

# 光纤-光栅对激光脉冲压缩

樊立明 李士英 王世杰 陈时胜 徐至展  
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

## 提 要

本文报道用 2m 单模保偏光纤实现脉冲光谱加宽, 经光栅对补偿后, 将 40 ps 脉冲压缩到小于 10 ps 的实验结果, 分析了影响光脉冲压缩质量的原因。实验结果与理论较好地吻合。

关键词: 光纤, 自相位调制, 脉冲压缩。

## 一、引 言

短脉冲激光器是开展激光等离子体研究、X 射线激光器、强场作用下的原子物理研究及超短脉冲激光光谱学研究必不可少的工具。由于激光激活介质光谱宽度的限制, 主动锁模 Nd:YAG 激光器的脉冲宽度约 150 ps 左右, 即使对于光谱较宽的 Nd:YLF 激光器, 主动锁模宽度仍限制在 50 ps 以上<sup>[1]</sup>; 虽然主被动对撞锁模技术已使激光器的输出宽度达 10 ps, 但要获得更窄的脉冲就必须借助于其它的方法。

目前压缩激光脉冲比较引人注目的方法就是利用光纤, 其压缩脉冲的机制可分两类: 一种是借助光纤中的自相位调制(SPM)和反常色散(GVD)同时作用, 在适当的条件下, 光脉冲在光纤传输过程中形成稳定的孤立子脉冲, 它可将皮秒脉冲压缩到飞秒脉冲<sup>[2]</sup>; 另一种是光纤-光栅对光脉冲压缩, 它已成为实现多种波长超短激光脉冲压缩的重要手段<sup>[3~6]</sup>。当光脉冲通过正常色散的光纤时, 由于光脉冲的自相位调制使得泵浦光脉冲光谱加宽, 得到一“啁啾”脉冲, 随后由一光栅对色散延迟线予以补偿而使脉冲在时间上得到压缩。利用光纤-光栅对脉冲压缩器已获得 6 fs 的超短激光脉冲<sup>[4]</sup>。

本文报道用 2m 单模保偏光纤实现脉冲光谱加宽, 经光栅对补偿后, 将 40 ps 脉冲压缩到小于 10 ps 的实验结果, 并分析了影响光脉冲压缩质量的原因。

## 二、实验结果及分析

图 1 所示为实验装置框图。一个主被动对撞锁模 Nd:YAG 激光器产生 50 ps 的脉冲序列, 由一对正交偏振棱镜和一个普克尔盒组成的选脉冲器件从序列脉冲中选出单个脉冲并送入双程 Nd:YAG 放大器进行放大, 经 KDP 晶体倍频后, 由显微物镜耦合进入光纤, 光纤出射激光准直后用一对平行放置的光栅对  $G_1$ 、 $G_2$  将光脉冲双程压缩, 压缩后的光脉冲由条纹相机测量; 同时用快速光电二极管和示波器来监测脉冲能量的起伏及单脉冲选择情况(单

脉冲或多脉冲)。光纤中的自相位调制只与光纤中的激光功率密度有关,而与波长无关,倍频晶体不可能将  $1.06\ \mu\text{m}$  的光脉冲全部转化为  $532\ \text{nm}$  的绿光,为了消除  $1.064\ \mu\text{m}$  脉冲激光对自相位调制的影响,实验用  $45^\circ$  全反射镜  $S_1$ (对  $1.064\ \mu\text{m}$  全反,对  $532\ \text{nm}$  具有较大的透过率)反射掉  $1.064\ \mu\text{m}$  的激光。 $L_1, L_2$  为 10 倍显微物镜; $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6$  为全反射镜, $S_2$  为分束镜,光栅为  $1200\ \text{l/mm}$  的全息光栅,激光入射角  $60^\circ$ ;光纤采用单模保偏可见光光纤(截止波长为  $632.8\ \text{nm}$ ),光纤长  $2\ \text{m}$ ,光纤芯径  $4\ \mu\text{m}$ ,损耗为  $15\ \text{dB/km}$ 。光纤耦合效率  $20\%$ 。

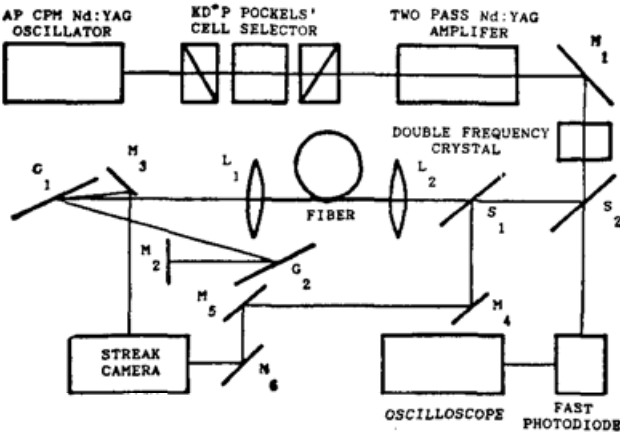


Fig. 1 Experimental setup for the measurement of fiber-grating optical pulses compression

