

# 飞秒光脉冲光纤放大增益特性的实验研究\*

刘东峰 陈国夫 白晋涛 王贤华

(瞬态光学技术国家重点实验室, 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

**摘 要** 报道了掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器输出  $1.531 \mu\text{m}$  波长飞秒激光脉冲增益放大的实验研究结果。将自起振相加脉冲锁模掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器输出的飞秒激光脉冲注入掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器中进行放大, 分别采用正向和逆向抽运的方式, 得到了最高放大倍数 55 倍(17.4 dB)和 64 倍(18.1 dB)的增益, 对应的最大单脉冲能量(峰值功率)分别为 0.384 nJ (752 W)和 0.452 nJ (1295 W), 脉冲重复率为 20.84 MHz。正向和逆向抽运放大后输出的最短激光脉宽分别为 501 fs 和 309 fs。

**关键词** 光纤通讯, 超快光学技术, 瞬态光学, 飞秒光学, 锁模, 光纤放大器。

## 1 引 言

单模掺稀土元素光纤几十纳米的增益带宽使其成为飞秒超短光脉冲产生和放大的理想的增益介质, 因此全固化飞秒光纤激光与放大系统成为近年来超快激光领域一个十分活跃的前沿研究方向<sup>[1, 2]</sup>。半导体激光抽运的掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤飞秒激光器与放大器系统具有全固化、免调、稳定性好、效率高、输出光脉冲窄等特点, 是一种可仪器化高效的新型飞秒光源, 将在超快光学技术(特别是在飞秒高时间、高空间分辨测量技术、超快光电子技术、层析成像)、光纤通讯技术领域具有重要的应用价值。在过去的几年中, 全光纤飞秒激光器的研究取得了很大的进展<sup>[3, 4]</sup>。其中基于光纤的非线性偏振旋转产生人造可饱和吸收体自幅度调制被动锁模机制的光纤环形腔激光器具有腔体简单、可自起振、抽运阈值低、输出光脉冲短、可采用半导体激光抽运, 从而实现全固化等优点, 成为光纤飞秒超短激光脉冲产生的一种有效的锁模腔体形式。但由于锁模机制和光纤非线性的限制, 从光纤环形腔激光器中产生的超短光脉冲的脉冲能量比较低( $10^{-12}$  J 量级)<sup>[5]</sup>, 给应用带来了很多限制。

利用掺稀土元素光纤的宽带、高增益特性对光纤飞秒激光脉冲进行增益放大, 成为得到高功率飞秒光脉冲的有效方式。文献[2]曾报道了采用掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤直接放大产生 0.45 nJ 单脉冲能量、脉宽 450 fs 的实验结果。其放大器采用的抽运功率达 400 mW, 但放大后光脉冲带有一个底座。文献[1]采用啁啾脉冲放大技术得到了 1.4 nJ、脉宽 440 fs 的结果。文献[6]采用两段级联新结构, 得到了大功率(15.2 dBm)、高增益(42.8 dB)的结果, 但其信号源为连续光信号。而文献[7]研究了皮秒量级光脉冲的掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大, 其主要目的是研究一阶光孤子的传输。文献[8]比较详细地研究了掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器增益光纤的长度与抽运激光功率

\* 中国科学院重点项目资助(KJ952-J1-705)。

收稿日期: 1998-11-05; 收到修改稿日期: 1999-03-22

之间的关系。本文报道利用半导体激光器抽运掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤环形腔飞秒激光器和掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器系统产生高功率飞秒光脉冲的实验研究结果。

## 2 实验原理与装置

图1是一个全固化飞秒掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器与放大器系统的实验原理图。从半导体激光器

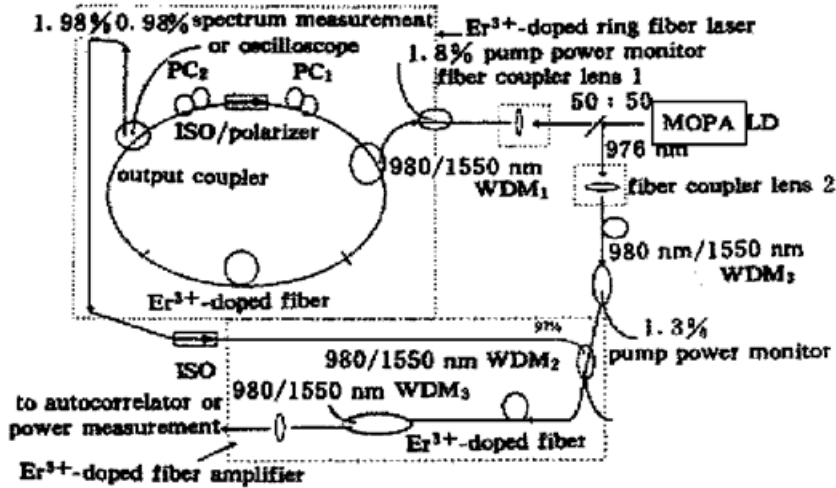


Fig. 1 Schematic of all solid state femtosecond  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber laser and amplifier

