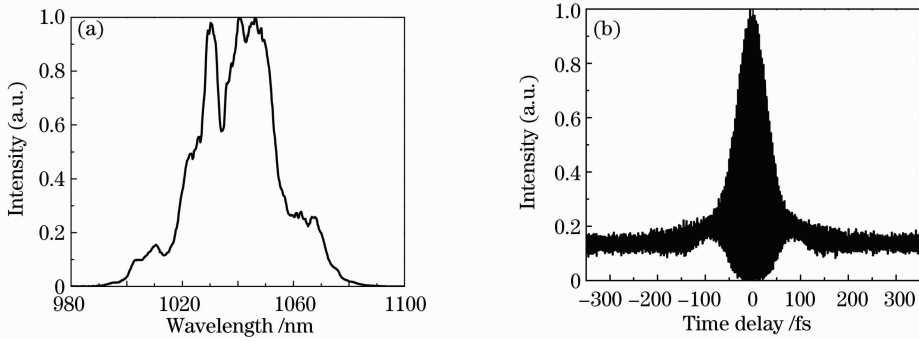


图 6 330 MHz 掺镱光纤激光器输出脉冲的光谱(a)和自相关曲线(b)

Fig. 6 (a) Spectrum and (b) autocorrelation trace of the 330 MHz  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber laser pulse

将腔内小型片状隔离器替换为体空间隔离器，虽然增加了一些空间光路的长度，但大大减少了腔内损耗，提高了腔内功率。在抽运功率为 900 mW 的情况下，输出功率提高到 450 mW。但是单脉冲能量仍然在 1 nJ 左右，脉冲光谱带宽小于 25 nm，傅里叶变换受限脉冲是 60 fs。进一步优化色散和进一步提高抽运功率，这种激光器应该输出小于 30 fs 的脉冲。

③ 无色散补偿的全正色散掺镱光纤激光器

无色散补偿的全正色散飞秒光纤激光器最大的优势是构成简单、损耗小、抽运效率高。其锁模原理是用光谱滤波器。如图 7 所示，如果在时域的脉冲含有啁啾，通过一个光谱滤波装置，这个脉冲在时域会变窄。这个光谱滤波器起着脉冲缩短的作用。这就是全正色散光纤激光器中，没有色散补偿也能锁模并得到短脉冲的原理。显然，全正色散锁模的脉宽和带宽都会受到滤波器通频带的限制。因此脉宽会更宽些。

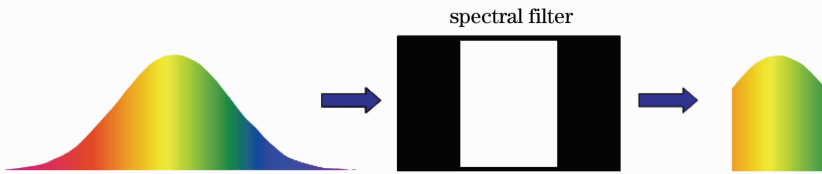


图 7 啁啾脉冲通过光谱滤波器后脉冲在时域缩短的原理。啁啾脉冲的前后沿的播出被光谱滤波器滤除，因此在时域脉冲会缩短

Fig. 7 Pulse shortening mechanism with a spectral filter. Chirped pulse can be shortened by a spectral filter by cutting the front and back spectral components in time domain

根据这个原理，构建了超短腔全正色散锁模掺镱光纤激光器(见图 8)。腔内既没有光栅对，也没有负色散光纤，只有增益光纤和准直器的尾纤。这样的腔可以做得非常紧凑。通过不断缩短光纤长度，激光器的重复频率从 100 MHz 提高到 600 MHz。表 1 列出了激光器重复频率 178~600 MHz 时脉冲的光谱带宽变化情况。从表 1 中(a)~(d)情况看出，随着重复频率的提高，即腔内色散的减小，脉冲的光谱带宽不断增加，意味着可压缩得到的脉宽越窄，验证了图 2 的结果。当然在重复频率较高的时候，需要的抽运功率也越高，因此情况(e)说明，在 200 MHz 的情况下，抽运功率提高到 920 mW 时，脉冲的光谱带宽增加到 30 nm。在(f)情况下，虽然抽运功率也提高到 900 mW，由于重复频率更高，脉冲能量减少，带

