

# 基于 EDFA 的超短光脉冲放大技术及其进展

余巧燕<sup>1</sup>, 曹文华<sup>2</sup>

(1. 五邑大学信息科学研究所, 广东 江门 529020; 2. 深圳大学电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060)

**摘要:**掺铒光纤放大器(EDFA)具有高增益(40~50 dB)、宽带宽(~50 nm)以及很高的单脉冲饱和能量(~1 μJ),因而被认为是放大超短光脉冲的主要器件。围绕如何减轻光纤非线性效应对超短光脉冲放大过程的有害影响,综述了基于 EDFA 的超短光脉冲放大技术及其进展情况,介绍了最近的研究结果。

**关键词:**掺铒光纤放大器(EDFA);超短光脉冲;光纤非线性效应

**中图分类号:**TN929.11 **文献标识码:**A

## EDFA-based ultrashort optical pulse amplification and its developments

YU Qiao-yan<sup>1</sup>, CAO Wen-hua<sup>2</sup>

(1. Institute of Information Science, Wuyi University, Jiangmen 529020, China;

2. College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** Erbium-doped fiber amplifier (EDFA) is considered to be the main device for ultrashort pulse amplification owing to its high gain (40~50 dB), broad bandwidth (~50 nm), and high pulse-saturation energy (~1 μJ). In this paper, ultrashort pulse amplification techniques based on EDFA are reviewed and discussed, with the emphasis on how to reduce the fiber nonlinear effects on the amplification of ultrashort pulse. The latest achievements in this field are also introduced.

**Key words:** EDFA; ultrashort optical pulse; fiber nonlinearities effects

### 1 引言

在光孤子通信、超快速激光光谱学以及光信息处理等众多领域中,超短光脉冲放大技术显得至关重要。掺铒光纤放大器(EDFA)由于具有高增益(40~50 dB)、宽带宽(~50 nm)、对偏振不敏感、信道串扰低、噪声系数小以及很高的单脉冲增益饱和能量(~1 μJ)等特点,因而在上述领域中获得了广泛应用。然而,现有理论<sup>[1-2]</sup>和实验<sup>[3-4]</sup>均表明,对于超短光脉冲放大,当 EDFA 中的非线性效应(如自相位调制及拉曼自频移)不可忽略时,很难从 EDFA 获得无畸变的放大脉冲,这对于光孤子的中继放大是尤其不利的。因此,在放大过程中,如何减小非线性效应对超短光脉冲放大过程的影响,如何获得无脉座、无频率啁啾的高质量放大脉冲,便成为掺铒光纤放大技术需要解决的重要课题。

本文针对基于 EDFA 的超短光脉冲放大技术,围绕如何获取高质量放大脉冲这一主线,综述了该

技术的发展情况,介绍了最近的研究结果。

### 2 超短光脉冲在 EDFA 中的放大

在同时计及群速度色散(GVD)、自相位调制(SPM)、拉曼自频移(RSS)、三阶色散(TOD)以及放大器增益和增益色散等因素后,超短光脉冲在 EDFA 中的放大可用下述方程描述<sup>[5]</sup>:

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2}(1 - id) \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u = \frac{i}{2} \mu u + i \delta \frac{\partial^3 u}{\partial \tau^3} + \tau_R u \frac{\partial |u|^2}{\partial \tau} \quad (1)$$

其中, $\xi, \tau, u(\xi, \tau)$ 分别为归一化距离、时间和脉冲包络复振幅;与参数 $d, \mu, \delta, \tau_R$ 有关的项分别表示增益色散、增益、TOD和RSS; $\xi, \tau, d, \mu, \delta, \tau_R$ 分别按以

基金项目:广东省自然科学基金项目(No. 06029820)资助。

作者简介:余巧燕(1983-),女,硕士研究生,主要研究方向高速光纤通信系统。E-mail: ap469418399@163.com

收稿日期:2009-01-01

下形式归一化:

$$\xi = \frac{z}{L_D} = \frac{z|\beta_2|}{T_0^2}, \tau = \frac{t - z/v_g}{T_0}, d = g_0 L_D \frac{T_2^2}{T_0^2} \quad (2)$$

$$\mu = (g_0 - \alpha)L_D, \delta = \frac{\beta_3}{6|\beta_2|T_0}, \tau_R = \frac{T_R}{T_0} \quad (3)$$