器输出 1 W 功率的 976 nm 抽运光被 50 : 50 分束镜分成两束, 一束通过光纤耦合透镜 1 后, 再经过一个光纤分路器, 其中 1.8% 用于监测抽运激光功率, 另一路 98.2% 通过一个 980/1550 nm 波分复用器 (WDM<sub>1</sub>) 进入飞秒掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤环形腔激光器。掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤环形腔激光器由 980/1550 nm 波分复用器 (WDM<sub>1</sub>)、掺  $\text{Er}^{3+}$  单模石英光纤 (掺杂的质量分数  $9.6 \times 10^{-4}$ , 芯径  $4 \mu\text{m}$ , 数值孔径 0.22, 截止波长 850 nm, 长度 3 m)、输出耦合器 (一路为 0.98%, 另一路为 1.98%)、偏振灵敏性光纤隔离器 (ISO) 和光纤偏振控制器 PC<sub>1</sub> 和 PC<sub>2</sub> 组成。利用光纤的非线性偏振旋转产生可饱和吸收, 从而在环形腔内形成光场自幅度调制的锁模机制, 形成稳定的锁模光脉冲输出<sup>[5, 8]</sup>。环形腔光纤激光器输出的飞秒激光脉冲经过一个偏振非灵敏性光纤隔离器后进入掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器中进行放大。

从分束镜输出的另一路 976 nm 抽运光通过光纤耦合透镜 2 后进入光纤分路器 (一路为 1.3% 用于放大器抽运功率的监测), 另一路 98.7% 再通过一个 980/1550 nm 波分复用器 (WDM<sub>2</sub>) 后进入掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器中作为放大器的抽运光。放大器用掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤的参数如下: 掺杂的质量分数为  $2.7 \times 10^{-3}$ , 芯径  $4 \mu\text{m}$ , 数值孔径 0.23, 截止波长 869 nm, 长 6 m。分别采用正向和逆向抽运。正向抽运方式是指信号光与抽运激光同向传输, 反之为逆向抽运。通过光纤放大器后的光脉冲经过一个 980/1550 nm 波分复用器 (WDM<sub>3</sub>) 滤去未吸收的 976 nm 抽运激光后, 再通过透镜耦合输出, 然后再进入一个实时扫描自相关仪进行脉宽或光谱测量。

从分束镜输出的另一路 976 nm 抽运光通过光纤耦合透镜 2 后进入光纤分路器 (一路为 1.3% 用于放大器抽运功率的监测), 另一路 98.7% 再通过一个 980/1550 nm 波分复用器 (WDM<sub>2</sub>) 后进入掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器中作为放大器的抽运光。放大器用掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤的参数如下: 掺杂的质量分数为  $2.7 \times 10^{-3}$ , 芯径  $4 \mu\text{m}$ , 数值孔径 0.23, 截止波长 869 nm, 长 6 m。分别采用正向和逆向抽运。正向抽运方式是指信号光与抽运激光同向传输, 反之为逆向抽运。通过光纤放大器后的光脉冲经过一个 980/1550 nm 波分复用器 (WDM<sub>3</sub>) 滤去未吸收的 976 nm 抽运激光后, 再通过透镜耦合输出, 然后再进入一个实时扫描自相关仪进行脉宽或光谱测量。

## 3 实验结果及讨论

光纤激光器输出的参数是: 光脉冲重复频率 20.84 MHz, 脉宽 410 fs, 平均功率  $264 \mu\text{W}$  (对应单脉冲能量约  $12.7 \text{ pJ}$ )<sup>[9]</sup>。在 76 mW 抽运功率下, 掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器输出的光脉冲宽度为 310 fs, 在经历了光纤隔离器、波分复用和各焊点损耗后, 进入掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器的信号光功率为  $146 \mu\text{W}$  (单脉冲能量 7 pJ), 光脉冲被展宽为 410 fs。