宽反而变窄了。这可以用单脉冲能量减少导致非线性相移减少来解释。

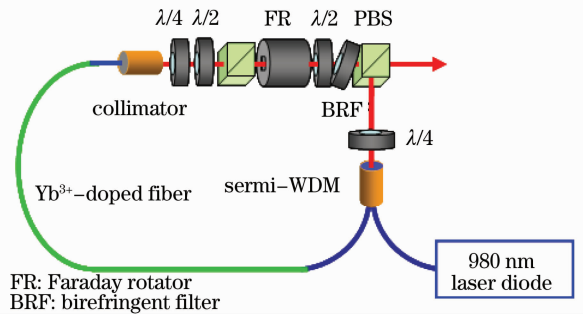


图 8 全正色散掺镱飞秒光纤激光器结构

Fig. 8 Schematic of an ultrashort cavity all-normal dispersion  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber laser

表 1 全正色散光纤激光器重复频率和带宽的关系  
Table 1 High repetition of all-normal dispersion fiber lasers versus bandwidth

Case	Cavity dispersion / $\text{ps}^2$	Pump power / mW	Repetition rate / MHz	Spectral bandwidth / nm
(a)	0.01978	550	178	16.8
(b)	0.01909	550	225	20.6
(c)	0.01617	650	250	28.6
(d)	0.01380	850	285	29.9
(e)	0.02070	920	200	30.0
(f)	0.00570	900	550	23.0

目前得到稳定锁模的最高重复频率为 600 MHz。需要的抽运功率是 900 mW。增益光纤的吸收系数

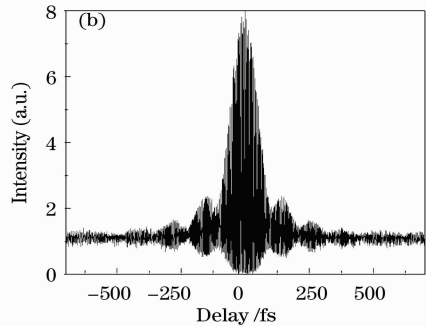
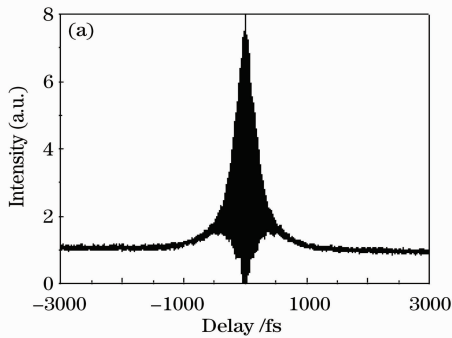


图 9 600 MHz 全正色散激光器输出脉冲的自相关曲线。(a)直接输出脉冲(对应脉冲宽度为 210 fs);  
(b)压缩后的输出脉冲(对应脉冲宽度为 107 fs)

Fig. 9 (a) Autocorrelation trace of the direct output pulse and (b) compressed pulse of all-normal dispersion laser. The corresponding pulse widths are 210 fs and 107 fs respectively with a Gaussian pulse profile assumed

### 3 结 论

高重复频率光纤激光器是天文光学频率梳的核心器件,也是飞秒光纤激光器具有挑战性的前沿技术。通过模拟分析,发现在高重复频率下,光纤激光器不但可以锁模,还有可得到更短脉冲的好处。通过创新器件,已经成功研制出重复频率 250 ~ 600 MHz 的飞秒光纤激光器,并在掺铒光纤中获得了同类光纤激光器中的较短光脉冲。本课题组将在高重复频率飞秒激光器方面做进一步的研究,以期获得更好的结果。

