

文章编号: 1001-3806(2016)03-0307-04

基于啁啾脉冲放大的掺铒全光纤结构激光器

李浪, 刘洋, 王超, 潘海峰*

(华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 为了使全光纤结构啁啾脉冲放大实现超短激光的脉冲输出, 采用色散补偿光纤对种子脉冲进行了展宽, 利用普通单模光纤来实现放大后脉冲的压缩。对整体激光系统进行了理论分析和实验验证, 获得了 420fs 的超短激光脉冲, 平均功率达到 1.81W。并利用周期极化的铌酸锂晶体对放大激光脉冲进行倍频, 将激光波长拓展到近红外的 780nm 附近, 光谱半峰全宽达到 11nm。结果表明, 在全光纤结构的掺铒光纤激光系统中, 可以通过改变色散光纤的插入量对脉冲展宽和压缩过程中光谱畸变进行有效的控制。这一结果对于实现高功率的全光纤超短脉冲放大系统是有帮助的。

关键词: 光纤放大器; 全光纤结构; 啁啾脉冲放大; 掺铒光纤激光器

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.001

Er-doped all fiber lasers based on chirped-pulse amplification

LI Lang, LIU Yang, WANG Chao, PAN Haifeng

(State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: In order to achieve ultrashort laser pulse output by all fiber chirped pulse amplification technique, dispersion compensation fiber and single mode fiber were used to stretch and compress the laser pulse in the time domain, respectively. The laser system was structured by three components: oscillator, pre-amplifier and main amplifier. The whole laser system was verified theoretically and experimentally. Ultrashort pulse laser with pulse duration of 420fs and average power of 1.81W was obtained. One piece of periodically poled lithium niobate crystal was employed to yield second-harmonic generation, so that the operating wavelength was extended to near infrared region centered at 780nm with full width at half maximum of 11nm. The results show that the spectra distortion can be precisely controlled during the whole amplification process by adjusting the insert dispersion. The study could be very helpful for study on high power all fiber ultrashort fiber amplifiers.

Key words: fiber amplifier; all fiber structure; chirped pulse amplification; Er-doped fiber laser

引言

以稀土掺杂光纤作为增益介质的光纤激光器, 具有高的抽运效率、宽的增益带宽、良好的热光学特性以及体积小和易于维护等优点^[1]。其中, 掺铒光纤激光器由于其工作波长在 1.5 μm 波段而广受关注。掺铒光纤激光器发射激光具有人眼安全的特性^[2], 且发射波段位于大气及光纤的“窗口”, 早期的研究多集中于在通信光源领域的研究^[3-4]。然而随着铒镱共掺技术的发展, 铒光纤激光系统在高功率输出、超短脉冲产生、精密光谱控制等方面也表现出了强大的优势^[5-8], 在激光雷达、激光测距、遥感、环境检测、高精度检测、医疗设备等方面得到了广泛的应用和研究。相对于掺

铒的光纤系统, 掺铒的超快高功率激光系统能够支持更宽的相干光谱输出, 这决定了其在精密光谱测量领域有更多的应用。此外, 经过简单的倍频, 高功率超短脉冲掺铒光纤激光系统可以将输出波长扩展到 800nm 附近, 利用传统的钛宝石激光系统的成熟器件, 实现对输出激光的精密操控, 充分发挥全光纤系统稳定性好、易于维护、光电效率高、体积小、易于模块化的优点。

在脉冲光纤激光放大系统中, 高峰值功率的脉冲激光由于自相位调制、受激喇曼散射等非线性效应的作用很容易产生畸变。为了解决这一问题, 作者在光纤激光放大器中采用啁啾脉冲放大结构^[9]。啁啾脉冲放大技术是在放大之前, 用正色散元件将脉冲进行时域展宽。脉冲经时域展宽以后, 其峰值功率下降, 这样就能有效地减少脉冲在放大过程中的非线性效应, 获得更高功率的脉冲输出。放大后的脉冲再经负色散元件进行压缩, 就能得到短脉冲的高功率激光输出。基于啁啾脉冲放大技术的光纤激光器系统已经能够得到高能量^[10]和高平均功率^[11]的飞秒脉冲。飞秒啁啾

基金项目: 上海市科委科技基金资助项目(14QA1401600)

作者简介: 李浪(1990-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光纤激光器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: hfpan@phy.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2015-04-02; 收到修改稿日期: 2015-05-28

