

稀土离子掺杂飞秒光纤激光器最新进展

王军利 吕志国 卜祥宝

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 光纤激光器可分为基于非线性效应的光纤激光器和基于稀土离子受激辐射的掺杂光纤激光器。按照掺杂元素的不同, 光纤激光器可以分为掺镱、掺铒、掺钕和掺镨等光纤激光器。针对稀土掺杂飞秒光纤激光器的最新研究进展进行了分析和总结, 并给出了各种飞秒光纤激光器的优缺点和未来发展需要解决的问题, 为稀土掺杂飞秒光纤激光器的优化设计提供参考。

关键词 激光器; 飞秒光纤激光器; 稀土离子; 掺镱光纤激光器; 掺铒光纤激光器; 掺钕光纤激光器

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.100006

Recent Progress on Rare Earth Doped Femtosecond Fiber Lasers

Wang Junli Lü Zhiguo Bo Xiangbao

(Institute of Technology Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract Generally fiber lasers are classified as two types according to their principles. One is based on nonlinear effect of silica fiber, and the other is based on the simulated emission of rare earth ions which are doped in the optical fiber. the rare earth elements doped in the fiber are always lanthanide series. The development of femtosecond fiber laser is analyzed and the characteristics of several femtosecond fiber lasers are demonstrated. The idea to resolve the present problems of the femtosecond fiber lasers is gave.

Key words lasers; femtosecond fiber lasers; rare earth ions; Yb-doped fiber lasers; Er-doped fiber lasers; Tm-doped fiber lasers

OCIS codes 140.3510; 140.7090; 140.5680; 320.7090

1 引言

1961年美国 E. Snitzer 等在光纤激光器领域进行了开创性的工作。1985年英国 South Hampton 大学 S. B. Poole 等用金属化学气相沉积法制成低损耗的掺铒光纤。光纤激光器正是在掺铒光纤放大器技术基础上发展起来的。与固体激光器特别是钛宝石激光器相比, 光纤激光器具有结构紧凑、稳定性好、效率高、成本低、光-光转换效率高以及热光效应小等优点。作为光纤激光器的重要一员, 飞秒光纤激光器不但具有光纤激光器所有优点, 而且具有十分高的峰值功率、可以忽略不计的热效应和接近衍射极限的高质量光束。飞秒光纤激光器在材料加工、微光学元件制作、非线性光学、表征超快动力学过程、高速采样、多光子显微镜、超连续谱产生、太赫兹光谱、医学成像和精密测量方面具有重要广泛的应用^[1~18]。由于光纤本身的非线性效应严重制约了输出光脉冲的宽度和能量, 其输出脉冲宽度和能量稍逊色于钛宝石激光器, 因此目前飞秒光纤激光器的研究旨在通过克服光纤本身的非线性效应和对光纤激光器进行高效率的热管理来进一步提高输出脉冲的峰值功率、重复频率和输出脉冲质量^[19~23]。飞秒激光脉冲的产生主要通过锁模技术。被动锁模是利用材料和器件的非线性吸收(可饱和吸收)特性产生皮秒和飞秒量级的超短脉冲激光。在被动锁模光纤激光器中, 被动锁模方法有克尔棱镜锁模、半导体可饱和吸收镜锁模 (SESAM)、非线性极化偏振法锁模、碳纳米管锁模和石墨烯锁模等^[24~32]。目前, 大部分的商品化被动锁模光纤激光器都采用 SESAM。按照掺杂元素的

收稿日期: 2012-06-14; **收到修改稿日期**: 2012-07-02; **网络出版日期**: 2012-08-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费(K50510050009)资助课题。

作者简介: 王军利(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事超快激光技术及其应用等方面的研究。

E-mail: dispersion@126.com

不同,常用的飞秒光纤激光器可以分为掺镱(Yb)、掺铒(Er)、掺铥(Tm)、掺钬(Ho)和掺镨(Pr)等光纤激光器^[24,27,29~31,33~37]或者稀土离子混合掺杂光纤激光器^[38~40]。

2 飞秒光纤激光器研究现状

2.1 掺镱(Yb)飞秒光纤激光器

在最近几年里,输出波长 $1\ \mu\text{m}$ 附近的光纤激光器以其优异的特性引起了人们的广泛关注。大多数高功率光纤激光器都是采用准三能级系统,输出波长在 $1020\sim 1100\ \text{nm}$ 之间,但是掺 Yb 光纤激光器在特定的条件下可以产生波长在 $976\ \text{nm}$ 的激光输出,可广泛应用于四波混频和频率转换等非线性光学效应^[24,30]。目前,高平均功率,微焦单脉冲飞秒掺 Yb 光纤激光器仍旧是研究方向之一。

2009 年 Büleüd Ortac 等^[41]用大模场面积的掺 Yb 光纤制作得到自启动的平均功率 $9\ \text{W}$ 的飞秒脉冲输出,重复频率 $9.7\ \text{MHz}$,脉冲能量 $927\ \text{nJ}$,接近微焦量级。该方案中激光器首先产生 $8\ \text{ps}$ 脉冲,然后压缩到 $711\ \text{fs}$ 。图 1 是该激光器实验装置。