图 2 分别是在正向抽运和逆向抽运的条件下, 从掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器输出的光脉冲的宽度与进入放大器抽运光功率的关系。从实验曲线看, 在正向抽运下, 由于放大光纤的作用, 光脉冲已经被展宽 (与入射种子光脉冲相比); 同时由于光脉冲在光纤负色散区的高阶孤子脉宽

压缩效应, 随抽运功率的增加, 放大后的光脉冲宽度呈窄化趋势。而在逆向抽运条件下, 当放大器抽运功率小于 38 mW 时, 放大器输出的光脉冲宽度随抽运功率的增加呈现压缩趋势, 当抽运功率大于 38 mW 时, 放大后光脉冲的宽度随抽运功率的增加呈展宽趋势; 在抽运功率为 38 mW 时, 放大后的最短光脉冲宽度为 309 fs。这种现象的物理机制可定性理解为: 同向抽运情况下, 由于掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤的增益作用, 放大后的光孤子的峰值功率增大, 从而使得孤子阶数  $N$  超过 1。因为维持一阶孤子传输的孤子脉冲功率为  $P_1 \approx 3.11 |\beta_2| / \gamma \tau_{\text{FWHM}}$  ( $\beta_2$  为光纤的群速度色散参数,  $\gamma$  为光纤的非线性参数,  $\tau_{\text{FWHM}}$  为光脉冲的宽度),  $N$  阶孤子传输的功率为  $P_N = N^2 P_1$ 。随着  $N$  阶光孤子脉冲峰值功率的增大, 为保持高阶光孤子的形状, 光脉冲的宽度发生窄化。同时, 在光脉冲放大过程中, 由于增益色散发生增益窄化(导致光脉冲光谱窄化), 光脉冲宽度也发生展宽。因此在放大过程中, 高阶孤子光脉冲的脉宽压缩效应与增益色散导致的脉宽展宽效应共同作用。在抽运激光功率比较低时, 高阶孤子压缩作用占主要地位, 放大后的光脉冲脉宽窄化特性比较明显。而当抽运功率增大时, 同向抽运放大下, 开始放大时信号功率比较小, 光脉冲的自相位调制(SPM)效应作用比较小, 增益色散导致的脉冲光谱窄化(脉宽的时域同时展宽)作用不明显。随着抽运功率的增加, 光脉冲的信号越来越强, 光脉冲的高阶孤子脉宽压缩效应也越来越强, 同时光纤的增益色散导致的光脉冲光谱窄化效应(同时光脉冲的宽度展宽)也越来越强, 这两种作用的共同作用使得放大后光脉冲的窄化作用越来越弱。而在逆向抽运情况下, 由于沿光纤的增益分布与同向抽运放大时增益分布相反, 随抽运功率的增大, 由于高阶孤子压缩效应的作用使光脉冲宽度发生窄化, 导致光脉冲的光谱宽度加宽。同时由于光纤的增益色散效应的作用, 使得放大后光脉冲的光谱宽度发生窄化, 从而引起光脉冲宽度加宽。当抽运功率比较小时, 高阶孤子压缩效应起主要作用, 放大后光脉冲宽度的宽度表现为压缩; 当抽运功率达到一定值时, 这两个作用达到平衡, 光脉冲的宽度为最短; 随抽运功率的进一步增大, 增益色散导致的脉宽展宽起主要作用, 放大后的光脉冲宽度随抽运功率的增加而更进一步展宽。掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤的增益色散、增益与光纤的自相位调制效应、群速度色散效应及光纤拉曼效应等共同作用, 使得光脉冲随放大器抽运功率的增加呈现展宽和压缩。文献[10、11]曾对飞秒激光脉冲的掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大在不同抽运方式下的动力学特性进行了实验研究, 也观察到类似趋势, 但其采用的抽运功率比较小, 而且文献[9]中放大用的掺  $\text{Er}^{3+}$  增益光纤很长。与文献[10、11]所述实验结果不同, 作者在实验中没有测量到孤子频移等光谱结构。其原因可能是孤子频移光谱已超出了掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器的增益光谱范围, 因此不能用文献[10]所述的机制来解释逆向抽运光脉冲先压缩后展宽的现象。已有的理论<sup>[12、13]</sup>可以被用来理解飞秒激光脉冲在掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤同向抽运放大的光脉冲压缩现象; 而本文报道的飞秒激光脉冲在逆向抽运放大后脉宽随抽运功率增加呈现压缩与展宽的现象, 需要在理论上进一步研究。

