

文章编号: 0253-2239(2010)05-1234-04

单模光纤对啾啾脉冲对比度的影响

孙美智 康俊 郭爱林 张福领 杨庆伟 毕群玉 谢兴龙 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所国家高功率激光物理实验室, 上海 201800)

摘要 以非线性薛定谔方程为基础, 针对纳秒量级高斯型啾啾脉冲在单模光纤中的传输问题展开讨论, 利用分步傅里叶方法, 通过数值模拟, 研究讨论了色散与非线性效应对展宽器展宽后啾啾脉冲频谱以及波形的影响, 在此基础上, 讨论了压缩后输出信号光的对比度问题。研究表明, 中心波长为 1053 nm 的低峰值功率 ($I < 30$ mW) 输入啾啾信号光脉冲, 在单模光纤内传输 200 m 后, 脉冲对比度在 3 ps 的时间窗口上可达到 10^{25} 量级。

关键词 光纤光学; 啾啾脉冲; 单模光纤; 色散; 非线性效应; 对比度

中图分类号 O437.3; TN242 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1234

Effect of Single-Mode Fiber on the Contrast of Chirped-Pulse

Sun Meizhi Kang Jun Guo Ailin Zhang Fuling Yang Qingwei

Bi Qunyu Xie Xinglong Lin Zunqi

(National Laboratory on High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Based on the nonlinear Schrödinger equation, transmission of the Gauss type chirped-pulse of nanosecond in width in single-mode fiber is discussed. The effects of aberration and nonlinear effects on both spectrum and waveform of the chirped-pulse are numerically simulated with split-step Fourier method and the contrast of the compressed pulse is analyzed in detail. The results show that for the input chirped-pulse of peak power smaller than 30 mW and of center wavelength at 1053 nm, after the transmission in 200 m single-mode fiber, the contrast of the compressed pulse is up to 10^{25} in 3 ps time window.

Key words fiber optics; chirped-pulse; single-mode fiber; dispersion; nonlinear effects; contrast

1 引言

在神光 II 装置拍瓦(PW)升级方案的光参量啾啾脉冲放大(OPCPA)单元中, 为保证放大信号的稳定性并有效抑制参量荧光, 要求抽运光与信号光达到百皮秒量级的时间同步, 为实现这一技术指标, 须对主光路中的信号光进行延迟, 为此拟在信号光注入 OPCPA 单元前先通过一段约 200 m 单模保偏光纤以实现时间延迟。类似方案在法国的 Ligned'Intégration Laser (LIL) 的 Multi-Petawatt High-Energy Laser (PETAL) 上也有应用^[1]。单模光纤的引入同时也提高了输入种子光的光束质量, 但是

否会最终影响到压缩后短脉冲的对比度, 是该方案中必须要解决的一个问题。对于超短脉冲在单模光纤中传输有很多报道, 显示传输过程中由于非线性效应与色散共同作用, 导致了如光孤子, 超连续谱等许多物理现象^[2~5]。国内外对于飞秒、皮秒量级的超短脉冲在光纤中的传输特性有较多的研究, 但大多仅限于单独对低啾啾率啾啾脉冲色散效应或者非啾啾脉冲在通讯波段的传输进行讨论^[6~10]。对于纳秒展宽啾啾脉冲在单模光纤中的传输问题, 同时考虑高阶色散与高阶非线性效应对于中心波长在 1053 nm 传输脉冲波形频谱的影响, 特别是对输出

收稿日期: 2009-03-14; 收到修改稿日期: 2009-09-09

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 孙美智(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事超短超强激光脉冲技术方面的研究。

E-mail: eric913@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 林尊琪(1942—), 男, 中国科学院院士, 博士生导师, 主要从事激光惯性约束核聚变各单元技术等方面的研究。

E-mail: zqlin@mail.shcnc.ac.cn

超短脉冲对比度的影响,目前尚无相关文献的报道。

本文从非线性薛定谔方程出发,利用分步傅里叶方法^[11],通过模拟计算,研究讨论了光纤中色散与非线性效应对纳秒啁啾脉冲波形及频谱的影响,在此基础上,讨论了压缩后输出信号的对比度问题。