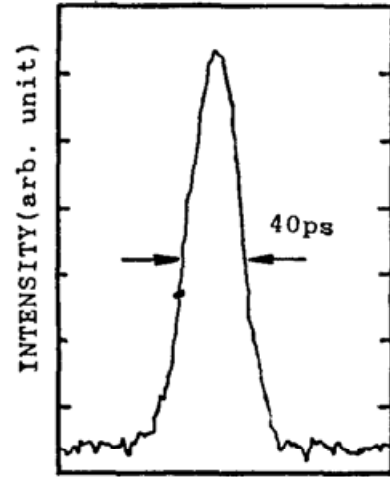


Fig. 2 Pulse profile of input fiber. The pulsewidth is 40ps

激光能量耦合到光纤时,光纤中的功率密度很容易超过受激喇曼散射(SRS)阈值,伴随泵浦脉冲的自相位调制将发生受激喇曼散射;由于群速度色散,泵浦脉冲和斯托克斯脉冲将发生空间的分离(Walk-off),脉冲分离所需要的距离  $l_{w0}$  为<sup>[7]</sup>:

$$l_{w0} = T \cdot C \cdot \nu / [D(\lambda) \cdot \Delta\nu], \tag{1}$$

式中  $\Delta\nu$  为泵浦激光脉冲与斯托克斯脉冲的频率差,  $\nu$  为平均频率,  $T$  为泵浦脉冲的宽度,  $D(\lambda)$  为光纤中的色散。对于  $532\ \text{nm}$  的泵浦波长,  $\nu/C = 18577\ \text{cm}^{-1}$ ,  $D(\lambda) = 0.073$ ,  $\Delta\nu/C = 440\ \text{cm}^{-1}$ 。对于一个  $40\ \text{ps}$  的激光脉冲,泵浦脉冲和斯托克斯脉冲分离所需要的距离是  $6.94\ \text{m}$ 。在斯托克斯脉冲的形成、分离过程中,泵浦激光将发生波形重整,导致自相位调制功率谱向长波方向移动,使得“啁啾”脉冲的线性调频区减小,影响最终的脉冲压缩效果,所以本文选用较短的光纤,即  $l \approx (1/3)l_{w0} \approx 2\ \text{m}$ 。

脉冲激光在光纤中的非线性过程严格说应该用非线性薛定谔方程描述,在较好的近似下,激光自相位调制产生的功率谱宽度  $\Delta\omega$  为<sup>[8]</sup>

$$\Delta\omega \approx 2.8 \cdot (\Delta\phi + 1) / T, \tag{2}$$

式中  $T = 2\sqrt{\ln 2} \tau$ ,  $\tau$  为激光脉冲的半宽度,  $\Delta\phi$  为相移。在本文的实验条件下,由自相位调制产生的对称光谱宽度为  $8.0\ \text{nm}$ <sup>[9]</sup>。于是,光栅对间距  $b$  可由下式给出<sup>[8]</sup>:

$$b = 3.22 \cdot (1800/d)^2 \cdot (1.064/\lambda)^3 \cdot \cos^2 \gamma \cdot T^2 / \Delta\phi, \tag{3}$$

$\lambda$  为激光波长,  $\gamma$  为光栅上激光的入射角,  $d$  为光栅常数。如将  $\lambda = 532\ \text{nm}$ ,  $\gamma = 60^\circ$ ,  $d = 1200\ \text{l/mm}$  代入(3)式,估算出光栅间距为  $1.7\ \text{m}$ 。

斯托克斯激光的存在将严重影响激光脉冲压缩质量,在实验中微调光栅  $G_1$ ,使得斯托

克斯光谱偏离光栅  $G_2$ , 这样, 压缩只对泵浦激光进行。

图 2 是用条纹相机所测到的光纤输入的单脉冲波形, 其典型半宽度为 40 ps。图 3 是激光经 2m 光纤后的时间波形, 半宽度为 55 ps; 在脉冲前部有较强的斯托克斯脉冲, 脉冲后部为泵浦脉冲, 和斯托克斯脉冲部分重叠, 喇曼转换效率高于 50%。图 4 是用光栅色散、透镜聚焦后分别测量的泵浦脉冲和斯托克斯脉冲波形, 由图 4 明显可以得到: (1) 泵浦脉冲和斯托克斯脉冲波形变的平坦, 这一点对于进行能量放大是非常有利的; (2) 泵浦脉冲和斯托克斯脉冲宽度都大于入射光纤的脉冲宽度, 并且斯托克斯脉冲宽度较大。事实上, 光纤中自相位调制和受激喇曼散射几乎同时发生, 且斯托克斯脉冲也存在自相位调制, 在喇曼转换效率高于 50% 的情况下, 斯托克斯脉冲的光谱展宽更为明显<sup>[9]</sup>。

