

利用光纤—光栅对1.06μm皮秒光脉冲压缩

杨鸿儒 常增虎 龚美霞 牛丽宏

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

摘要 本文报道了利用光脉冲在10m单模光纤中传播所产生的自相位调制(SPM)、互相位调制(XPM)、群速度色散(GVD)和受激喇曼散射(SRS)的共同作用, 实现光脉冲光谱和时间加宽, 经光栅对线性啁啾补偿后, 将脉宽15ps的1.06μm光脉冲压缩至小于6ps, 能量大于100nJ, 压缩比>2.5。

关键词 单模光纤; 自相位和互相位调制; 群速度色散; 受激喇曼散射

0 引言

自从Fork¹提出利用碰撞脉冲锁模技术获得超短光脉冲以来, 人们对超短光脉冲的产生进行了大量的研究。尤其是利用光纤—光栅对光脉冲的压缩是产生多种激光波长超短脉冲的重要手段;²⁻³并且利用此方法得到了目前最短的6fs光脉冲。

人们普遍认为当光纤—光栅对压缩器工作在受激喇曼散射(SRS)阈值以下时, 可以避免SRS效应引起的光脉冲包络和啁啾的破坏, 从而提高光脉冲的压缩质量和压缩比。^{3, 7, 8}但是Kuckartz等⁹⁻¹¹证明了当光纤—光栅对压缩器工作在SRS阈值以上时, 由于光纤中SPM, XPM, GVD和SRS的共同作用, 不仅获得了理想的压缩光脉冲, 而且得到了单级光纤—光栅对最大的光脉冲压缩比(130倍);²压缩器的稳定性进一步提高¹¹。

在我们的实验中, 注入光纤的峰值光功率密度高达 $1.3 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, 远大于光纤中的SRS阈值。利用光纤中的SPM, XPM, GVD和SRS的非线性共同作用, 实现脉冲光谱和时间加宽, 经光栅对线性啁啾补偿后, 将15ps的1.06μm光脉冲压缩至小于6ps, 能量大于100nJ。

1 实验装置

图1是利用光纤—光栅对压缩光脉冲的实验分布图。泵浦源为CPM Nd:YAG激光器, 输出波长为1.06μm, 脉冲宽度为15ps。实验中所用的单模石英光纤芯径为

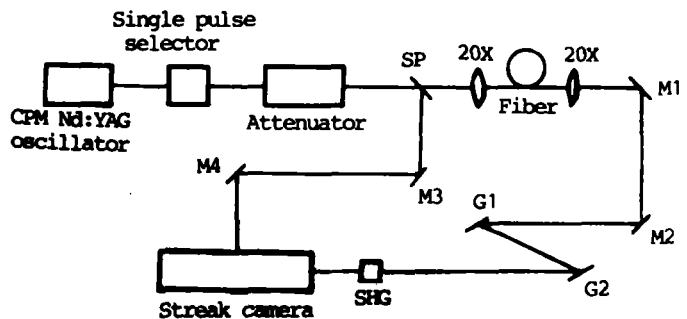


图1 光脉冲压缩的实验装置

Fig.1 Experimental arrangement of optical pulse compression.

收稿日期: 1991-07-22

8 μm , 长度10m。注入光纤的峰值功率密度为 $1.3 \times 10^{11} \text{W/cm}^2$ 。用BWS-5K I型条纹相机测量压缩脉冲宽度, 其实测时间分辨率为5ps。倍频晶体为KTP晶体。光栅为1200线对/mm, 60° 入射。

2 理论分析

假定入射激光和产生的斯托克斯光为平面波。则二者电场表示如下:

$$e_L(z, t) = \frac{1}{2} E_L(z, t) \exp[i(\omega_L t - k_L z)] + c. c \quad (1)$$

$$e_s(z, t) = \frac{1}{2} E_s(z, t) \exp[i(\omega_s t - k_s z)] + c. c \quad (2)$$

$E_\delta(z, t)$ 为脉冲复振幅($\delta=L, S$),

非线性电极化强度为:

$$P_L^{NL} = \frac{1}{2} \epsilon_0 [2n_L n_2 (E_L E_L^* + 2E_s E_s^*) + \frac{i \epsilon_0 c^2 n_L n_s}{2 \omega_s} g_R E_s E_s^*] \cdot E_L \exp[-i(\omega_L t - k_L z)] + c. c \quad (3)$$

$$P_S^{NL} = \frac{1}{2} \epsilon_0 [2n_s n_2 (E_s E_s^* + 2E_L E_L^*) - \frac{i \epsilon_0 c^2 n_L n_s}{2 \omega_s} g_R E_L E_L^*] \cdot E_s \exp[-i(\omega_s t - k_s z)] + c. c \quad (4)$$