2 技术方案与理论基础

2.1 单模光纤结合 OPCPA 技术

OPCPA 装置包括 4 个部分:提供宽谱种子脉冲的光源、提供高量值二阶色散的展宽器、提供高增益的放大器和提供与展宽器相反的二阶色散的压缩

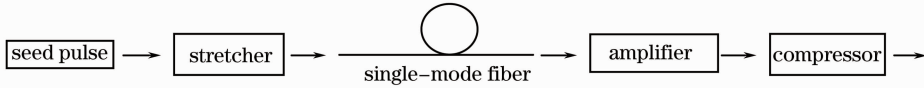


图 1 单模光纤结合 OPCPA

Fig. 1 OPCPA with single-mode fiber

2.2 理论基础

对于百飞秒量级的脉冲,在慢变振幅假设下,在单模光纤中的传输遵循广义非线性薛定谔方程^[2]

$$\frac{\partial A}{\partial Z} + \frac{\alpha}{2}A + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma \left[|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right], \quad (1)$$

式中 A 为脉冲包络慢变振幅; α 为光纤损耗因子; β_2 为二阶色散系数,所在项表示二阶色散(GVD)效应; β_3 为三阶色散系数,所在项表示三阶色散(TOD)效应; γ 为非线性参量,当脉冲峰值功率小于 $1 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时的表达式为 $\gamma = n_2 \omega_0 / c A_{\text{eff}}$,式中 C 为光速, A_{eff} 为有效纤芯截面。当峰值功率可与 $1 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 相比拟或者大于 $1 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时, γ 的表达式必须做出修正;方程右边第一项 $i\gamma |A|^2 A$ 为自相位调制(SPM)效应;第二项表示自陡峭(SS)效应,第三项表示自频移(SFS)效应,参数 T_R 是拉曼常数。由推理过程可知,非线性薛定谔方程只是将非线性过程进行了一级近似,其成

器。如图 1 所示,一段 200 m 的单模保偏光纤被置于 OPCPA 装置中的展宽器之后,放大器之前。所以,光纤输入脉冲是展宽器的输出脉冲,即脉宽很宽同时频谱也很宽的啁啾脉冲。因为只需要研究光纤的引入对输出脉冲的影响,所以忽略后级放大器的相位畸变,只分析光纤中的色散及非线性过程对输出脉冲的波形和频谱的影响,以及经过压缩器压缩至傅里叶极限的脉冲在皮秒量级上的对比度变化。实现傅里叶极限的压缩,要求压缩器同时补偿掉展宽器与单模光纤引入的二阶色散即可。

立的近似条件是脉冲频谱宽度要足够窄。

3 数值模拟与分析

3.1 光纤对啁啾高斯脉冲波形及频谱的影响

展宽器输出脉冲啁啾率为 $3.2 \text{ ns}/6.5 \text{ nm}$ ^[12],中心波长为 1053 nm ,脉冲能量为 100 pJ ,峰值功率为 29.36 mW ,振幅峰值 $0.1713 \text{ W}^{1/2}$,其表达式 $A(0, T)$ 可表示如下

$$A(0, T) = 0.1713 \exp(-T^2/4B) \exp(-i\omega_0 T). \quad (2)$$

不考虑损耗情况下,对于输入光纤的脉冲,非线性薛定谔方程中各参数取值分别为 $\beta_2 = 17.263 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = -4.3202 \times 10^{-2} \text{ ps}^3/\text{km}$, $\gamma = 4.1625 \text{ (W} \cdot \text{km)}^{-1}$,拉曼常数 $T_R = 3 \text{ fs}$ ^[13,14]。为求解非线性薛定谔方程,在整个长度的光纤上,忽略色散的作用,只考虑非线性过程的影响,把求解所得结果作为初始条件,再对忽略非线性效应而只考虑色散的方程求解^[15],得到光纤输出脉冲表达式

$$A(h, T) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \exp\left(\frac{i\beta_2 h \omega^2}{2} + \frac{i\beta_3 \omega^3 h}{6}\right) \mathcal{F} \left[A(0, T) \exp\left(\frac{h\gamma |A(0, T)|^2}{2B\omega_0} (2iB\omega_0 - iT - i\omega_0 T_R T_0 T - T_0 T)\right) \right] \right\}, \quad (3)$$