其中,  $T_0$  为输入脉冲在  $1/e$  功率处的半宽度;  $v_g$  为脉冲群速度;  $\beta_2, \beta_3$  分别为 GVD 和 TOD 系数;  $T_R$  为拉曼常数;  $\alpha$  为损耗系数;  $T_2$  为偶极子弛豫时间;  $g_0$  为小信号增益系数;  $L_D = T_0^2/|\beta_2|$  为色散长度。

对于下式表示的高斯脉冲:

$$u(0, \tau) = \exp(-\tau^2/2) \quad (4)$$

利用分步 Fourier 变换对方程(1)进行数值求解便可计算脉冲在 EDFA 中的放大过程。

作为例子, 设输入脉冲宽度  $T_{\text{FWHM}} = 2$  ps ( $T_{\text{FWHM}}$  表示脉冲半功率点之间的全宽度,  $T_0 = T_{\text{FWHM}}/1.665$ ), EDFA 在波长  $1.55 \mu\text{m}$  附近的典型参数值为  $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,  $\beta_3 = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$ , 非线性系数  $\gamma = 3 \text{ km}^{-1}\text{W}^{-1}$ ,  $T_R = 3 \text{ fs}$ ,  $T_2 = 80 \text{ fs}$ 。设 EDFA 每单位色散长度的增益为  $10 \text{ dB}$  [ $\exp(\mu) = 10, \mu \approx 2.3$ ], 则由式(2)、(3)两式得:  $d \approx 0.01144$ ,  $\tau_R \approx 0.0026$ ,  $\delta \approx 0.00073$ 。可见, 对于初始宽度为  $2 \text{ ps}$  的脉冲, RSS 和 TOD 效应可忽略不计。图 1 示出脉冲在放大过程中归一化峰值强度、压缩比以及脉座能量与 EDFA 长度的关系。当放大器长度大于  $50 \text{ m}$  时, 脉冲可获得有效的放大与压缩, 但与此同时, SPM 与 GVD 效应的相互作用导致脉座增大, 脉冲质量严重下降。例如, 在  $75.5 \text{ m}$  处, 脉冲峰值功率被放大  $142$  倍, 压缩比达到  $12.7$ , 但脉座能量却占整个脉冲能量近  $20\%$ 。显然, 这类脉冲不适合于长距离传输, 因为脉座的存在会加速相邻脉冲之间的相互作用, 进而造成系统误码率的增大。

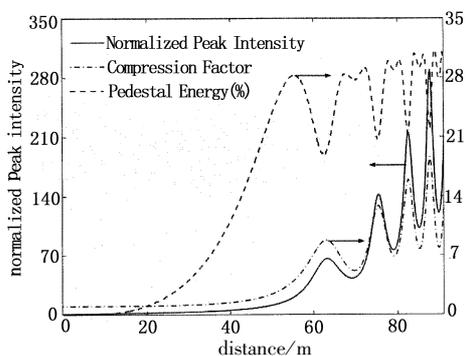


图1 归一化峰值强度、压缩比以及脉座能量与 EDFA 长度的关系 (输入为  $2 \text{ ps}$  (FWHM) 的高斯脉冲, 其他计算参数为  $\mu = 2.3, d = 0.01144, \tau_R = 0, \delta = 0$ )

放大脉冲质量的下降可以通过减小 EDFA 单位长度增益来克服, 即采用绝热放大技术<sup>[6]</sup>。但该技术有其局限性: 一方面, 被放大的脉冲不能太宽, 因

为了保证绝热条件, 同时又能获得足够的增益, 放大器总长度必须随输入脉冲宽度的增大而指数规律增大。已有研究指出<sup>[7]</sup>, 当输入脉宽为  $10 \text{ ps}$  时, 所需的放大器长度接近  $20 \text{ km}$ , 这显然是不实际的; 另一方面, 被放大的脉冲也不能太窄, 特别是当被放大脉冲属于飞秒量级时, RSS 效应会使得脉冲频谱逐渐移至放大器的有效增益带宽以外, 得不到足够的增益。

### 3 啁啾脉冲放大

啁啾脉冲放大技术<sup>[8-9]</sup>就是为了避免或减轻光纤放大器中的非线性效应对放大过程的影响。其基本思路是: 首先让被压缩的脉冲经过一段高色散器件, 使其获得足够的展宽, 与此同时峰值功率大大减小; 再让展宽后的脉冲通过 EDFA 实现线性放大; 最后让放大后的脉冲通过另一段高色散器件(与前者色散相反), 使脉冲恢复到被放大前的宽度。该技术的特点是可实现高增益脉冲放大, 同时保证脉冲质量。