图 5 是光栅对距离不匹配时的压缩脉冲波形。光栅对对脉冲的压缩是基于对激光脉冲的不同光谱成分的相对延迟而进行补偿, 使脉冲中长波光经过较长的光程, 而短波分量经由较短的光程。所以只有在光谱宽度与光栅对间距及入射角、光栅常数、脉冲宽度完全匹配的情况下, 才能实现理想的脉冲压缩; 反之, 就有可能使脉冲宽度增加, 成为一个正常色散延迟线。图 5(a) 是光栅对间距完全不匹配时, 由光栅产生的色散波形加宽, 脉冲半宽度为 65 ps, 和图 3 相比, 宽度增加 15 ps。调整光纤耦合能量(等价于调整光栅对间距), 便得到图 5(b) 的脉冲压缩结果, 显然, 此时脉冲尖峰较陡, 而其底部却有较宽的阶梯, 说明光栅对只作了部分补偿。仔细调整光纤输入能量后, 可得到稳定的压缩光脉冲, 如图 6 所示, 此时压缩后的脉冲两边比较对称, 且无任何边带。图 6 所示的脉冲宽度为 10 ps\*。

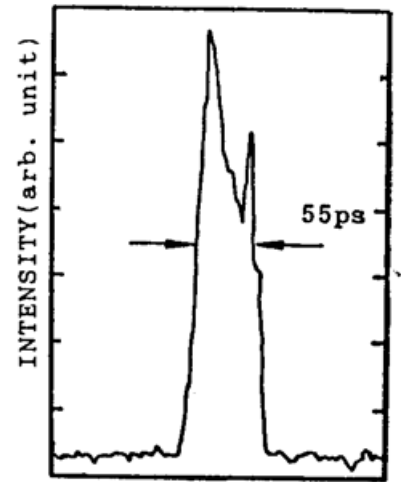


Fig. 3 Output pulse profile from a 2m single-mode polarization-preserving fiber. The pulsewidth is 55 ps

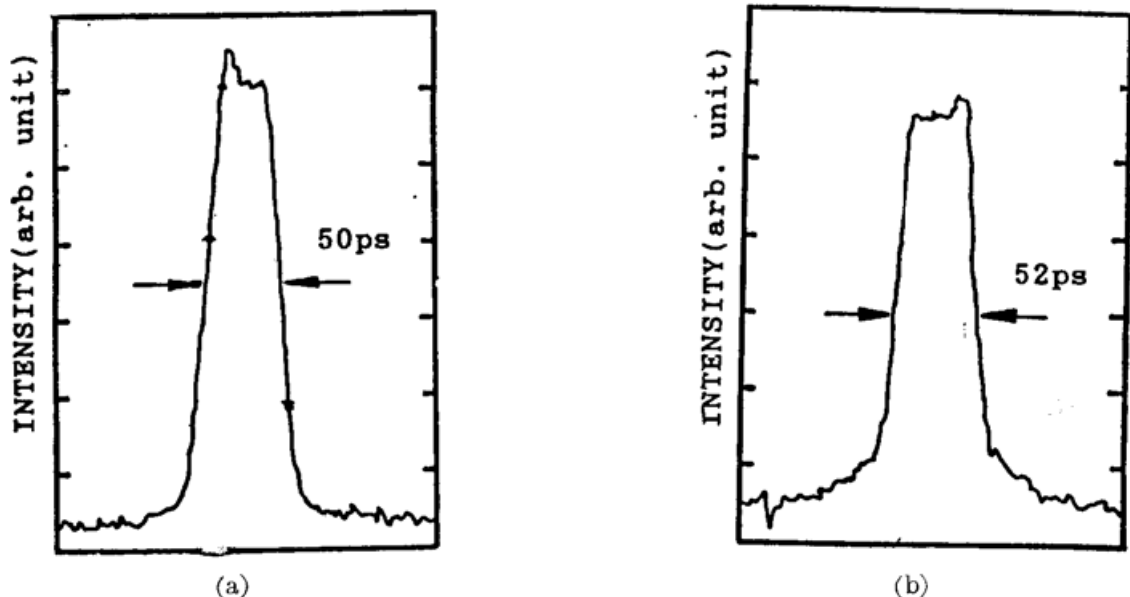


Fig. 4 The pumping and Stokes pulses from a 2m single-mode polarization-preserving fiber. The pumping pulsewidth is 50 ps (a) and Stokes pulsewidth 52 ps (b)