在 P^{NL} 表达式中, 第一项代表SPM贡献, 第二项表示与XPM有关的喇曼磁化率实部的贡献, 第三项表示SRS贡献。

考虑到脉冲包络的慢变近似, 得到以下两个耦合方程。

$$\frac{\partial E_L}{\partial z} + \frac{i}{2} k_L' \frac{\partial^2 E_L}{\partial t^2} = i \frac{n_2}{n_L} k_L (E_L E_L^* + 2E_s E_s^*) E_L - \frac{\epsilon_0 n_L n_s \omega_L^2}{4k_L \omega_s} \cdot g_R E_s E_s^* E_L \quad (5)$$

$$\frac{\partial E_s}{\partial z} - (k_L' - k_s') \frac{\partial E_s}{\partial t} + \frac{i}{2} k_s' \frac{\partial^2 E_s}{\partial t^2} = i \frac{n_2}{n_s} k_s (E_s E_s^* + 2E_L E_L^*) E_s - \frac{\epsilon_0 n_L n_s \omega_s}{4k_s} g_R E_L E_L^* E_s \quad (6)$$

g_R 为喇曼增益系数, $n_2 = 3.2 \times 10^{-16} \text{cm}^2/\text{W}$, 可以看出在耦合波方程中包含了SPM, XPM, SRS, GVD和SRS与GVD在空间上的分离效应。对(5), (6)方程进行数值计算, 就可以得到光在光纤中传播时光谱和时间的变化规律。

在频域内, 光栅对的相位函数 $\Phi_c(\omega) = \Phi_0 - \gamma \omega^2$ (7)

其中压缩常数: $\gamma = \frac{2\pi^2 c b}{\omega^2 d^2} \frac{1}{1 - (2\pi c / \omega d - \sin\theta)^2}$ (8)

上式中 b 为两光栅垂直距离, d 是光栅常数, θ 为光束入射角。在实验中取 $\theta = 60^\circ$ 。仅考虑光纤中自相位调制和群速色散效应时光脉冲通过光纤—光栅对的计算机模拟结果, 见

文献 14。

3 实验结果与分析

图 2 是输入光纤的单脉冲波形, 其脉冲半宽为 15ps。通过 20 倍的显微物镜耦合进入光纤。光纤中光功率密度远大于光纤中 SRS 阈值。经 10m 光纤后光脉冲波形见图 3。可以看出通过光纤出射的光脉冲为近似的方波波形。展宽了大约 5 倍。

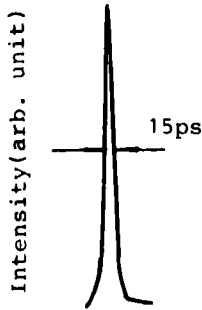


图 2 脉宽为 15ps 的光纤注入脉冲形状
Fig.2 Input pulse profile of optical fiber pulsewidth is 15ps.

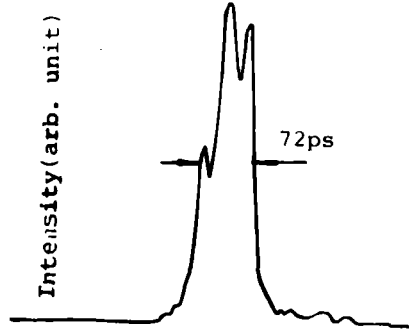


图 3 脉宽为 72ps 的光纤输出脉冲形状
Fig.3 Output pulse profile of optical fiber The pulsewidth is 72ps.