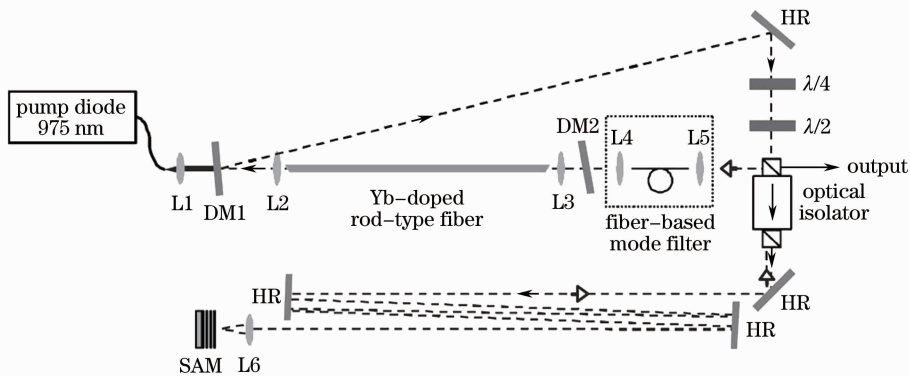


图 1 大模场面积的掺 Yb 飞秒光纤激光器

Fig. 1 Large mode-field area Yb-doped femtosecond fiber laser

2010 年 J. lhermite 等^[42]用掺 Yb 光纤作增益介质,利用非线性偏振技术在全正色散域锁模获得了中心波长在 $976\ \text{nm}$,重复频率为 $40.6\ \text{MHz}$,平均功率为 $480\ \text{mW}$ 的激光脉冲,经过腔外体光栅压缩后可获得 $286\ \text{fs}$ 的超短脉冲输出。图 2 为其工作原理图。

2010 年 K. Kieu 等^[32]用掺 Er 光纤激光器产生脉冲后,经掺铒光纤(EDF)放大展宽后,再由 SMF28 光纤对脉冲进行压缩进入高非线性光纤(HNLF)后获得超连续谱($1\sim 2\ \mu\text{m}$)抽运掺 Yb 光纤并放大后获得高能量的超短脉冲输出,经过腔外体光栅压缩后可获得 $135\ \text{fs}$ 和 $11.5\ \text{W}$ 平均功率的超短脉冲输出,实验装置如图 3 所示。此系统由于采用了光损伤阈值较高的碳纳米管透射式锁模,同时经过多次增益,所以提高抽运功率时可获得更大的能量输出。该系统抽运源采用掺 Er 光纤激光器,但其振荡器部分是掺 Yb 光纤,输出是 $1\ \mu\text{m}$ 的飞秒激光脉冲,属于掺 Yb 飞秒光纤激光器。使用掺 Er 光纤激光器便于和掺 Yb 光纤振荡器连接,用 $980\ \text{nm}$ 激光对掺 Er 光纤激光器抽运和放大后,残留的 $980\ \text{nm}$ 的激光仍然可以被 Yb 掺杂光纤振荡器吸收,从而省去了对 Yb 掺杂光纤振荡器输出的预放部分的抽运。

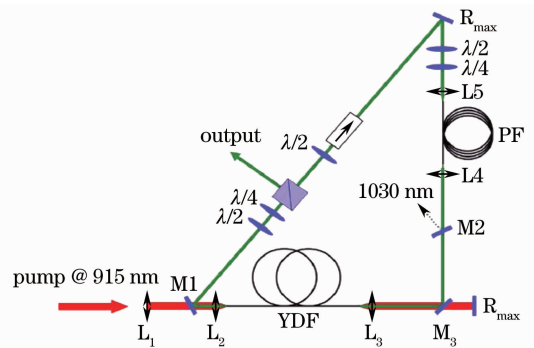


图 2 掺 Yb 飞秒光纤激光器

Fig. 2 Yb-doped femtosecond fiber laser

2011 年 Hädrich S. 等^[30]研究了通过两级放大获得高平均输出功率的飞秒掺 Yb 光纤激光器,并用 BBO 晶体对输出飞秒脉冲进行了倍频输出。该系统在中心波长 $1040\ \text{nm}$ 运转时有不同的重复频率,系统经过二级预放和一级主放获得足够能量的脉冲,经光栅对压缩后得到 $406\ \text{fs}$,平均功率 $225\ \text{W}$ 的脉冲输出。如果采用 $0.5\ \text{mm}$ 厚的 BBO 晶体对输出脉冲进行倍频,在重复频率 $5.25\ \text{MHz}$,波长 $520\ \text{nm}$ 时产生 $135\ \text{W}$ 的最大

平均输出功率。2010年 xiaomin Liu 等^[43]使用两段光子晶体光纤和掺 Yb 光纤,并使用 SESAM 实现自启动锁模,经放大和压缩后得到 297 fs, 7.3 nJ 的脉冲输出。其中一段光子晶体光纤用于振荡器中的色散补偿和非线性管理。腔外的一段光子晶体光纤(PCF)用于脉冲压缩。该飞秒激光器的性能十分稳定,在连续四天的运转中未发现调 Q 锁模现象发生。图 4 为该实验装置。

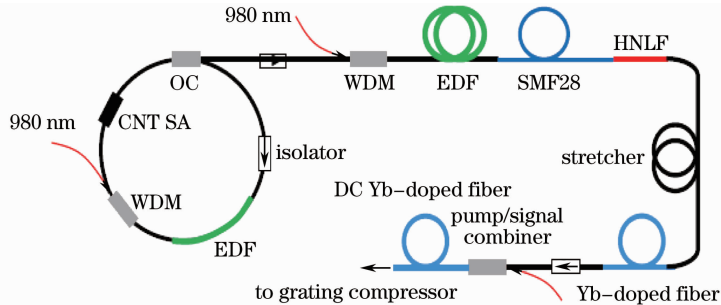


图 3 使用掺 Er 光纤激光器抽运的 $1 \mu\text{m}$ 飞秒激光脉冲输出

Fig. 3 Femtosecond pulse output at $1 \mu\text{m}$ pumped by Er-doped fiber laser