脉冲放大系统通常由振荡器提供飞秒量级的种子脉冲,由脉冲展宽器将种子脉冲展宽为皮秒量级,由预放大级和主放大级将激光脉冲单脉冲能量放大,最后由脉冲压缩器将激光脉冲重新压缩回飞秒量级。现有的采用啁啾脉冲放大技术的光纤激光器系统,大多使用空间器件例如光栅来对脉冲进行展宽或者压缩^[12],通常需要精确的光路准直以及耦合,这将大大增加系统的复杂度且不利于系统的集成与稳定运行。全光纤结构的放大系统能充分发挥光纤激光器系统易于搭建、结构紧凑的优点,能有效克服这些问题,获得稳定的高功率激光输出。

对于全光纤结构的啁啾脉冲放大系统,最主要的技术难点在于采用光纤或者光纤结构的器件来实现种子激光脉冲的展宽和放大后高能量激光脉冲压缩。作者介绍了一套基于啁啾脉冲放大技术的全光纤结构掺铒放大器系统,利用色散补偿光纤和单模光纤实现传输激光脉冲的正负色散控制,精确调整色散光纤的长度,实现了飞秒量级的啁啾脉冲放大激光输出。作者还使用周期极化的铌酸锂晶体(periodically poled lithium niobate, PPLN)对激光脉冲进行倍频,观察到了中心波长在 780nm 的二次谐波激光输出。

1 实验装置

全光纤结构激光啁啾脉冲放大系统的实验装置图如图 1 所示。由一个基于非线性偏振旋转锁模的环形腔结构的光纤振荡器输出种子激光脉冲,环形腔中使用一段 70cm 长的掺铒单模光纤(single mode fiber, SMF)(Er-doped fiber, EDF)(OFS 公司,型号为 EDF-80)作为增益介质。振荡级抽运源选用的是最大输出功率为 500mW 的半导体激光器(laser diode, LD),并由一个 980nm/1550nm 的波分复用器(wavelength division multiplexer, WDM)耦合到环型腔中。偏振相关隔离器(isolator, ISO)用于控制激光的行进方向,并和两侧的偏振控制器(polarization controller, PC)一起来控制锁模的产生。将一个分光比为 30/70 的耦合输出器用作激光的输出。

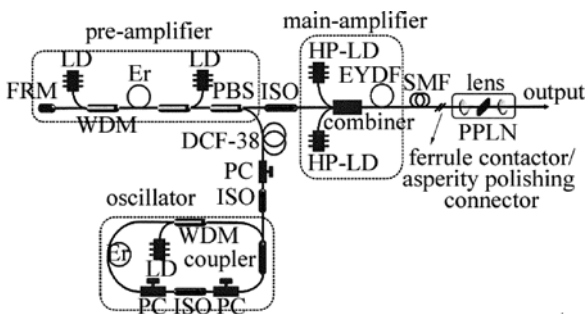


Fig. 1 Experimental setup

选用一段长度为 9.5m 的色散补偿光纤(dispersion compensating fiber, DCF)(型号为 DCF-38)对振荡级输出的种子激光脉冲进行展宽,它在 1550nm 处的色散值为 $-49\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}) \sim -30\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。DCF-38 光纤和单模光纤 SMF-28 模式匹配,可以直接进行熔接而引入较小的熔接损耗。展宽后的激光脉冲首先进入预放大级,为了避免预放大级回返光的影响,在振荡级和预放大级之间加入了一个光纤隔离器。预放大级采用一段 2m 长的 EDF-80 光纤作为增益介质,使用两个最高输出功率为 400mW 的半导体激光器作为抽运源进行双向抽运。为了进一步提高抽运效率,在预放大部分使用了双通放大的结构,在增益光纤后面加入一个光纤法拉第旋转镜(Faraday rotator mirror, FRM),种子光两次往返增益光纤得到充分放大。由于法拉第旋转镜的作用,经过预放大后的激光脉冲相对于输入的种子激光脉冲,其偏振态经历了一次 90° 的旋转。使用光纤偏振分束器(polarization beam splitter, PBS)将经过预放大后的激光脉冲输出,保证其有良好的激光偏振特性和脉冲对比度。