在实验中我们发现, 在注入光纤峰值光功率密度和脉冲宽度一定且光纤较短时, 由于 SRS 作用, 光脉冲前部被抽空, 激光波形受到强烈破坏, 啁啾亦受到破坏。

随着光纤长度的进一步增大, 光脉冲受 GVD 作用失去对称, 前沿变陡并再次变得光滑, 此时啁啾由于足够长度光纤中 SPM, XPM 的作用而呈现线性化, 脉冲宽度进一步增加。当光纤长度再增加时, 由于 SPM, XPM 的进一步增强, 脉冲时间包络变成近似方波波形。脉冲前部受 SRS 作用被损耗而变低, 见图 3, 此时啁啾在整个脉冲长度内都几乎呈线性化, 有利于光栅对的线性啁啾补偿。同时由于方波包络具有陡峭的上升沿和下降沿, 由付里叶变换关系得知, 脉冲的频谱宽度将大大加宽, 经光栅对补偿后将得到更窄的压缩光脉冲。这就证明当压缩器工作在 SRS 阈值以上时光脉冲压缩比将进一步提高。

图 4 为压缩后光脉冲波形图, $1.06\mu\text{m}$ 光脉冲半宽为 6ps 图 4 中压缩脉冲无基底存在, 我们认为是条纹相机的时间分辨率所限而造成的。说明压缩器的压缩比是很大的。通过计算在我们实验中单级压缩比可高达 100。

感谢赵积来, 刘进元, 任友来等同志提供了条纹相机。

本课题得到西安光机所所长基金的资助。

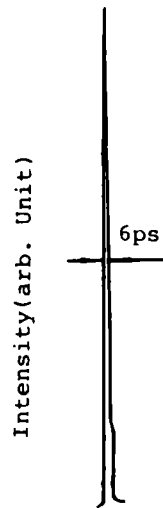


图 4 脉宽小于 6ps 的已压缩脉形
Fig.4 Compressed pulse width is less than 6ps.

参 考 文 献

- 1 Fork R L, *et al. Appl Phys Lett*, 1981, **38**:671-672
- 2 Treacy E B. *Phys Lett*, 1968, **28A**(1):34-35
- 3 Gomes A S L, *et al. Opt Commun*, 1985, **54**(6):377-382
- 4 Gouveia-Neto A S, *et al. Opt Commun*, 1987, **64** (2):163-166
- 5 Shank C V, *et al. Appl Phys Lett*, 1982, **40**(9):761-763
- 6 Fork R L, *et al. Opt Lett*, 1987, **12**(7):483-485
- 7 Stolen R H, *et al. IEEE J Quant Electron*, 1986, **QE-22**:2254
- 8 Schadt D, *et al. J O S A*, 1987, **B4**:456
- 9 Sibbet W. *SPIE*, 1988, **1023**:29-34
- 10 Dianov E M, *et al. Paper Tup36, Tech. Dig. IQEC88*
- 11 Kuckartz M, *et al. SPIE*, 1988, **1017**:234-241
- 12 Kuckartz M, *et al. Opt Quant Electron*, 1987, **19**:237
- 13 Kuckartz M, *et al J O S A*, 1988, **B5**:1353
- 14 常增虎等. 高速摄影与光子学, 1991, **20**(1):69-71

COMPRESSION OF 1.06 μ m PS PULSES BY USING FIBER GRATING-PAIR

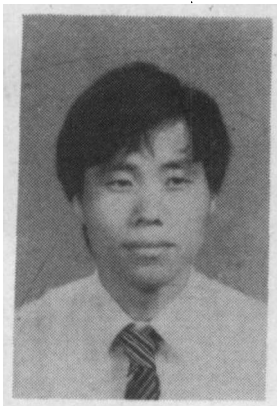
Yang Hongru, Chang Zenghu, Gong Meixia, Niu Lihong

*State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics
and Precision Mechanics, Academia Sinica, Xian 710068*

Received date:1991-07-22

Abstract the paper reported that combined action of self-and cross-phase modulation (SPM and XPM), group-velocity dispersion (GVD), and stimulated Raman scattering (SRS) experienced by pulses propagating along a 10m-long single-mode optical fiber leads to spectrally and temporally broadened pulses exiting the fiber. After linear chirp is compensated by a grating-pair. The experimental results of less than 6ps optical pulse compressed from 115ps pulse have been got. Compression ratio is more than 2.5.

Keywords Single-mode fiber; Self-and Cross-phase modulation; Group-Velocity Dispersion; Stimulated Raman Scattering



Yang Hongru received the B.S. degree in opto-electronics from Xidian University, in 1986. Since 1986 he was a research staff number at Department of Opto-electronics of Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, working on generation for ultrashort light pulse and diagnosis for soft x-ray picosecond streak/framing cameras.