

光纤中强受激喇曼散射时的自相位调制*

樊立明 王世杰 李士英 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

在光纤-光栅对激光脉冲压缩中, 由于受激喇曼散射和自相位调制的竞争, 使得泵浦激光脉冲波形重整, 且自相位调制谱极不对称。本文用 2m 的单模保偏光纤, 在产生较强的受激喇曼散射的情况下, 得到较为对称的泵浦激光的自相位调制功率谱, 并讨论了自相位调制功率谱的一些特点。

关键词: 光纤, 自相位调制, 受激喇曼散射。

一、引 言

单模光纤中最重要的两个非线性过程是自相位调制和受激喇曼散射。自相位调制过程是光纤-光栅对脉冲压缩技术的基础, 而光纤-光栅对脉冲压缩技术已经成为一种产生超短激光脉冲的非常有效的手段。受激喇曼散射对于频率转换是很有用的, 但在光纤-光栅对激光脉冲压缩中, 由于受激喇曼散射与自相位调制的竞争而限制了光纤中的激光功率。在受激喇曼散射的斯托克斯脉冲形成过程中, 由于光纤中的群速度色散, 泵浦脉冲与斯托克斯脉冲将在空间上分离(Walk-off), 从而造成泵浦脉冲波形时间上不对称, 导致光纤输出的泵浦脉冲自相位调制功率谱向长波方向移动^[1,2], 使得“啁啾”脉冲的线性调频范围减小, 影响最终的脉冲压缩效果。所以, 人们认为, 要想获得高质量的超短激光脉冲压缩就必须尽可能地避免在光纤中产生受激喇曼散射^[3]。

在光纤-光栅对的脉冲压缩中, 当激光能量耦合进入光纤后, 激光的峰值功率非常容易超过受激喇曼散射的阈值, 所以对于存在受激喇曼散射情况下, 光纤中自相位调制研究就具有较大的意义。Weimer 等人研究了伴随受激喇曼散射产生条件下的自相位调制及激光脉冲压缩^[4], 从理论上指出: 只要使用一个非对称的频率窗口(Asymmetric Spectral-Window), 不仅可以获得高质量的脉冲压缩, 同时还可以提高输出能量的稳定性。

在以往的一些实验中, 为了获得较大的光谱展宽, 普遍采用较长的光纤(远大于空间上分离距离), 所以受激喇曼散射引起的光谱不对称非常严重。本文报道在较短光纤中的自相位调制实验。光纤长度 $l \approx (1/3)l_{w0}$, l_{w0} 为^[1]

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

式中 $\Delta\nu$ 是泵浦激光脉冲与斯托克斯脉冲的频率差, ν 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 532nm 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 ps 的激光脉冲, 泵浦脉冲和斯托克斯脉冲的分离距离是 6.94 m。实

实验表明, 最大的斯托克斯脉冲将在光纤中 $1.5 \sim 2l_{w0}$ 的位置上形成。为了避免斯托克斯脉冲对泵浦脉冲的影响, 实验选用较短的光纤, 即 $l \approx (1/3)l_{w0}$, 而通过提高光纤耦合能量来获得较大线性调频区的方法研究了光纤中的自相位调制功率谱, 得到了满意的结果。

二、实验装置

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 40 ps 的脉冲序列^[5], 两块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一个脉冲送入双程 Nd:YAG 放大器进行放大, 经 KDP 晶体倍频后, 一部分作为参考信号直接进入光谱仪, 以确定泵浦激光的中心波长位置; 大部分经过光纤后再进入光谱仪。实验中用 1 m 光栅光谱仪观察和拍摄脉冲激光的自相位调制和受激喇曼散射高分辨率光谱, 光谱仪的线色散为 $0.74 \text{ \AA}/\text{mm}$ 。用快速光电二极管和示波器来监测脉

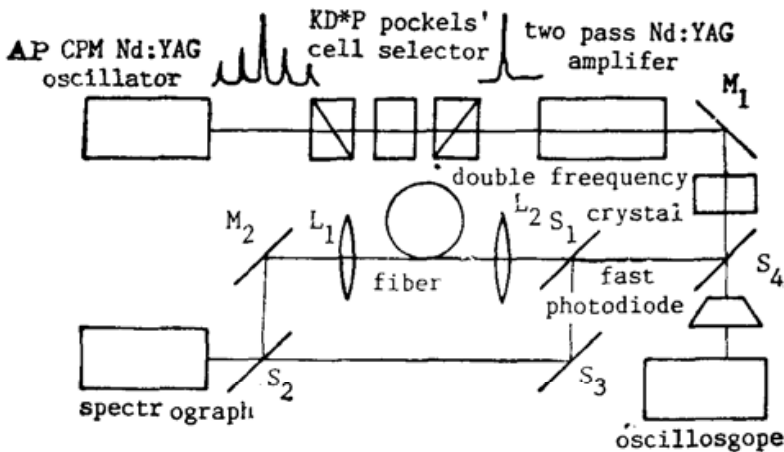


Fig. 1 Experimental setup for the measurement of Self-Phase-Modulated power spectra as a function of input power