由于激光通过光纤偏振分束器进入预放大级,而振荡级输出的脉冲激光为非保偏态,使用了一个偏振控制器来调整进入偏振分束器的偏振态,以此来调整进入预放大级的脉冲激光功率。主放大级中使用的增益光纤为一段铒镱共掺的双包层光纤(Er/Yb co-doped double-clad fiber, EYDF)(型号为 EYDF-12/130),两个最大功率 8W 的多模半导体激光器(high power laser diode, HPLD)作为抽运源,抽运光经由抽运合束器耦合到主放大级增益光纤中,将预放大级传递过来的脉冲能量进一步放大。主放大后的激光脉冲经过一段型号为 SMF-28 的普通单模光纤进行压缩。最后使用一块 PPLN 晶体对啁啾脉冲放大后的激光脉冲进行倍频,得到了中心波长在 780nm 的二次谐波输出。

2 实验结果与讨论

当抽运功率为 50mW 时,基于非线性偏振旋转锁模的振荡器平均输出功率约为 3mW、重复频率为 62MHz 的稳定锁模激光脉冲序列。振荡器使用的掺铒增益光纤长度为 70cm,色散值为 $-48\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,因此脉冲光在整个腔中传输产生的色散值为负。测量得到的振荡级输出的光谱如图 2 所示,中心波长位于 1564nm,光谱的半峰全宽(full width at half maximum, FWHM)为 40nm。

首先使用长度为 9.5m 的色散补偿光纤对振荡级输出的脉冲进行时域上的展宽,展宽后的脉冲首先进入预放大级进行功率放大。在这一部分中,对于色散

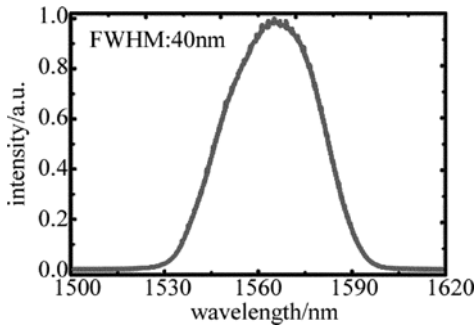


Fig. 2 Output spectra of the oscillator

量的控制是至关重要的。首先,预放大级中需要放置一定长度的单模光纤提供合适的正色散量,这种色散量的补偿能够保证脉冲传输过程中不会发生分裂,不至导致单脉冲能量降低,脉冲对比度的下降。另一方面,由于预放大中的增益光纤会存在增益窄化效应,对传输中的脉冲光谱产生一定的调制。因此,对色散量的精确控制能够有效地保护预放大输出的激光脉冲光谱呈近高斯型,这样在经过主放大级激光脉冲能量进一步放大以后,还能够时域上压缩至飞秒量级。因此,在脉冲展宽和预放大级部分利用全光纤器件进行精确的色散量控制对于全光纤结构的啁啾脉冲放大系统是非常重要的技术关键部分。通过优化预放大级中单模光纤的长度,综合考虑增益窄化效应,得到了近高斯型光谱输出,预放大后脉冲半峰全宽为 8ps,平均功率为 100mW,预放大输出光谱形状和种子光光谱基本一致,光谱半峰全宽为 17nm,光谱以及脉冲宽度如图 3 所示。

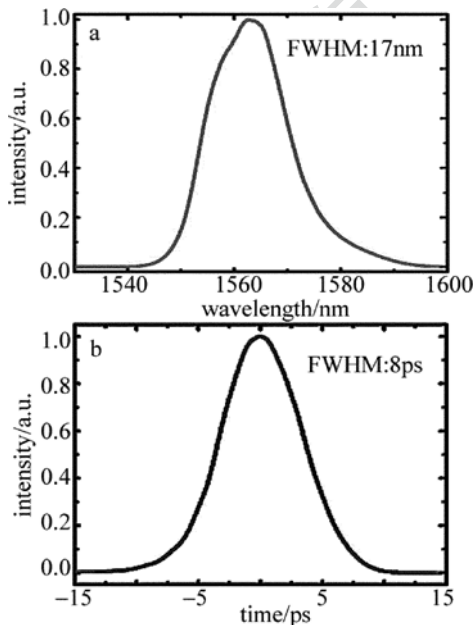


Fig. 3 a—output spectra the pre-amplifier b—pulse duration before the main amplifier

在主放大级的结构设计中选择了铒镱共掺的双包层增益光纤作为增益介质,铒镱共掺的光纤相比常规

单一铒掺杂的增益光纤具有更高的抽运效率,从而能够提高放大级的放大效率。预放大后的激光脉冲经抽运合束器耦合进入铒镱共掺双包层增益光纤进行放大。由两台最大功率为 8W 的多模半导体激光器对双包层增益光纤进行抽运。选用的铒镱共掺双包层光纤的纤芯直径为 12 μm ,能够保证以很高的耦合效率与单模光纤直接熔接,这对实现全光纤结构系统十分关键。经过主放大级后的激光脉冲的平均功率达到 1.81W,放大的斜率效率约为 17.3%,如图 4 所示。