式中 h 为光纤长度, $B = (t_0^2 + i\mu_2)/2$,展宽器二阶色散 $\mu_2 = 2.4022 \times 10^{-22} \text{ s}^2$, $t_0 = 1.51 \times 10^{-13} \text{ s}$, $T_0 = 1.6 \times 10^{-9} \text{ s}$ 。对(3)式进行数值模拟,结果如图 2 所示。

图 2 各曲线分别表示对于啁啾率为 $3.2 \text{ ns}/6.5 \text{ nm}$ 、峰值功率 29.36 mW 的输入高斯型啁啾脉

冲,光纤长度分别为 $100, 200, 400$ 和 600 m 时的输出脉冲波形。图中曲线显示,光纤的引入使脉冲宽度增大,且光纤长度越大脉宽增量越大,但脉宽增量远小于输入脉冲脉宽。分析可知,这种展宽效应主要是由单模光纤的正值二阶色散导致。由展宽器引

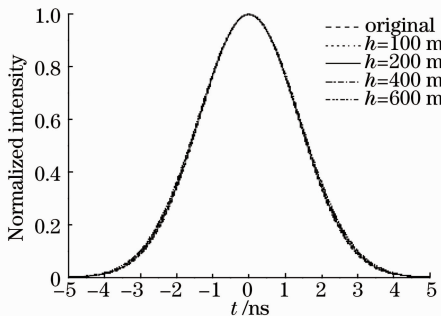


图 2 不同长度光纤对啁啾脉冲波形的影响

Fig. 2 Effects of various fiber lengths on waveforms of the chirped-pulse

入的二阶色散量为 240.22 ps^2 , 由光纤引入的二阶色散量为二阶色散系数与光纤长度的乘积 $\beta_2 h$, 粗略估算可知, 当光纤长度取值百米量级时, 光纤二

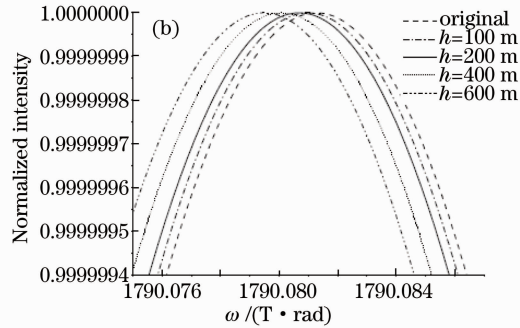
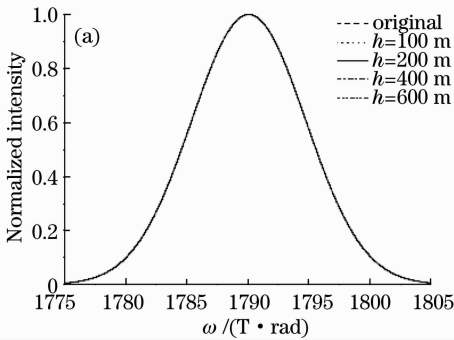


图 3 不同长度光纤对啁啾脉冲频谱(a)与中心频率(b)的影响

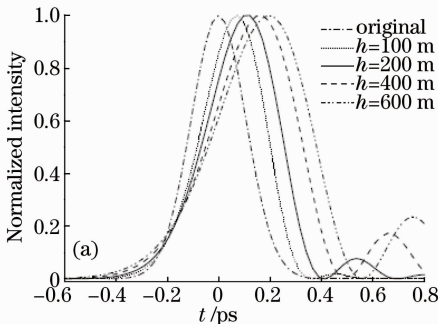
Fig. 3 Effects of various fiber lengths on frequency spectrums (a) and center angular frequencies (b) of the chirped-pulse