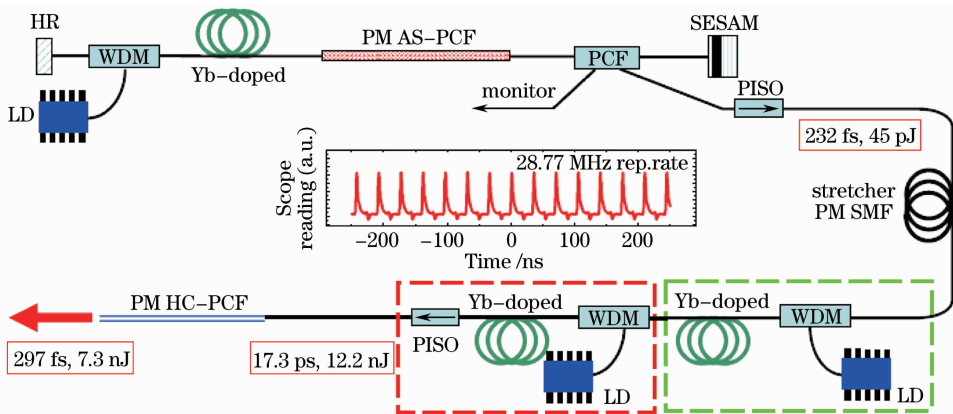


图 4 基于光子晶体光纤的飞秒光纤激光器

Fig. 4 Femtosecond fiber laser based on PCF

2011年 J. lhermite 等^[44]又利用纤芯和包层直径分别为 $80 \mu\text{m}$ 和 $200 \mu\text{m}$ 的掺镱棒状光纤作为增益介质产生了中心波长为 976 nm , 单脉冲能量为 500 nJ , 脉冲宽度为 460 fs , 重复频率 8.4 MHz , 平均功率 4.2 W 的超短脉冲输出。图 5 为其工作原理图。振荡器部分的光纤全部为正常色散, 所以出射的激光脉冲为 14.2 ps 的啁啾脉冲, 该脉冲经过腔外光栅对 (1740 line/mm) 压缩后获得 460 fs 的脉冲。

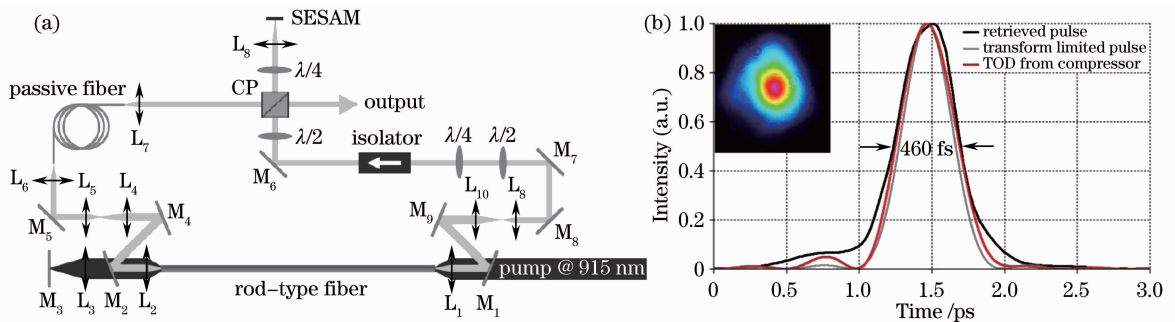


图 5 (a) 基于掺 Yb 的棒状晶体光纤飞秒激光器; (b) 压缩后的脉冲和计算的脉冲比较, 包含压缩器和非线性效应引入的三阶色散对脉冲的影响(插图为输出光的远场分布)

Fig. 5 (a) Femtosecond fiber laser based on Yb-doped rod fiber; (b) temporal profile of the compressed pulse compared to the calculated transform-limited pulse and the computed pulse, including the remaining TOD from the compressor and nonlinearities (Inset, far-field image of the output beam)

由于用于锁模的 SESAM 光损伤阈值较低,且只能用于线性谐振腔的反射式锁模,因此限制了输出功率的进一步提高。

2011 年美国密歇根大学的 Bai Nie 等^[45]设计了一种双包层掺镱全正常色散飞秒光纤激光器,该激光器具有一个窄的内腔式滤光器,产生的脉冲能量 22 nJ,重复频率 42.5 MHz。通过多光子脉间干涉相位扫描技术将脉冲压缩到 42 fs,单脉冲能量 10 nJ。如果使用大模场直径掺杂光纤,该振荡器的输出还可以进一步提高。

2011 年天津大学张玉颖等^[46]报道了一种工作于全正常色散区,具有自由耦合输出特点,腔型结构极为简单的高功率被动锁模飞秒光纤激光器。该激光器利用具有极低非线性系数的掺 Yb³⁺ 双包层大模场面积光子晶体光纤作为激光增益介质,光纤一端打磨成光滑的零度角作为一端腔镜及自由耦合输出端,提供 4% 的反馈光用于维持腔内激光振荡。利用 SESAM 启动并维持稳定锁模,直接输出得到平均功率 2.5 W,脉冲宽度 2 ps 的高功率超短脉冲,对应单脉冲能量 44 nJ,脉冲经腔外压缩至 430 fs。同年,北京大学李鹏等^[47]研制成功重复频率 330 MHz 掺镱光纤飞秒激光器。该方案采用高增益光纤,将光纤式隔离器替换为 4 mm 长的自由空间隔离器。使用短焦距的小型准直器,以减小准直器的尾纤长度,并设计了新型抽运耦合装置,大大缩短了腔内光纤的长度。同时,根据增益光纤以及激光器中其他光纤的色散系数,用光栅对补偿色散。在 600 mW 半导体激光器抽运下,最高平均输出功率 70 mW。脉冲的重复频率 330 MHz,脉宽为 48 fs。该方案通过优化腔长和新型的抽运耦合装置极大缩短腔长,从而获得很高的重复频率。

以上方案除了美国密歇根大学的 Bai Nie 设计的双包层掺镱全正常色散飞秒光纤激光器之外均对振荡器的输出脉冲进行了放大,提高了单脉冲能量,但是系统复杂性和成本提高。同时,所有方案均对振荡器输出脉冲进行了压缩,从而输出更短的脉冲和更高的峰值功率。