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 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, 采用 45° 全反射镜 S_1 (对 $1.064 \mu\text{m}$ 全反, 对 532 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; 光纤采用单模保偏可见光光纤(截止波长为 6328 \AA), 光纤长 2 m , 光纤芯径 $4 \mu\text{m}$, 损耗为 $15 \text{ dB}/\text{km}$ 。光纤耦合效率 20% 。

三、实验结果

图 2(a) 为条纹相机所测的激光器输出的单脉冲波形, 典型的半宽度为 40 ps , 漂移 $\leq 5\%$ 。图 3 为不同输入功率时的自相位调制谱和一级受激喇曼散射谱。图 3(a)、(b) 是没有受激喇曼散射时的自相位调制功率谱, 从图上可以看出, 自相位调制谱以泵浦波长为中心对称地分布。提高光纤中的输入功率, 当输入功率超过受激喇曼散射的阈值时, 得到图 3(c) 的结果, 此时泵浦光的自相位调制功率谱仍是对称的。继续提高输入功率, 得到图 3(d)、(e) 的结果, 此时激喇曼转换效率高于 50% , 由泵浦光产生的自相位调制谱仍然有很好的对称区。图 4(a)、4(b) 分别为对应于图 3(d)、图 3(e) 自相位调制功率谱的黑度扫描曲线。从图 4 可知, 在两种输入功率下, 泵浦光的自相位调制谱非常相似, 自相位调制光谱展宽基本相等, 并且都有一个很大的对称区, 也即有较宽的“线性调频”区。在适当选择光谱窗口的情况下, 完

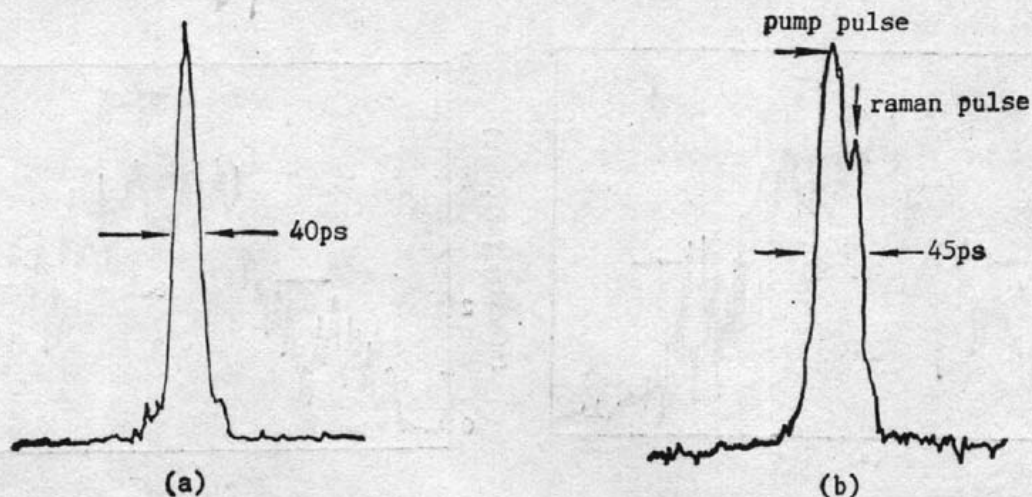


Fig. 2 Pulsewidth measured with streak camera (HAMAMATSU)
 (a) The input pulsewidth is 40ps; (b) The output pulsewidth from a 2m fiber is 45 ps.
 Pump spectra Raman spectra