图 2 示出一个典型的啁啾脉冲放大系统<sup>[8]</sup>。其中连接激光器输出端的色散补偿光纤是用于消除被压缩脉冲的频率啁啾; 展宽器为一段  $5 \text{ mm}$  长的具有正色散的啁啾光纤光栅 (CFBG), 从光源输出的  $200 \text{ fs}$  光脉冲经 CFBG 后展宽至  $50 \text{ ps}$ 。由于 CFBG 较小的带宽以及光纤偏分器 (PBS) 引起的较大损耗, 故需要采用预放大; 脉冲被预放大后两次经过功率放大器 (EDFA); 最后经过具有负色散的压缩器 (CFBG), 得到脉宽为  $370 \text{ fs}$  的放大脉冲, 单脉冲的能量放大倍数可达  $1000$  倍。

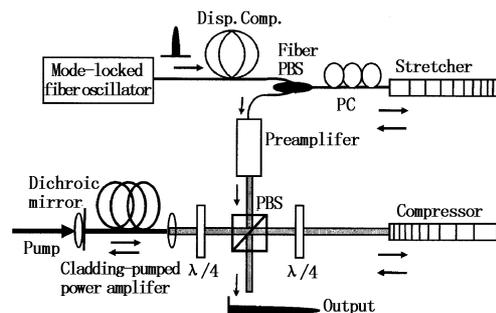


图2 啁啾脉冲放大系统

有些啁啾脉冲放大系统中也采用反射光栅作为脉冲压缩器<sup>[9]</sup>, 以避免压缩过程中非线性效应对脉冲的影响。还有的系统采用高色散掺稀土元素光纤, 将脉冲展宽和能量放大合二为一<sup>[10]</sup>。当被放大脉冲进入高色散增益光纤后, 其宽度迅速增大, 峰功率减小, 不仅可以避免非线性效应, 还可使得整个系统更紧凑。

上述啁啾脉冲放大系统有一个共同不足之处, 就是最终得到的脉冲峰值功率不会太高, 否则在最后的压缩阶段光纤非线性的影响不可忽略。后来有

人采用光子带隙光纤(PBF)作为压缩器<sup>[11]</sup>,可以将输出脉冲峰值功率提高到千瓦量级。但PBF与普通光纤的对接比较困难,会降低耦合效率。特别是PBF的三阶色散系数很大,会对脉冲产生难以消除的非线性频率啁啾。最近,为了进一步减小非线性效应对放大结果的影响,又有人采用高浓度掺铒的EDF作为放大器<sup>[12]</sup>,获得了脉宽为43 fs、峰值功率为43 kW的飞秒脉冲,但脉座较大,主脉冲能量仅占整个脉冲能量的39%。

#### 4 非线性光纤放大环境

啁啾脉冲放大技术只能放大脉冲能量而不能压缩脉冲宽度,因为脉冲压缩需要利用SPM与GVD之间的相互作用,而啁啾脉冲放大技术本质上是抑制SPM效应。在高速光纤通信系统中,光纤损耗导致脉冲能量的衰减,色散引起脉冲展宽。因此,线路上不仅要对信号脉冲进行周期性的能量补偿,而且还要对展宽后的脉冲进行适当压缩。当传输脉冲宽度大于几十皮秒时,能量补偿和脉冲压缩可以分别处理,即利用EDFA作为能量中继器,用色散补偿光纤压缩脉宽;但对于脉宽为几皮秒以下的非线性传输,上述处理方式便遇到困难,因为对于以EDFA作为能量中继器的非线性超短脉冲传输,必须满足路径平均传输条件<sup>[13]</sup>,即传输光纤的色散长度 $L_D$ 必须大于放大器间距 $L_A$ ,这就意味着传输脉冲越窄,中继距离越短,对于脉冲宽度为5 ps以下的非线性传输,中继距离在几千米以内。

采用非线性光纤放大环境可以克服上述困难,不仅可以增大中继距离,而且将能量中继和脉冲压缩合二为一,即传输线路上不必接入色散补偿光纤。该方案最初是由Gabitov等人提出的<sup>[14]</sup>,环境结构如图3所示。

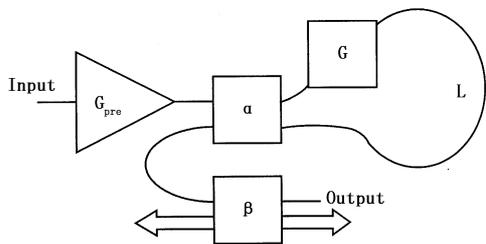


图3 非线性光纤放大环境

放大环境由耦合器 $\alpha$ 、增益为 $G$ 的放大器(EDFA)以及长度为 $L$ 的光纤环组成,其中EDFA的长度远小于环境长度。输入脉冲先经过线性预放大再经功率耦合比为 $\alpha$ 的耦合器分两路沿环境顺、逆时针方向传输。两路脉冲在获得能量放大的同时,还由于SPM与GVD的相互作用而得到脉冲宽度的压缩。由于放大器 $G$ 在环内的不对称放置,沿顺、逆