2.2 掺铒(Er)飞秒光纤激光器

掺铒光纤激光器具有结构简单,调谐范围宽等特点。同时由于能发射波长在 1.5 μm 附近的激光,可用作光纤通信系统的光源^[26]。全光纤化和高重复频率以及可调谐掺 Er 飞秒光纤激光器是未来研究方向。2009 年 Alexey Andrianov 等^[48]通过掺铒光纤放大器和色散降低光纤(DDF)、高非线性单模光纤(HNSF)和普通单模光纤(SMF-28)对被动锁模的掺铒振荡器输出的 230 fs,600 MHz 波长为 1.57 μm 的脉冲进行放大和压缩,并得到 20~25 fs,调谐范围为 1.57~2.1 μm 的飞秒激光输出。图 6 的实验装置中 36 m 的 DDF 主要用其孤子压缩效应和拉曼频率调谐效应,对放大后的飞秒脉冲进行初步压缩到 50~60 fs 和频率调谐至 1.57~2.1 μm 。紧随其后的 HNSF 光纤则利用其非线性效应产生超连续谱,最后的 SMF-28 光纤则对脉冲进一步压缩并输出。

2010 年 D. Ma 等^[37]使用掺 Er 环形腔飞秒光纤激光器不经过腔外压缩直接产生目前该类型激光器中最短的 34.7 fs 的激光脉冲,重复频率为 225 MHz,单脉冲能量 0.31 nJ。图 7 为该光纤激光器的原理图。通过环形腔内光纤的非线性偏振作用锁模。抽运功率达到 700 mW 时,输出平均功率 70 mW,脉冲能量 0.31 nJ。同时,该研究表明降低光纤的群延迟色散(GDD)可以增加腔内的非线性效应,从而形成更短的飞

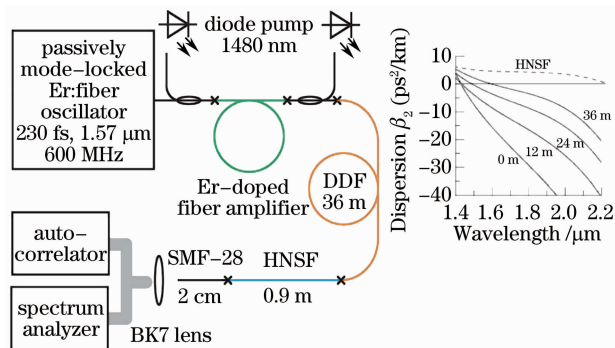


图 6 基于 DDF 和 HNSF 光纤的掺铒飞秒光纤激光器

Fig. 6 Er-doped femtosecond fiber laser based on DDF and HNSF

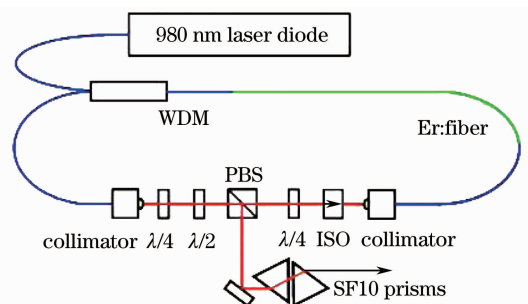


图 7 掺 Er 环形腔光纤飞秒激光器实验原理图

Fig. 7 Er-doped ring cavity femtosecond fiber laser

秒脉冲和更宽的频谱。

2010年 Chengbo Mou 等^[49]使用 45° 倾斜的光纤光栅对被动锁模的掺铒飞秒光纤激光器进行输出波长调谐, 由于该光纤光栅具有很宽的偏振响应范围, 从而可以通过调节光纤腔内的偏振控制器就可对输出波长进行 1548~1562 nm 的调谐。该实验方案使用光纤型光栅, 和传统的体光学器件相比具有插入损耗小、便于实现激光器全光纤化等优点。图 8 和图 9 给出了该实验中的倾斜光纤光栅显微照片和实验原理图。

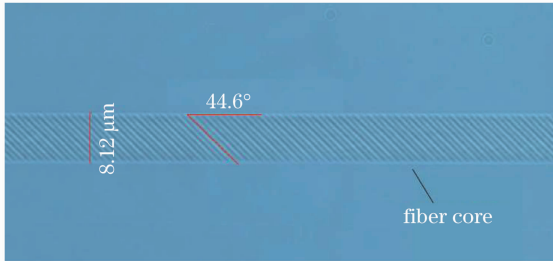


图 8 45° 倾斜的光纤光栅

Fig. 8 45° tilted fiber grating

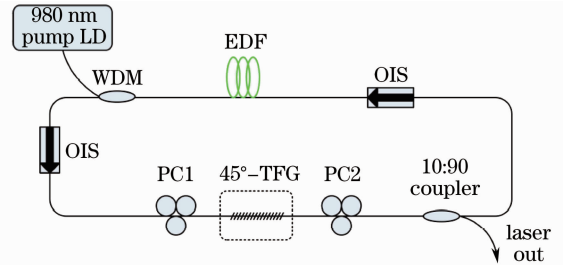


图 9 波长可调谐的掺铒飞秒光纤激光器

Fig. 9 Wavelength-tunable Er-doped femtosecond fiber laser

2010年北京张志刚等^[50]实现了小抽运功率下在掺铒光纤激光器重复频率达到 250 MHz 的锁模运转, 中心波长 1550 nm, 半峰全宽 58 nm, 脉宽 45.5 fs。该方案通过缩短腔长提高脉冲重复频率, 采用高增益光纤; 将光纤式隔离器替换为 4 mm 薄的空间隔离器; 采用小焦距的准直器, 以减小准直器的尾纤长度。同时, 根据增益光纤以及激光器中所用其他光纤的色散率数据计算出最佳长度比例来平衡正负色散, 以改进锁模状态。由于采用了自由空间光隔离器, 所以破坏了系统的全光纤化, 但该方案为光纤激光器用于频率梳方面具有积极作用。

Alexey Andrianov 等的方案使用不同的特种光纤和单模光纤对主振荡器输出脉冲进行放大和压缩后获得 20~25 fs, 调谐范围为 1.6~2.1 μm 的优异的飞秒激光输出, 但该系统结构较为复杂, 成本较高。D. Ma 等使用环形腔直接输出目前最短的 34.7 fs 的激光脉冲, 该研究同时指出通过降低光纤的 GDD 还可以进一步压缩脉冲宽度。在很大程度上降低了系统的复杂度和成本, 具有十分重要的意义。Chengbo Mou 等使用 45° 倾斜的光纤光栅对被动锁模的掺铒飞秒光纤激光器的输出波长进行 1548~1562 nm 的调谐, 该实验方案使用光纤型光栅具有插入损耗小、便于实现激光器全光纤化等优点。