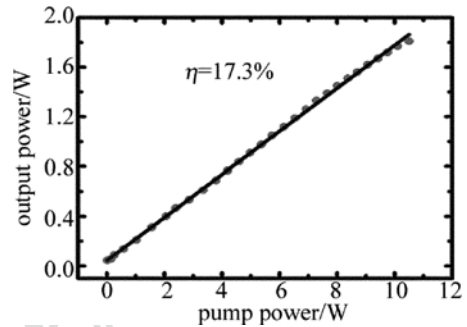


Fig. 4 Average power of the main amplifier vs. pump power

主放大级输出的激光脉冲光谱如图 5a 所示,由于主放大过程中非线性效应的作用输出光谱产生了一定的畸变。同时在增益光纤的增益窄化效应的进一步作

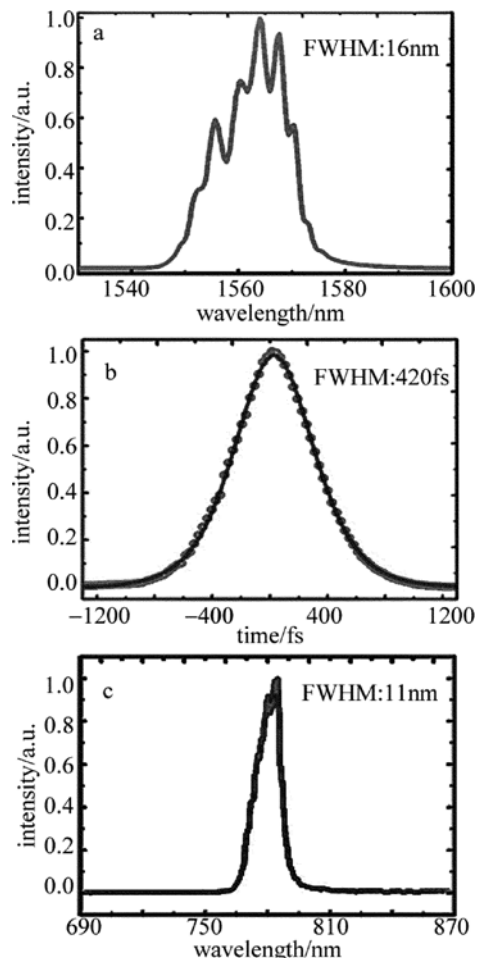


Fig. 5 a—spectra of the main amplifier b—pulse duration of the compressed pulse c—spectra of second harmonic generation pulses

用下,主放大光谱半峰全宽进一步下降至 16nm。为了保证啁啾脉冲放大系统的全光纤结构,使用了 15m 长的普通单模光纤 SMF-28 代替传统的光栅或者棱镜作为压缩器,对主放大后脉冲进行压缩,最后得到了脉冲半峰全宽仅为 420fs 的超短脉冲,如图 5b 所示。但是单模光纤具有较小的模场直径,对高能量激光脉冲的压缩会引入较强的非线性效应,引起光谱畸变、脉冲分裂等效应,导致不能将激光脉冲压缩至飞秒量级。因此在系统设计中控制抽运光功率在合理范围,虽然一定程度上限制了放大系统的输出功率,但也有效地保证了啁啾脉冲压缩可以得到飞秒量级的激光脉冲输出。

为了实现全光纤结构的系统设计思路,严格控制了脉冲展宽部分的色散补偿光纤插入量,用更长的色散补偿光纤虽然可以把脉冲展宽能更宽,但是也同样会引入更多的高阶色散,对后面的放大和压缩会产生不利的影 响。在实验系统中,预放大之前控制脉冲展宽到 8ps,这种情况下由于脉冲占空比有限,导致主放大中的放大效率只有 17.3%。为了克服这些不利的因素,在进一步改进啁啾脉冲放大系统可以使用空芯光子带隙光纤来对脉冲进行压缩^[13],并且使用更大模场面积^[11]的增益光纤来对脉冲进行放大,有效地减少放大过程中不利的非线性效应,在保证全光纤结构的同时获得更高的功率输出。