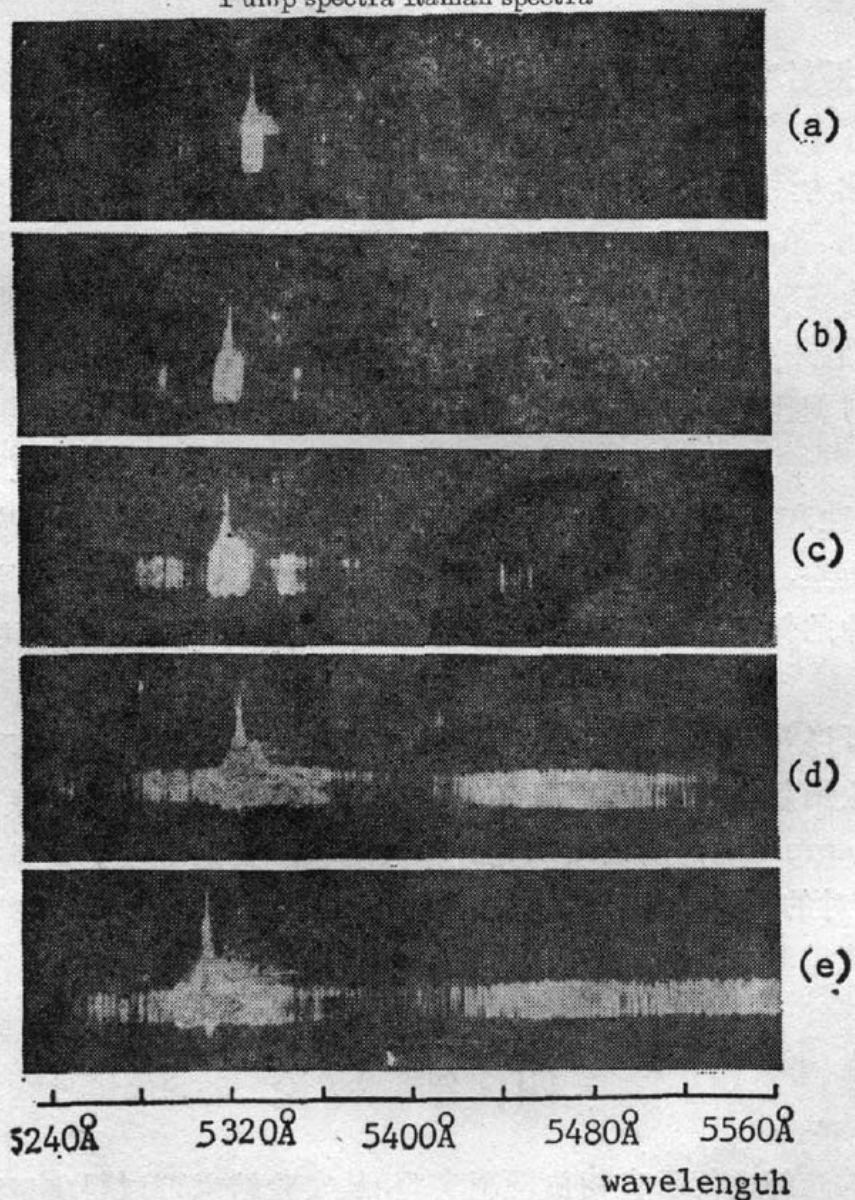


Fig. 3 Photographies of high-resolution power spectra measurement using a 1m spectrograph. The input pulsewidth is 40ps. Fiber length is 2m. Raman conversion is higher than 50% for Fig. 3 (d) and (e).

全可以获得高质量的激光脉冲压缩。

众所周知, 光纤中的自相位调制起源于光场感应的折射率变化 Δn 为:

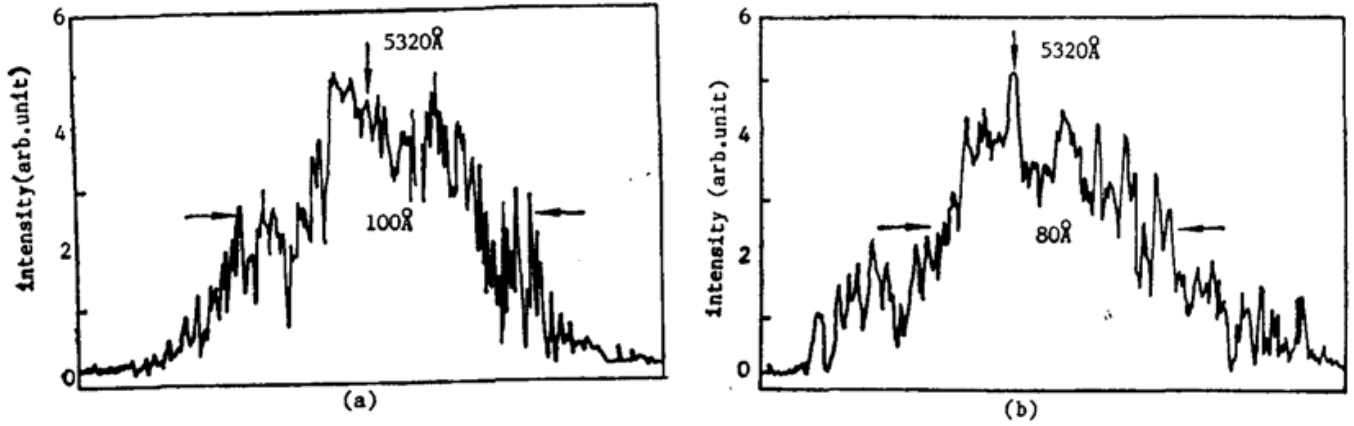


Fig. 4 High-resolution power spectrum measurement using a 1m spectrograph.
The Raman conversion is $>50\%$. Pulseth width is 44ps