2.3 掺铥 (Tm) 飞秒光纤激光器

由于掺铥光纤激光器的发射波长在 2 μm 附近, 属于人眼安全波段范围。掺铥光纤激光器由于能级交叉弛豫的存在导致其具有很高的光-光效率, 因此近年来掺铥光纤激光成为研究的热点^[51~53]。

2010年 Qingqing Wang 等^[54]在 1935 nm 波长处使用掺 Er 光纤对掺 Tm 的腔内反常色散进行补偿, 通过非线性偏振旋转锁模直接输出单脉冲能量 4.8 nJ, 平均功率 20 mW, 重复频率 4.2 MHz, 235 fs 的超短脉冲。2011年康奈尔大学的研究人员, 使用正常色散锁模铥光纤激光器产生 0.4 nJ 的脉冲能量, 输出脉冲经过消除啁啾后为 470 fs^[55]。2012年 Frithjof Haxsen 等^[56]使用高非线性光纤和掺 Tm 光纤, 并通过非线性偏振演化 (NEP) 和半导体可饱和吸收镜混合锁模以及小芯径、大数值孔径光纤进行色散补偿, 得到单脉冲能量 0.7 nJ, 波长 1927 nm, 482 fs 的飞秒激光脉冲输出。2012年 Lih-mei Yang 等^[57]获得了重复频率为 2.5 MHz, 脉冲能量为 0.65 μJ, 脉宽为 820 fs 的超短脉冲输出, 但是在该实验中由于三色散未得到补偿, 从而使输出脉冲展宽同时产生了二次啁啾。

2.4 掺铥 (Ho) 飞秒光纤激光器

掺 Ho 离子的增益介质和 Tm 掺杂的增益介质输出波长为 2 μm 的激光器是近来的研究热点。它们具有较宽的增益谱和高的增益因子。由于直接抽运 Ho 光纤激光器的 1120~1160 nm 高亮度和高质量抽运源的缺乏, 所以掺铥飞秒光纤激光器一直进展缓慢。直到 2012年 A. Chamorovski 等^[58]才首次给出由中心波长为 1160 nm 的半导体碟片激光器抽运的被动锁模飞秒光纤激光器。图 10(a) 是激光器的方案图。其中的锁模元件分别使用了碳纳米管 (CNT) 和 SESAM, 二者锁模输出由图 10(b) 和图 10(c) 给出。该实验在 2085 nm 处产生了 890 fs, 46 mW 的脉冲输出, 该波长是目前飞秒光纤激光器最长的输出波长。

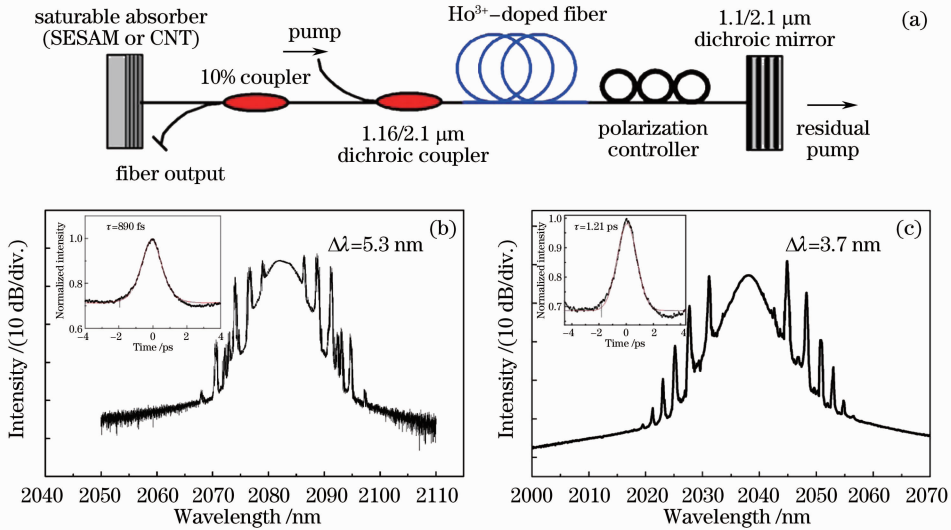


图 10 (a)掺 Ho 的飞秒光纤激光器;(b) CNT 被动锁模输出;(c) SESAM 被动锁模输出
 Fig. 10 (a) Ho-doped femtosecond fiber laser; (b) CNT passively mode-locking output;
 (c) SESAM passively mode-locking output

3 稀土离子混合掺杂飞秒光纤激光器

3.1 铥钬离子混合掺杂飞秒光纤激光器

对使用铥离子和钬离子混合掺杂作为增益离子的飞秒光纤激光器的研究相对较少。由于 Tm-Ho 离子之间的能量传递上转换会削弱 Tm 离子³F₄ 能级的激发态离子数目,同时会产生大量的热,所以 Tm-Ho 光纤激光器在使用时必须采取强制制冷措施以提高光-光转换效率和降低激光器的阈值,但是由于 Tm-Ho 共掺光纤激光器输出波长调谐范围为 1950~2150 nm,同时 Tm-Ho 共掺光纤激光器可以高效直接抽运光纤激光器产生 3~5 μm 的可调谐激光输出。

2007 年芬兰的 Kivistö 等^[38] 给出一种 Tm-Ho 共掺的飞秒光纤激光振荡器,并辅以 Tm-Ho 共掺的光纤放大器得到 150 fs,中心波长 2150 nm,平均功率 230 mW,峰值功率 27 kW 的激光输出。主振荡器通过基于铽化物的 SESAM 锁模得到 750 fs。通过 Tm-Ho 共掺的光纤放大器中的孤子自频移对主振荡器输出的脉冲进行压缩得到 150 fs 的脉冲输出。同时,改变放大器抽运功率可以获得波长 1970~2150 nm 的可调谐输出。