3.2 压缩器输出波形及对比度分析

为研究光纤的引入对最终输出的超短脉冲的影响, 特别是对对比度的影响, 必须得到啁啾脉冲经过压缩器压缩之后的波形。假设压缩器对脉冲引入的相位为 $\phi(\omega)$, 则被压缩之后的输出脉冲 $B(t)$ 表达式为^[16]

$$B(t) = \mathcal{F}^{-1} \{ \exp[i\phi(\omega)] \mathcal{F}[A(h, T)] \}. \quad (4)$$

忽略放大过程引入的相位, 欲使压缩器将光纤



输出脉冲压缩至傅里叶极限, 需要补偿掉包括展宽器与光纤引入的二阶色散, 则相位 $\phi(\omega)$ 如(5)式

$$\phi(\omega) = -\mu_2 (\omega - \omega_0)^2 / 2 - i\beta_2 h (\omega - \omega_0)^2 / 2, \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式, 通过数值模拟得到最终压缩输出脉冲的波形如图 4 所示。

图 4(a) 给出了压缩器的输出脉冲强度归一化波形, 脉冲峰值向后沿偏移, 脉冲后沿变陡, 且随着光纤长度的增大, 偏移量增加。三阶色散与自陡峭

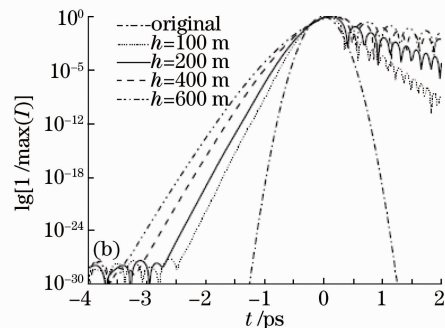


图 4 不同长度单模光纤对压缩脉冲的归一化强度波形(a)与对比度(b)的影响

Fig. 4 Effects of various fiber lengths on the normalized waveforms (a) and the contrasts of the compressed pulse (b)

阶色散不足展宽器二阶色散的 10%, 不会影响压缩器的设计。由于光纤输入脉冲峰值功率较低, 非线性效应对脉冲波形的影响可以忽略。

图 3 曲线分别表示不同光纤长度取值情况下, 光纤对输出脉冲的频谱影响。脉冲在单模光纤中传输, 自相位调制效应一般会导致脉冲频谱的展宽, 自频移效应会导致脉冲中心频率偏移。如图 3(a) 所示的结果显示, 非线性效应对脉冲的频谱宽度影响极小, 可以忽略; 图 3(b) 所示自频移效应导致的中心频率偏移量随着光纤长度增大而增大, 由于脉冲峰值功率很低, 使得中心频率偏移量很小。例如: 峰值功率为 29.36 mW 时光纤长度取 600 m 对应的中心波长的偏移量约 0.3 pm, 相对于 6.5 nm 的光谱宽度, 不足万分之一。百米量级的光纤对峰值功率为几十毫瓦的啁啾脉冲输出波形与频谱影响很小。

效应都可以引起后沿变陡,啁啾脉冲峰值功率较低时,分析显示,三阶色散是造成后沿变陡的主要原因。另外,脉冲后沿出现了拖尾,旁瓣脉冲数量以及强度随着光纤长度的增加而增多增大,这也是由单模光纤所具有的负值三阶色散引起。

对比度是指,在某一时刻,激光主脉冲峰值光强与此时刻的背景光强之比。为直观描述光纤的引入对输出脉冲的对比度的影响,图 4(b)给出了归一化强度的对数取值。图中 I 为光强曲线在各个时间点上的取值对应对比度的倒数。对打靶脉冲对比度的要求源自脉冲前沿波形,拍瓦系统要求输出脉冲的前沿在 10 ps 的时间宽度上对比度高于 10^8 ,由图 4(b)可以看出脉冲前沿的对比度在 3 ps 量级上高于 10^{25} ,说明百米量级光纤不影响最终压缩脉冲的对比度。