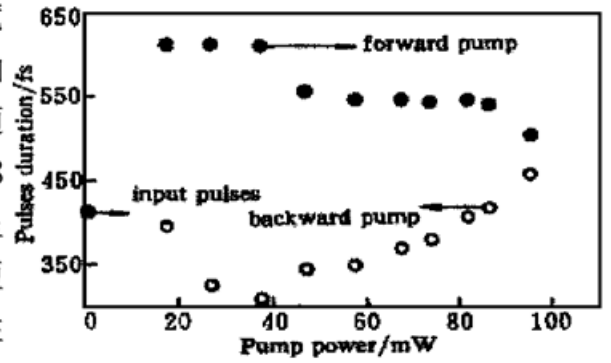


Fig. 2 The amplified pulses duration vs pump-ing power with Forward (●) and back-ward (○) pump

图 3(a) 和图 3(b) 分别是逆向抽运下放大后光脉冲的自相关曲线和典型的光谱图, 光脉冲宽度  $\tau_{\text{FWHM}} = 456$  fs。从光谱看, 在正、逆向抽运下, 光谱呈现出光滑对称的结构。由于掺

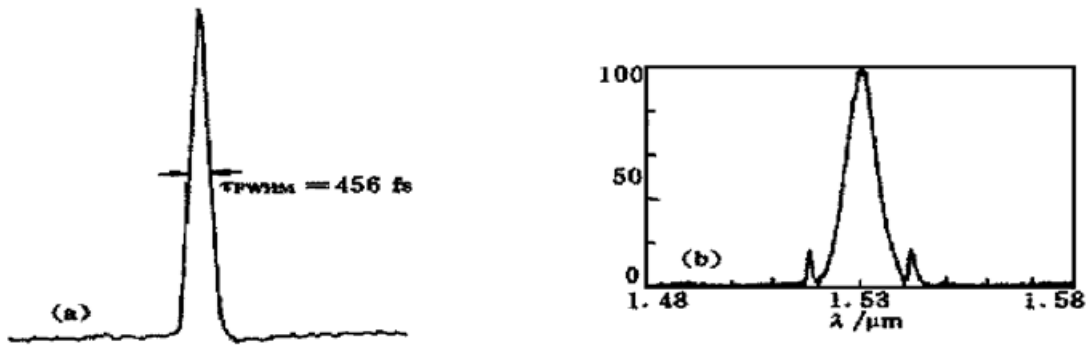


Fig. 3 (a) Amplified pulses autocorrelation trace with backward pumping, (b) The typical spectrum of amplified pulses

$\text{Er}^{3+}$  光纤放大器增益带宽的限制, 从光谱图上看, 没有出现孤子自频移等光谱结构。

图 4 是两种抽运方式下放大后的单脉冲能量随抽运功率的变化关系。对应正、逆向抽运方式得到的放大后最大单脉冲能量分别为 0.384 nJ 和 0.452 nJ, 对应平均输出功率为 8 mW 和 9.4 mW, 脉冲重复率 20.84 MHz。在放大器未达到饱和之前, 随抽运功率的增加, 放大后的单脉冲能量呈增加趋势; 而且在同样抽运功率下逆向抽运放大后输出光脉冲能量更大一些, 这显示逆向抽运在相同抽运功率下比同向抽运方式放大效率更高一些。

图 5 是两种抽运方式下放大器在不同抽运功率下增益的变化。在相同抽运功率下, 逆向抽运比同向抽运的增益更高一些。

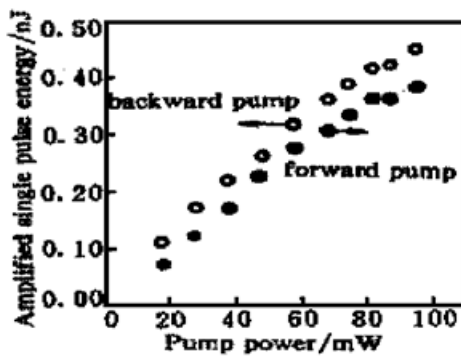


Fig. 4 The amplified pulses energy vs pump power with forward and backward pumping, the pulses repetition rate is 20.84 MHz

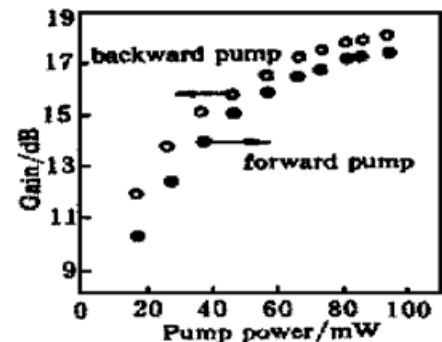


Fig. 5 The  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber amplifier gain (dB) vs pump power with forward and backward pumping