2011 年 Kivistö 利用光钟产生的光信号对光纤激光器的 SESAM 进行振幅调制,把 Tm-Ho 共掺的锁模光纤激光器输出的 600 fs,1990 nm 的脉冲序列同步到一个外部参考光源上。该参考源是一个由光钟信号驱动的 1560 nm 的分布反馈式激光二极管。通过这种同步方法可以对飞秒激光器脉冲的重复频率进行调谐^[39]。实验原理如图 11 所示。上面的虚线框是一个 1560 nm 的光钟信号,其通过一个波分复用耦合器耦

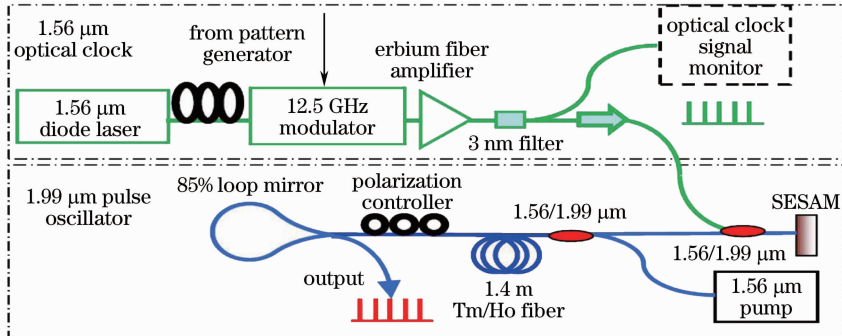


图 11 光钟信号同步的 Tm-Ho 光纤激光器

Fig. 11 Tm-Ho-doped fiber laser synchronized to optical clock signal

合到下面虚框中的振荡器中,并对 SESAM 进行调制,从而导致主振荡器和光钟同步输出飞秒脉冲。该激光器的特点是通过调节光钟信号参数和增加主振荡器的抽运功率就可以对主振荡器的重复频率进行调节。

以上两种方案均输出飞秒激光脉冲,但是第一种方案对脉冲进行了压缩使主振荡器的输出脉冲压缩到 150 fs 输出,通过改变放大器抽运功率对输出波长进行调谐,系统结构相对简单。第二种方案未压缩振荡器输出脉冲,而是通过改变外部光钟信号和振荡器抽运功率对输出脉冲的重复频率进行调谐,结构相对复杂。

3.2 铒镱共掺杂飞秒光纤激光器

2006 年 Dmitriy Panasenko 等^[40]使用 20 cm 的 Er-Yb 共掺的光纤为增益介质,激光器是环形腔设计。通过 1.9 m 的普通单模光纤中的非线性偏振作用形成飞秒脉冲,PZ 光纤是光纤型起偏器,可获得 80% 的偏振消光比。该飞秒激光器特点之一是,只需通过调整偏振控制器(PC),激光器的重复频率可以在 1.7~7.2 GHz 变化,对应的脉冲宽度变化范围为 300~570 fs,输出平均功率为 1.1 W,单脉冲最大峰值功率为 1 kW。图 12 为该激光器的原理图。

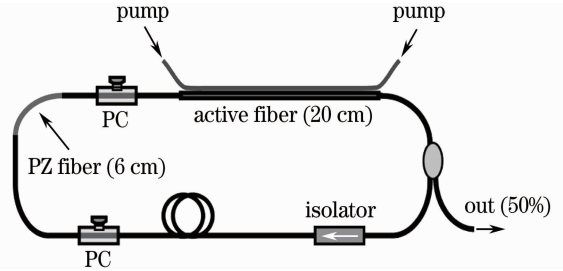


图 12 铒镱共掺飞秒光纤激光器

Fig. 12 Er-Yb-doped femtosecond fiber lasere

4 结束语

光纤激光器从产生到现在的二十多年以来无论从理论上还是实验上都取得了很大的发展,如啁啾脉冲放大技术的出现,可将光纤激光器输出脉冲峰值功率达到太瓦(10^{12} W)甚至拍瓦(10^{15} W)量级。同时以光纤光栅、光子晶体光纤等为基础的新型激光器件的出现,为光纤激光器的研究开辟了新思路。但是光纤激光器仍然有许多缺点:1) 非线性效应限制了光纤激光器峰值功率的进一步提高。针对这个问题应该从大芯径光纤设计入手,通过合理设计光纤内部的折射率和芯径形状得到适合大功率光纤激光器使用的增益光纤和传输光纤。另外,可以采用相干合成技术通过多个功率较小的飞秒光纤激光器合成得到高功率输出。以上都可以在一定程度上解决光纤非线性对输出光束质量和功率的制约。2) 当腔内功率密度极高时,光纤内部和端面的热损伤等问题。在极高功率密度时,由于光纤内部杂质离子和介质本征缺陷的存在以及光纤端面吸附灰尘等因素影响可能会产生热损伤,甚至从端面开始引起光纤自燃。针对这一问题,应该在制作光纤时提高光纤的光学质量和光学均匀性,降低光纤内部杂质含量。采用大芯径薄包层的光纤也是可以采用的方式。大功率飞秒光纤激光器及其抽运源应在超净室内工作使用,并使光纤端面保持干净。当然大功率飞秒光纤激光器的制冷系统也是解决光纤散热问题的一个重要方面。3) 全光纤结构。以上各种类型的飞秒光纤激光器中基本都包含体光学器件,这样会降低光纤激光器和传统激光器的优势,所以提高光纤激光器中光学器件的光纤化从而实现真正意义上的全光纤飞秒激光器是未来努力方向之一。

基于以上讨论,认为未来光纤激光器的研究除了应朝着更高功率、更窄脉宽、转换效率更高和全光纤化等趋势发展之外,还应该提出新的光纤设计技术、并开发新型光纤材料、更加可靠稳定的锁模技术和色散管理技术用于产生输出性能更加优异的飞秒光纤激光器。