#### 参 考 文 献

- 1 L. F. Mollenauer, R. H. Stolen. Soliton laser [J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(1): 13~15
- 2 D. Spence, P. Kean, W. Sibbett. 60-fs pulse generation from a self-mode-locked Ti : sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(1): 42~44
- 3 T. R. Schibli, O. Kuzucu, J. Kim *et al.*. Towards single-cycle laser systems [J]. *IEEE J. Sel. Topics in Quant. Electron.*, 2003, **9**(4): 990~1001

在 975 nm 处为 1600 dB/m,长度仅有 12 cm。录得的直接输出和压缩后的脉冲自相关曲线如图 9 所示。

全正色散掺铒光纤激光器的最大好处是抽运效率非常高。在 900 mW 抽运下,锁模时平均输出功率可达 550 mW。第二个好处是,直接输出的脉冲已经非常窄。如图 9 所示,直接输出的脉宽是 210 fs,从自相关图形看,啁啾很小。用 600 groove/mm 光栅对压缩后的脉冲是 107 fs,此时光栅对的斜线距离只有 9.7 mm。高功率和短脉冲可使这种激光器直接作为光梳的源而不用放大和压缩。因为扩谱时可选用有一定负色散的光子晶体光纤,脉冲在光纤中被压缩并展宽光谱。

- 4 K. Tamura, E. Ippen, H. 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
- 5 F. Ilday, J. Buckley, W. Clark *et al.*. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(2): 213902
- 6 K. Kieu, F. Wise. All-fiber normal-dispersion femtosecond laser [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 11453~11458
- 7 A. Chong, W. H. Renninger, F. W. Wise. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser with pulse energy above 20 nJ [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(16): 2408~2410
- 8 T. Steinmetz, T. Wilken, C. Araujo-Hauck *et al.*. Laser frequency combs for astronomical observations [J]. *Science*, 2008, **321**(5894): 1335~1337
- 9 G. Chang, C.-H. Li, D. F. Phillips *et al.*. Toward a broadband astro-comb; effects of nonlinear spectral broadening in optical fibers [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(12): 12736~12747
- 10 W. T. Hänsch, T. W. Holtzwarth, R. Holtzwarth *et al.*. Low phase noise 250 MHz repetition rate fiber fs laser for frequency comb application [C]. Baltimore: Conference on Laser and Electro-optics (CLEO), 2007: CMR3
- 11 S. Y. Set, H. Yaguchi, Y. Tanaka *et al.*. Ultrafast fiber pulsed lasers incorporating carbon nanotubes [J]. *IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron.*, 2004, **10**(1): 137~146
- 12 K. Kieu, M. Mansuripur. Femtosecond laser pulse generation with a fiber taper embedded in carbon nanotube/polymer