时针方向传输的两路脉冲绕环一周后获得不同的非线性相移,两者在耦合器 $\alpha$ 处发生干涉,结果是脉冲中间的高能量部分被透射,由非线性效应引起的脉座被反射,从而输出无脉座、无啁啾的高质量脉冲。耦合器 $\beta$ 的作用是对输出脉冲振幅进行适当衰减,使得输出脉冲接近基阶孤子。

然而,用上述放大环境作为超短光孤子的能量中继器的结果是:虽然与EDFA相比可以适当提高中继距离,但提高的幅度不是很大,根据文献[14]的计算结果,对于宽度为1.5 ps的孤子传输,放大器的间距仅为10 km左右。根本原因是,那里的放大器增益不能设置得太大(一般情况下在3 dB左右),否则,放大后的脉冲不具有孤子特性,不可能保证周期性的孤子传输。

我们对上述环境进行了改进<sup>[15]</sup>,如图4所示。不同之处是,增益不再集中在环境内的一小段光纤上,而是沿整个环境均匀分布,称为分布增益光纤环境。采取分布增益的好处是,在保证输出脉冲孤子特性的情况下,环境可提供的增益要比前者大得多,对脉冲压缩的效果也更为明显。研究表明<sup>[16]</sup>,对于2 ps的孤子传输,用10 dB分布增益环境可使得中继距离增加到42.957 km。而且,中继距离只由环境增益决定,与初始输入脉冲宽度无关。数值计算同时表明,用分布增益环境代替集总增益环境还能提高系统的稳定性,减弱孤子间的相互作用,并可以有效地抑制孤子自频移。

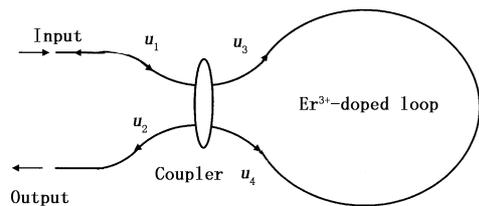


图4 分布增益光纤环境

#### 5 其他放大技术

为了克服EDFA中的非线性效应对飞秒光脉冲放大的影响,并同时实现脉冲能量放大和脉宽压缩,最近报道了一种基于大模场面积EDFA的飞秒脉冲放大技术<sup>[17]</sup>。该技术沿用了啁啾脉冲放大的概念,却同时具有脉宽压缩功能,如图5所示。

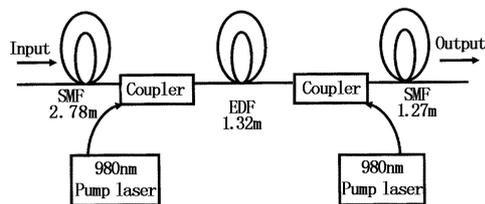


图5 基于大模场面积EDFA的飞秒脉冲放大器

整个器件为全光纤结构,包括两段色散系数  $\beta_2 = -21.4 \text{ ps}^2/\text{km}$ 、长度分别为 2.78 m 及 1.27 m 的单模光纤 SMF-28;一段长为 1.32 m、模场直径为  $(9.5 \pm 0.8) \mu\text{m}$  的大模场面积高浓度掺铒光纤 EDF;两个 WDM 耦合器;以及两个波长为 980 nm、泵浦功率分别为 140 mW 和 120 mW 的双向泵浦源。输入端的单模光纤起预啾啾展宽作用,将能量为 24 pJ、宽度为 300 fs 的输入脉冲展宽至 840 fs。经 EDFA 放大后的单脉冲能量为 2.6 nJ,增益为 20.3 dB,脉宽基本不变。放大后的脉冲最后经过具有负色散的单模光纤,其宽度被压缩至 56 fs,峰值功率达 46 kW,脉座很小,而且具有双曲正割形状。

相对于常规 EDFA,上述结构的主要优点是:由于采用了预啾啾技术和大模场面积的 EDF,并将脉冲展宽、能量放大和脉宽压缩同时集成于一条光纤链路之上,从而大大减轻了非线性效应对放大结果的影响;在获得相同增益的情况下,采用大模场面积的 EDF 还可以减小 EDF 长度,降低泵浦功率。