**总 结** 利用半导体激光器抽运的全固化飞秒掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器与放大器系统分别在正向和逆向抽运方式下得到了最高放大倍数 55 倍(17.4 dB)和 64.1 倍(18.1 dB)的增益, 对应放大后的单脉冲能量(峰值功率)分别为 0.384 nJ(752 W)和 0.452 nJ(1295 W)。正向和逆向抽运下, 掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器放大后输出最短光脉冲的宽度分别 501 fs 和 309 fs。随抽运功率的增加, 正向抽运下输出光脉冲宽度呈压缩趋势, 而逆向抽运下放大器输出的光脉冲宽度在抽运功率小于 38 mW 下随抽运功率的增加呈压缩趋势; 当抽运功率为 38 mW 时, 输出最短光脉冲宽度为 309 fs; 而当抽运功率大于 38 mW 以后, 随抽运功率的增加, 输出光脉冲的宽度呈展宽趋势。实验显示, 逆向抽运放大的效率比同向抽运放大更高一些。

## 参 考 文 献

- [1] Stock M L, Mourou G. Chirped pulse amplification in an  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber Oscillator/ $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber amplifier system. *Opt. Commun.*, 1994, **106**(4, 5, 6): 249~ 252
- [2] Galvanauskas A, Fermann M E, Harter D. High power amplification of femtosecond optical pulses in a diode-pumped fiber system. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(16): 1201~ 1203
- [3] Richardson D J, Laming R I, Payne D N *et al.*. Self-starting passively mode-locked  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber ring laser based on the amplifying Sagnac switch. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(16): 542~ 543
- [4] Sharp R C, Spock D E, Pan N *et al.*. 190 fs passively mode-locked thulium fiber laser with a low threshold. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12): 681~ 683
- [5] Tamura K, Ippen E P, Haus H A. Pulse dynamics in stretched-pulse fiber lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(2): 158~ 160
- [6] 唐平生, 刘小明, 刘丹等. 混合抽运两段级联掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器实验研究. *光学学报*, 1997, **17**(4): 472~ 475
- [7] 余建军, 杨伯军, 管克俭等. 基于不同色散的光纤链的孤子传输研究. *光学学报*, 1998, **18**(4): 446~ 450
- [8] Du Geguo, Chen Guofu. Gain performance of 980 nm pumped erbium-doped fiber amplifier. *Sciences in China(Series A)*, 1999, **42**(3): 286~ 292
- [9] 刘东峰, 陈国夫, 王贤华. 自起振被动锁模掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤环形腔孤子激光器的实验研究. *中国科学(A 辑)*, 1999, **29**(7): 656~ 661
- [10] Nakazawa M, Kurokawa K, Kubata H *et al.*. Femtosecond  $\text{Er}^{3+}$ -doped optical fiber amplifier. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**(17): 653~ 655
- [11] Kurokawa K, Nakazawa M. Femtosecond soliton transmission in 18 km  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber amplifier with different pumping configurations. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(19): 1765~ 1767
- [12] Agrawal G P. Optical pulse propagation in doped fiber amplifier. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **44**(11): 7943~ 7501
- [13] Agrawal G P. Effect of gain dispersion and stimulated Raman scattering on soliton amplification in fiber amplifiers. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(4): 226~ 228

## Experimental Study of the Amplification of Femtosecond Laser Pulses in Fiber Amplifier

Liu Dongfeng    Chen Guofu    Bai Jintao    Wang Xianhua

(State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

(Received 5 November 1998; revised 22 March 1999)

**Abstract** The Experimental results of amplification of 1.531  $\mu\text{m}$  femtosecond laser pulses using  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber amplifier is reported. The femtosecond pulses generated by a self-starting additive pulses mode-locked  $\text{Er}^{3+}$  fiber laser with pulse duration of 410 fs injected into the  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber amplifier (6 m, high doping concentration  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber), the maximum amplification gain of 55(17.4 dB) and 64.4(18.1 dB) and the maximum single pulse energy (peak power) of 0.384 nJ(752 W) and 0.452 nJ(1295 W) have been obtained with forward and backward pumping respectively. The shortest output pulses duration are 501 fs and 309 fs with forward and backward pumping respectively.

**Key words:** fiber, optical fiber communication, ultrafast optics technology, femtosecond optics, transient optics, mode-locking, fiber amplifier.