参 考 文 献

- 1 Li Benye, Jiang Lan. Femtosecond laser fabrication of long period fiber gratings and applications in refractive index sensing [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2011, **43**(8): 1420~1423
- 2 Grobnic, Dan, Mihailov, Stephen J.. Self-packaged Type II femtosecond IR laser induced fiber Bragg grating for temperature applications up to 1000 °C [C]. *SPIE*, 2011: 77530J
- 3 A. Arai, J. Xu, G. C. Cho. Applications of femtosecond fiber lasers in material processing [C]. 2011 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & 12th European Quantum Electronics Conference, 2011. 1
- 4 Lu Ping, Chen Qiyong. Femtosecond laser microfabricated fiber Mach-Zehnder interferometer for sensing applications [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(2): 268~270
- 5 L. Shah, A. Y. Arai, S. M. Eaton *et al.*. Waveguide writing in fused silica with a femtosecond fiber laser at 522 nm and

- 1 MHz repetition rate[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(6): 1999~2006
- 6 S. M. Eaton, W. Chen, L. Zhang *et al.*. Telecom-band directional coupler written with femtosecond fiber laser[J]. *IEEE Pho. Technol. Lett.*, 2006, **18**(20): 2174~2176
- 7 Bovatsek, A. Arai, C. B. Schaffer. Three-dimensional micromachining inside transparent materials using femtosecond laser pulses; new applications[C]. CLEO/QELS and PhAST Technical Digest, 2006, CThEE
- 8 F. Yoshino, J. Bovatsek, A. Arai *et al.*. High energy-high repetition rate fiber laser system for precision micromachining with fundamental and second harmonic wavelengths[J]. *Laser Micro Nanoeng.*, 2006, **1**(3): 258~263
- 9 Hönninger Clemens, Plötnerb Marco, Ortaç Bülemd *et al.*. Femtosecond fiber laser system for medical applications[C]. *SPIE*, 2009, **7203**: 72030W
- 10 A. V. Balakin, O. G. Okhotnikov, I. A. Ozheredov *et al.*. Application of amplified femtosecond ytterbium fiber laser for the THz time-domain spectroscopy[C]. Conference Digest of the 2006 Joint 31st International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics, 2007. 247
- 11 M. A. Gubin, A. N. Kireev, A. V. Tausenev *et al.*. Femtosecond Er³⁺ fiber laser for application in an optical clock[J]. *Laser Physics*, 2007, **17**(11): 1286~1291
- 12 He Hao, Chan Kam Tai, Kong Siu Kai *et al.*. Targeted photoporation and transfection in human HepG2 cells by a fiber femtosecond laser at 1554 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(24): 2961~2963
- 13 Cheng Ya, Xu Jian, Xu Zhizhan *et al.*. Femtosecond laser integration for biophotonic applications-A "Magic Brush" in the Micro/Nano-World[C]. 2008 Asia Optical Fiber Communication and Optoelectronic Exposition and Conference, 2008, 1~3
- 14 A. C. Millard, Lei Jin, L. M. Loew. Second harmonic generation imaging microscopy with a high-power ultrafast fiber laser[C]. *SPIE*, 2005, **5714**(1): 92~98
- 15 X. L. Tong, H. Q. Wen, D. S. Jiang *et al.*. Characterization of polymer microtip array coated GaN thin film using femtosecond pulsed laser deposition[C]. Asia Optical Fiber Communication and Optoelectronic Exposition and Conference, 2007, 151~153
- 16 Haohua Tu, Zhi Jiang, Daniel L. Marks *et al.*. Chirped four-wave mixing in the largely normal dispersion regime from femtosecond Pulse-pumped photonic crystal fiber[C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 719520
- 17 T. Eidam, F. Röser, O. Schmidt *et al.*. 57 W, 27 fs pulses from a fiber laser system using nonlinear compression[J]. *Appl. Phys. B: Lasers & Opt.*, 2008, **92**(1): 9~12
- 18 曹士英, 孟 飞, 林百科 等. 基于掺 Er 光纤飞秒激光器的光学频率梳的精密锁定[J]. 中国激光, 2011, **38**(12): 1215003-6
- 19 Sze Yset, Hiroshi Yaguchi, Yuichi Tanaka *et al.*. Ultrafast fiber pulsed lasers incorporating carbon nanotubes[J]. *IEEE Selected Topics in Quant. Electron.*, 2004, **10**(1): 137~146
- 20 Shinji Yamashita, Yusuke Inoue, Kevin Hsu *et al.*. 5 GHz pulsed fiber fabry-perot laser mode-locked using carbon nanotubes[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(4): 750~752
- 21 J. R. Buckley, F. W. Wise. Self-similar femtosecond fiber lasers with pulse energies above 10 nJ[C]. Advanced Solid-State Photonics (Optical Society of America) WE5, 2005
- 22 F. Ö. Day, J. Chen, F. X. Kärtner. High-energy, single-mode, femtosecond fiber laser[C]. Advanced Solid-State Photonics (Optical Society of America) MF3, 2005
- 23 J. W. Nicholson. Advances in Femtosecond Fiber Lasers [C]. Advanced Solid-State Photonics (Optical Society of America), 2007, FMF2
- 24 J. Lhermite, G. Machinet, C. Lecaplain *et al.*. High-energy femtosecond fiber laser at 976 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(20): 3459~3461
- 25 Shih-Hsuan Chia, Tzu-Ming Liu, Anatoly A. Ivanov *et al.*. A sub-100 fs self-starting Cr: forsterite laser generating 1.4 W output power[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(23): 24087~24091
- 26 K. Kieu, R. J. Jones, N. Peyghambarian. High power femtosecond source near 1 micron based on an all-fiber Er-doped mode-locked laser[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(20): 21350~21355
- 27 Martin Baumgart, Florian Jansen. High average and peak power femtosecond large-pitch photonic-crystal-fiberlaser[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(2): 244~246
- 28 刘 江, 王 璞. 2.0 μm 石墨烯被动调 Q 掺铥全光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, **38**(10): 1008004-6
- 29 Peng Li, Aimin Wang. 330 MHz repetition rate femtosecond Yb: fiber ring laser[C]. OSA/CLEO, 2011, CMS4
- 30 S. Hädrich, J. Rotherhardt, T. Eidam *et al.*. High-average power second harmonic generation of femtosecond fiber lasers [C]. *SPIE*, 2011. 7914