4 结 论

依据非线性薛定谔方程,对于给定的输入脉冲,通过数值模拟,给出了啁啾脉冲经过单模光纤后的输出波形与频谱,分析显示,百米量级单模光纤的色散以及非线性效应对脉冲波形以及频谱的影响极小;又通过数值模拟,给出了经过压缩器之后的输出脉冲的归一化波形,分析显示在 3 ps 的时间窗口上,脉冲前沿对比度高于 10^{25} 。这说明拍瓦装置上光纤的引入可以实现同步控制与优化光束质量的同时不会影响输出脉冲的对比度。

参 考 文 献

- 1 E. Hugonnot, G. Deschaseaux, O. Hartmann *et al.*. Optical parametric chirped pulse amplification for the PETAL front-end; design and first results [J]. *Advanced Solid-State Photonics, OSA Technical Digest Series (CD) (Optical Society of America, 2007), Paper MB4*
- 2 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics, Third Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang *et al.* transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方等译,北京:电子工业出版社,2002

- 3 Chen Yongzhu, Xu Wencheng, Cui Hu *et al.*. The effect of fiber dispersion on generation of supercontinuum [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 297~301
陈泳竹,徐文成,崔虎等. 光纤色散对超连续谱产生的影响 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 297~301
- 4 M. J. Potasek, G. P. Agrawal. Self-amplitude-modulation of optical pulses in nonlinear dispersive fibers [J]. *Phys. Rev. A*, 1987, **36**(8): 3862~3867
- 5 E. Bourkoff, W. Zhao, R. I. Joseph. Evolution of femtosecond pulses in single-mode fibers having higher-order nonlinearity and dispersion [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(4): 272~274
- 6 D. Marcuse. Pulse distortion in single-mode fibers 3 chirped pulses [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(20): 3573~3579
- 7 H. Nakatsuka, D. Grischkowsky, A. C. Balant. Nonlinear picosecond-pulse propagation through optical fibers with positive group velocity dispersion [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1981, **47**(13): 910~913
- 8 K. Iwashita, K. Nakagawa, Y. Nakano *et al.*. Chirp pulse transmission through a single-mode fiber [J]. *Electronics Letters*, 1982, **18**(20): 873~874
- 9 Wang Jing, Miao Hongli, Li Shangde *et al.*. The chirp induced by third-order dispersion in a single-mode fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(8): 739~742
王晶,苗洪利,李尚德等. 单模光纤中三阶色散所致啁啾 [J]. *中国激光*, 1998, **A25**(8): 739~742
- 10 Deng Chunnian, Wen Shuangchun. Breakup mechanisms for chirped pulse in the single-mode fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1035~1040
邓春年,文双春. 单模光纤中啁啾脉冲的分裂机制 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1035~1040
- 11 R. A. Fisher, W. K. Bischel. Numerical studies of the interplay between self-phase modulation and dispersion for intense plane-wave laser pulses [J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**(11): 4921~4934
- 12 Yang Qingwei, Guo Ailin, Xie Xinglong *et al.*. Stretcher system in high-energy petawatt laser facility [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(7): 66~71
杨庆伟,郭爱林,谢兴龙等. 高能拍瓦激光装置中的展宽系统 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(7): 66~71
- 13 R. H. Stolen. Nonlinearity in fiber transmission [J]. *IEEE*, 1980, **68**(10): 1232~1236
- 14 A. K. Atieh, P. Myslinski, J. Chrostowski *et al.*. Measuring the Raman time constant T_r for soliton pulse in standard single mode fiber [J]. *J. Lightwave Technology*, 1999, **17**(2): 216~221
- 15 M. J. Potasek, Govind P. Agrawal, S. C. Pinault. Analytic and numerical study of pulse broadening in nonlinear dispersive optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(2): 205~211
- 16 Edmond, B. Treacy. Optical pulse compression with diffraction gratings [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1969, **5**(9): 454~458