使用 PPLN 晶体尝试获得主放大级输出脉冲的二次谐波输出,将光谱范围拓展至 800nm 附近。图 5c 表示的是压缩后的脉冲激光经 PPLN 晶体倍频后得到的二次谐波的光谱,中心波长在 782nm,光谱半峰全宽为 11nm。由于实验条件的限制,使用的 PPLN 晶体的极化反转周期与放大级输出激光波长不十分匹配,且 PPLN 晶体没有使用温度控制装置,导致二次谐波产生没有处在最优化的相位匹配条件下,因此转换效率比较低。但尽管如此,还是观察到了清晰的二次谐波产生,也表明经过啁啾脉冲放大的激光脉冲具有很好的单脉冲能量和峰值强度。

3 小 结

介绍了一种全光纤结构的掺铒啁啾脉冲放大系统,获得最大功率为 1.81W 的高功率超短脉冲输出,经单模光纤压缩后,脉冲半峰全宽为 420fs。本文中发展的全光纤结构的掺铒啁啾脉冲放大系统有着结构紧凑、工作稳定等优点。采用更好的光纤展宽和压缩器件,以及更大模场面积的增益光纤,使用多个啁啾脉冲级联放大,都有可能将输出功率提高到更高的量级。如果放大系统使用保偏光纤,则可以实现全光纤全保偏结构的啁啾脉冲放大系统,提高激光器的稳定性,得

到保偏的高功率超短脉冲输出。另外,全光纤结构的啁啾脉冲放大系统可以和分离脉冲放大技术^[14]相结合,得到峰值功率更高或者单脉冲能量更高^[15-16]的激光输出。

参 考 文 献

- [1] ZHANG H, YANG C, LI W, *et al.* Characteristic of high-power all-fiber laser [J]. *High Power and Particle Beams*, 2012, 24(6): 1287-1289 (in Chinese).
- [2] DESMOULINS S, di TEODORO F. High-gain Er-doped fiber amplifier generating eye-safe MW peak-power, mJ-energy pulses[J]. *Optics Express*, 2008, 16(4): 2431-2437.
- [3] KNOX F M, FORYSIAK W, DORAN N J. 10Gbit/s soliton communication systems over standard fiber at 1.55 μ m and the use of dispersion compensation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(10): 1955-1962.
- [4] LI X, VOSS P L, SHARPING J E, *et al.* Optical-fiber source of polarization-entangled photons in the 1550nm telecom band[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(5): 053601.
- [5] JEONG Y, YOO S, CODEMARD C A, *et al.* Erbium: ytterbium co-doped large-core fiber laser with 297W continuous-wave out-put power [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 573-579.
- [6] DONG S, CHEN G, ZHAO S, *et al.* Research of high-power multi-mode Er³⁺/Yb³⁺ co-doped double-cladding optical fiber lasers [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(4): 366-369 (in Chinese).
- [7] KIEU K, MANSURIPUR M. Femtosecond laser pulse generation with a fiber taper embedded in carbon nanotube/polymer composite [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(15): 2242-2244.
- [8] KEILMANN F, AMARIE S. Mid-infrared frequency comb spanning an octave based on an Er fiber laser and difference-frequency generation [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, 33(5): 479-484.
- [9] STRICKLAND D, MOUROU G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communications*, 1985, 56(3): 219-221.
- [10] GALVANAUSKAS A. Mode-scalable fiber-based chirped pulse amplification systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, 7(4): 504-517.
- [11] YANG K, LI W, YAN M, *et al.* High-power ultra-broadband frequency comb from ultraviolet to infrared by high-power fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 12899-12905.
- [12] GALVANAUSKAS A, FERMAN M E, HARTER D. High-power amplification of femtosecond optical pulses in a diode-pumped fiber system[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(16): 1201-1203.
- [13] de MATOS C J S, TAYLOR J R, HANSEN T P, *et al.* All-fiber chirped pulse amplification using highly-dispersive air-core photonic bandgap fiber[J]. *Optics Express*, 2003, 11(22): 2832-2837.
- [14] ZHOU S, WISE F W, OUZOUNOV D G. Divided-pulse amplification of ultra short pulses[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(7): 871-873.
- [15] KLENKE A, BREITKOPF S, KIENEL M, *et al.* 530W, 13mJ, four-channel coherently combined femtosecond fiber chirped-pulse amplification system [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2283-2285.
- [16] KIENEL M, KLENKE A, EIDAM T, *et al.* Energy scaling of femtosecond amplifiers using actively controlled divided-pulse amplification [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 1049-1052.