- composite[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15): 2242~2244
- 13 T.-H. Wu, K. Kieu, N. Peyghambarian *et al.*. Low noise erbium fiber fs frequency comb based on a tapered-fiber carbon nanotube design [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(6): 5313~5318
- 14 D. Popa, Z. Sun, F. Torrisi *et al.*. Sub 200 fs pulse generation from a graphene mode-locked fiber laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(20): 203106
- 15 B. Ortaç, O. Schmidt, T. Schreiber *et al.*. High-energy femtosecond Yb-doped dispersion compensation free fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(17): 10725~10732
- 16 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
- 17 Liu Dongfeng, Chen Guofu. High-power all solid state femtosecond fiber laser and amplifier system —— a practical ultrafast laser source [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1999, **36**(1): 1~7  
刘东峰, 陈国夫. 高功率飞秒全固化光纤激光器与放大器系统——实用化的超快光源[J]. *激光与光电子学进展*, 1999, **36**(1): 1~7
- 18 Ma Haiquan, Liu Chang, Zhao Wei *et al.*. Figure-of-eight cavity Yb<sup>3+</sup>-doped fiber mode-locked lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1173~1177  
马海全, 刘畅, 赵卫等. 8字形腔锁模掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1173~1177
- 19 柴路, 胡明列, 栗岩锋等. 新一代大功率光子晶体光纤飞秒激光器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(2): 48~50
- 20 X. Fang, M. Hu, C. Xie *et al.*. High pulse energy mode-locked multicore photonic crystal fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(6): 1005~1007
- 21 Gu Qingyuan, Hou Jing, Cheng Xiang'ai *et al.*. All-fiber passive mode-locked laser realized by semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 655~659  
谷庆元, 侯静, 程湘爱等. 利用半导体可饱和吸收镜实现的全光纤被动锁模激光器 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 655~659
- 22 Zhang Panzheng, Fan Wei, Wang Xiaochao *et al.*. Mode-locking and multiwavelength operation from all-fiber ytterbium doped laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302001  
张攀政, 范薇, 汪小超等. 全光纤掺镱激光器实现锁模和多波长输出 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302001
- 23 Xu Huiwen, Yang Hua, Wen Shuangchun *et al.*. Tunable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2272~2276  
徐慧文, 杨华, 文双春等. 基于非线性偏振旋转的可调谐多波长掺铒光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2272~2276
- 24 J. L. Morse, J. W. Sickler, J. Chen *et al.*. High repetition rate, high average power, femtosecond erbium fiber ring laser [C]. Baltimore: Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO), 2009: CML1
- 25 J.-L. Peng, T.-A. Liu, R.-H. Shu. The pump power was coupled spatially octave-spanning fiber laser comb with 300 MHz comb spacing for optical frequency metrology [C]. Baltimore: Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO), 2009: CTuK3
- 26 T. Wilken, P. Vilar-Welter, T. W. Hänsch *et al.*. High repetition rate, tunable femtosecond Yb-fiber laser [C]. Baltimore: Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO), 2009: CFK2
- 27 H. Byun, D. Pudo, J. Chen *et al.*. High-repetition-rate, 491 MHz, femtosecond fiber laser with low timing jitter [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(19): 2221~2223
- 28 M. Ober, M. Hofer, U. Keller *et al.*. Self-starting diode-pumped femtosecond Nd fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(18): 1532~1534
- 29 M. Hofer, M. Fermann, F. Haberl *et al.*. Mode locking with cross-phase and self-phase modulation [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(7): 502~504
- 30 M. E. Fermann, I. Hartl. Ultrafast fiber laser technology [J]. *IEEE J. Sel. Topics in Quant. Electron.*, 2009, **15**(1): 191~206
- 31 D. Ma, Y. Cai, C. Zhou *et al.*. 37.4 fs pulse generation in an Er: fiber laser at 225 MHz repetition rate [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(17): 2858~2860
- 32 C.-P. Huang, M. T. Asaki, S. Backus *et al.*. 17-fs pulses from a self-mode-locked Ti: sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(18): 1289~1291
- 33 M. T. Asaki, C.-P. Huang, D. Garvey *et al.*. Generation of 11-fs pulses from a self-mode-locked Ti: sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(12): 977~979
- 34 I. D. Jung, F. X. Kärtner, N. Matuschek *et al.*. Selfstarting 6.5 pulses fs from a Ti: sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 1009~1011
- 35 R. Ell, U. Morgner, F. X. Kärtner *et al.*. Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti: sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(6): 373~375
- 36 J. Kafka, T. Baer, D. Hall. Mode-locked erbium-doped fiber laser with soliton pulse shaping [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(22): 1269~1271
- 37 M. Hofer, M. Ober, F. Haberl *et al.*. Characterization of ultrashort pulse formation in passively mode-locked fiber lasers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(3): 720~728