## 6 总 结

对于超短光脉冲放大,当 EDFA 中的非线性效应不可忽略时,很难从常规的 EDFA 获得无畸变的放大脉冲。绝热放大技术可得到无畸变的放大脉冲,但该技术有其局限性,即被放大脉冲的脉宽范围有限。啾啾脉冲放大技术只能放大脉冲能量而不能压缩脉冲宽度,因为脉冲压缩需要利用光纤非线性效应,而啾啾脉冲放大技术本质上是抑制非线性效应。采用非线性光纤放大环镜可以同时实现脉冲能量放大和脉宽压缩,不仅可以替代常规 EDFA 增大通信系统的中继距离,而且在传输线路上不必接入色散补偿光纤。对于飞秒光脉冲放大,采用预啾啾技术和大模场面积的 EDFA,将脉冲展宽、能量放大和脉宽压缩同时集成于一条光纤链上,可降低泵浦功率,减轻非线性效应对放大结果的影响。

## 参考文献:

- [1] Agrawal G P. Effect of gain dispersion and stimulated Raman scattering on soliton amplification in fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 1991, 16(4): 226 - 228.
- [2] Hodel W, Schutz J, Weber H P. Limits to the amplification efficiency of ultrashort fundamental solitons using Er-doped fibers [J]. *Opt. Commun.*, 1992, 88 (2 - 3): 173 - 179.
- [3] Khrushchev I Y, Grudinin A B, Dianov E M, et al. Amplification of femtosecond pulses in  $\text{Er}^{3+}$ -doped single-mode optical fibers [J]. *Electron. Lett.*, 1990, 26 (7): 456 - 458.
- [4] Kurokawa K, Nakazawa M. Wavelength-dependent amplification characteristics of femtosecond erbium-doped optical fiber amplifiers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 58 (25): 2871 - 2873.
- [5] Agrawal G P. Applications of nonlinear fiber optics [M]. San Diego, Boston, New York: Academic Press, 2001: 151 - 194.
- [6] Nakazawa M, Kurokawa K, Kubota H, et al. Femtosecond erbium-doped optical fiber amplifier [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 57(7): 653 - 655.
- [7] Pelusi M D, Liu H F. Higher order soliton pulse compression in dispersion-decreasing optical fibers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, 33(8): 1430 - 1439.
- [8] J D Minelly, A Galvanauskas, M E Fermann, et al. Femtosecond pulse amplification in cladding-pumped fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1995, 20(17): 1797 - 1799.
- [9] M E Fermann, A Galvanauskas, D Halter. All-fiber source of 100-nJ subpicosecond pulses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 64(11): 1315 - 1317.
- [10] D S Peter, W Hodel, H P Weber. Efficient distortion-free amplification of 1.3  $\mu\text{m}$  femtosecond pulses in a  $\text{Pr}^{3+}$ -doped fluoride fiber amplifier [J]. *Opt. Commun.*, 1996, 130(1 - 3): 75 - 80.
- [11] C J S de Matos, J R Taylor, T P Hansen, et al. All-fiber chirped pulse amplification using highly-dispersive air-core photonic bandgap fiber [J]. *Opt. Express*, 2003, 11 (22): 2832 - 2837.
- [12] J Takayanagi, N Nishizawa, H Nagai, et al. Generation of high-power femtosecond pulse and octave-spanning ultra-broad supercontinuum using all-fiber system [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, 17(1): 37 - 39.
- [13] K J Blow, N J Doran. Average soliton dynamics and the operation of soliton systems with lumped amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, 3(4): 369 - 371.
- [14] I Gabbitov, D D Holm, B P Luce. Low-noise picosecond soliton transmission by use of concatenated nonlinear amplifying loop mirrors [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, 14 (7): 1850 - 1855.
- [15] Ping Kong A Wai, Wen-hua Cao. Simultaneous amplification and compression of ultrashort solitons in an erbium-doped nonlinear amplifying fiber loop mirror [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, 39(4): 555 - 561.
- [16] Wen-hua Cao, P K A Wai. Picosecond soliton transmission by use of concatenated gain-distributed nonlinear amplifying fiber loop mirrors [J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44 (35): 7611 - 7620.
- [17] Gong-ru Lin, Ying-tsung Lin, Chao-Kuei Lee. Simultaneous pulse amplification and compression in all-fiber-integrated pre-chirped large-mode-area Er-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Express*, 2007, 15 (6): 2993 - 2999.