$$\Delta n = (1/2)n_2 |E|^2, \quad (2)$$

式中 n_2 为非线性折射率。当激光脉冲通过长为 l 的光纤后, 该脉冲的相位变化为:

$$\Delta\Phi(l) \sim (\omega/2c) \cdot l \cdot n_2 \cdot |E|^2. \quad (3)$$

而相应的频率变化为:

$$\Delta\omega(l) \propto |E|^2, \quad (4)$$

即 $\Delta\omega$ 正比于光场强度的时间微分。在光纤较短的情况下, 泵浦激光脉冲与斯托克斯脉冲仍叠加在一起, 不可能产生空间上的分离, 总的脉冲形状没有太大的变化, 如图 2(b) 所示。与无受激喇曼散射时相比, 光强度对时间的微分保持不变, 所以从总的效果来看, 自相位调制谱与无受激喇曼散射时相比没有多大的变化。相反, 在光纤较长的情况下, 由于光纤中的群速度色散, 泵浦脉冲和斯托克斯脉冲在空间上分离, 并且由于斯托克斯脉冲形成过程中导致泵浦脉冲的波形重整, 所以泵浦激光的自相位调制谱将非常不对称。虽然在较短的光纤中也发生泵浦激光脉冲的耗尽和波形重整, 但它们对自相位调制谱的影响可以由斯托克斯脉冲部分地得以补偿。

从图 3 中还可以看出, 在伴随受激喇曼散射的情况下, 靠提高输入功率, 并不能增大泵浦激光脉冲的自相位调制谱的宽度, 而且光纤输出的泵浦激光能量将保持适当的水平不变, 即出现能量嵌位(Clamping), 所以增加光纤输入功率, 只是增强了光纤中的受激喇曼散射。显然在光纤-光栅对的激光脉冲压缩中, 通过选择较大的输入功率, 以获得稳定宽度的自相位调制和稳定的能量输出, 使光脉冲压缩质量和功率稳定度得以改善。

四、结 论

本文用较短的光纤进行了自相位调制实验, 从实验结果可以得出以下结论:

(1) 利用较短的光纤可以避免群速度色散对脉冲波形的影响; 在产生较强的受激喇曼散射的条件下, 泵浦激光脉冲可以产生宽度稳定的自相位调制功率谱, 该功率谱有一个较大的“线性调频”区, 在适当选择频率窗口和其它参数后, 可以获得宽度稳定的压缩脉冲;

(2) 当光纤中产生受激喇曼散射后, 泵浦激光将出现能量嵌位效应, 所以在光纤-光栅对脉冲压缩中, 可以通过提高光纤的输入功率(高于受激喇曼散射阈值), 以改善输出激光功率

的稳定度。

感谢朱国英, 陆海鹤同志给予的帮助。本实验所用的单脉冲开关由中国科学院上海光学精密机械研究所莽燕萍同志提供, 谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] R. H. Stolen *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22**, No. 11 (Nov), 2154~2160.
- [2] Dieter Schadt *et al.*; *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1986, **3**, No. 5 (Oct), 1257~1262.
- [3] A. S. L. Gomes *et al.*; *Appl. Phys. (B)*, 1986, **39**, No. 1, 43~46.
- [4] A. M. Weiner *et al.*; *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1988, **5**, No. 2, 364~372.
- [5] 王世杰等;《中国激光》, 1989, **16**, No. 8, 489~492.

Self-phase-modulation in single-mode fiber with large stimulated Raman scattering

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

(Received 3 September 1990)

Abstract

The shape of pumping laser pulse was reshaped in fiber-gating compression of optical pulse due to the competing between self-phase-modulated and stimulated raman scattering. The self-phase-modulated power spectra was very asymmetric. We obtained some symmetric spectra produced by self-phase-modulated in our experiments using a 2m single-mode polarization-preserving silicon fiber. Some characteristics of Self-Phase-Modulated power spectra are discussed.

Key words: fiber, self-phase-modulation, stimulated Raman scattering.