- 31 Nam Seong KIM, Tai Hyun Yoon. Recent trends on industrial femtosecond fiber lasers[C]. Lasers, Sources, and Related Photonic Devices, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America), 2012, FW5C.5
- 32 K. Kieu, R. J. Jones, N. Peyghambarian. High power femtosecond source near 1 micron based on an all-fiber Er-doped mode-locked laser[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(20): 21350~21355
- 33 Enrico Seise, Arono Klenke, Sven Breikopf *et al.*. Coherently combined fiber laser system delivering 120 μ J femtosecond pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(4): 439~441
- 34 J. Lhermite, G. Machinet, Cardine Lecaplain *et al.*. 500 nJ mode-locked fiber laser at 976 nm[C]. OSA/CLEO, 2011, CMS1
- 35 Enrico Seise, Arno Klenke. 120 μ J pulses from coherently coupled femtosecond fiber laser systems[C]. OSA/ASSP, 2011, CMS1
- 36 Nan-Kuang Chen, Feng-Zhou Liu, Hsiu-Po Chuang *et al.*. Highly efficient femtosecond pulse stretching by tailoring cavity dispersion in erbium fiber lasers with an intracavity short-pass edge filter[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(7): 15880~15884
- 37 D. Ma, Y. Cai, C. Zhou *et al.*. 37.4 fs pulse generation in an Er: fiber laser at a 225 MHz repetition rate[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(17): 2858~2860
- 38 Samuli Kivistö, Tommi Hakulinen, Mircea Guina. Tunable Raman soliton source using mode-locked Tm-Ho fiber laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(12): 934~936
- 39 Kivistö Samuli. 600-fs mode-locked Tm-Ho-doped fiber laser synchronized to optical clock with optically driven semiconductor saturable absorber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(8): 477~479
- 40 Dmitriy Panasenkov, Pavel Polynkin, Alexander Polynkin. Er-Yb femtosecond ring fiber oscillator with 1.1-W average power and GHz repetition rates[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(7): 853~855
- 41 Bülend Ortaç, Martin Baumgartl, Jens Limpert *et al.*. Approaching microjoule-level pulse energy with mode-locked femtosecond fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(10): 585~587
- 42 J. Lhermite, G. Machinet, C. Lecaplain *et al.*. Femtosecond Fiber Oscillator at 976 nm[C]. OSA/ CLEO, 2011, CMD4
- 43 Xiaomin Liu, Jesper Lægsgaard, Dmitry Turchinovich. Highly-stable monolithic femtosecond Yb-fiber laser system based on photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(15): 15475~15483
- 44 J. Lhermite, G. Machinet, C. Lecaplain *et al.*. 500 nJ mode-locked fiber laser at 976 nm[C]. OSA/ CLEO, 2011, CMS1
- 45 Bai Nie, D. Pestov, F. W. Wise *et al.*. Generation of 42-fs and 10-nJ pulses from a fiber laser with self-similar evolution in the gain segment[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(13): 12074~12080
- 46 Zhang Yuying, Zhang Chi, Hu Minglie *et al.*. Free-output-coupler high-power all-normal-dispersion femtosecond photonic crystal fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 65~67
张玉颖, 张 驰, 胡明列. 自由耦合输出的高功率全正色散光子晶体光纤飞秒激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 65~67
- 47 李 鹏, 王爱民, 王 希 等. 北京大学研制成功重复频率 330 MHz 掺镱光纤飞秒激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0202009
- 48 Alexey Andrianov, Arkady Kim, Sergey Muraviov *et al.*. Wavelength-tunable few-cycle optical pulses directly from an all-fiber Er-doped laser setup[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(20): 3193~3195
- 49 Chengbo Mou, Hua Wang, Brandon G. Bale *et al.*. All-fiber passively mode-locked femtosecond laser using a 45°-tilted fiber grating polarization element[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(18): 18906~18911
- 50 宗伟健, 马 丁, 张志刚. 重复频率 250 MHz 掺铒光纤飞秒激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2724
- 51 Michelle Y. Sander, Sergey Frolov. 10 GHz femtosecond pulse interleaver in planar waveguide technology[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(4): 4103~4113
- 52 Z. Zhang, D. Y. Shen, A. J. Boyd *et al.*. High-power Tm-doped fiber distributed-feedback laser at 1943 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(18): 2059~2061
- 53 Jihong Geng, Qing Wang, Tao Luo *et al.*. Single-frequency narrow-linewidth Tm-doped fiber laser using silicate glass fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(22): 3493~3495
- 54 Qingqing Wang, Tong Chen, Kevin Chen. Mode-locked ultrafast thulium fiber laser with all-fiber dispersion management [C]. OSA/CLEO/QELS, 2010, CFK7
- 55 H. Liu, K. Kieu, Lefrancois *et al.*. Tm Fiber Laser Mode-Locked At Large Normal Dispersion CLEO 2011 Laser Science to Photonic Applications, 2011
- 56 Frithjof Haxsen, Dieter Wandt, Uwe Morgner *et al.*. Monotonically chirped pulse evolution in an ultrashort pulse thulium-doped fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(6): 1014~1016

- 57 Lih-Mei Yang, Peng Wan, Vladimir Protopopov. 2 μm femtosecond fiber laser at low repetition rate and high pulse energy [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(5): 5683~5688
- 58 A. Chamorovskiy, A. V. Marakulin, S. Ranta *et al.*. Femtosecond mode-locked holmium fiber laser pumped by semiconductor disk laser[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(9): 1448~1550