\* 需要说明的是, 我们所用条纹相机分辨率为 10 ps, 而理论分析表明, 脉冲压缩倍数大于 15, 即实际的脉冲宽度可能远小于 10 ps。

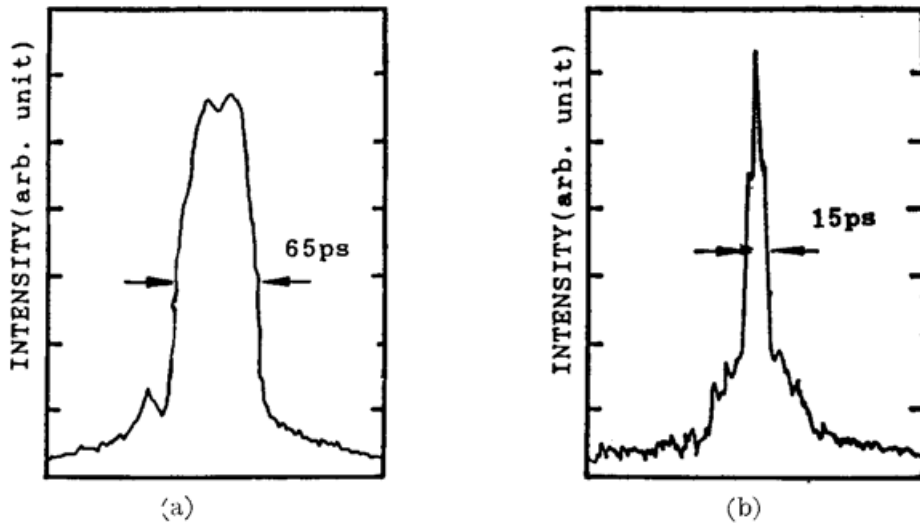


Fig. 5 Pulse profile after fiber-grating pulse compressor. The pulsewidth is 65 ps (a) and 15 ps (b)

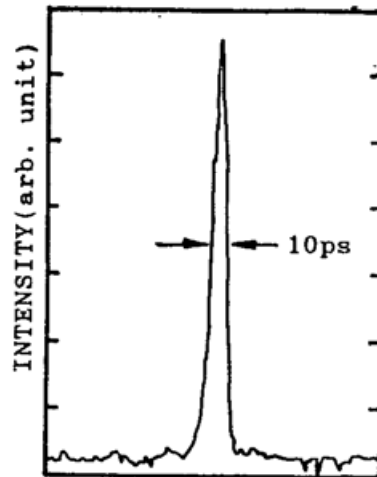


Fig. 6 Compressed pulse measured by streak camera. The pulsewidth is shorter than 10 ps

### 三、结 论

本文用光纤-光栅对脉冲压缩器对 40 ps 的可见光进行了宽度压缩, 得到脉冲宽度小于 10 ps 的稳定的超短脉冲, 实验结果符合预期目的。在提高测量精度, 适当改变参数的情况下, 可望实现飞秒超短脉冲输出; 在增加几级放大器的基础上, 完全可能获得峰值功率  $\geq 10^{12}$  W 的超短激光脉冲。

参加本工作的还有朱国英、陆海鹤同志, 作者感谢竺庆春同志在条纹相机测量方面给予的帮助, 感谢本所莽燕萍同志提供的单脉冲开关选择器以及上海科技大学光纤研究提供的单模保偏光纤。

### 参 考 文 献

- [1] P. Maine *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-24**, No. 2 (Feb), 398~403.
- [2] A. S. Gouveia-neo *et al.*; *Opt. Commun.*, 1987, **64**, No. 2, 163~166.
- [3] K. Tai *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **48**, No. 5 (Feb), 309~311.
- [4] C. H. Brito-Cruz *et al.*; «*Technical Digest Conference on Laser and Electro-Optics*» (Optical Society of

America, Washington DC, 1987), paper MD1.

- [5] W. H. Knox *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46**, No. 12 (Jun), 1120~1121.
- [6] A. M. Weiner *et al.*; *J. O. S. A(B)*, 1988, **5**, No. 2 (Feb), 364~372.
- [7] R. H. Stolen *et al.*; *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **QE-22**, No. 11 (Nov), 2154~2160.
- [8] A. S. Gomes *et al.*, *Opt. and Quant. Electron.*, 1988, **20**, No. 1 (Jan), 95~112.
- [9] 樊立明等;《光学学报》,1991, **11**. No. 2 (Feb), 161~165.

## Fiber-grating optical pulse compression

FAN LIMING, LI SHIYING, WANG SHIJIE, CHEN SHISHEN AND XU ZHIZHAN  
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 20 September 1990)

### Abstract

In this paper, We reported the results of less than 10 ps optical pulses compressed from 40 ps pulses using a fiber-grating pair optical pulse compressor, and analyzed some factors affect the compressed pulses quality. The results fit the expectation very well.

**Key words:** fiber self-phase modulation, optical pulse compression.