

光纤中的受激喇曼散射及泵浦脉冲和斯托克斯脉冲的分离

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

本文报道在单模光纤中的受激喇曼散射的实验结果, 用条纹相机测量了泵浦脉冲和喇曼斯托克斯脉冲时间上的相对延迟; 结果表明, 受激喇曼散射的喇曼斯托克斯脉冲大约在距光纤输入端一个分离距离的位置上形成。

关键词: 光纤, 自相位调制, 受激喇曼散射。

一、引 言

自从1962年伍德伯里(Woodbury)和恩格(Ng)在硝基苯克尔盒中发现光的受激喇曼散射以来, 人们对不同介质中的受激喇曼散射进行了研究。由于光纤在相当长的距离内可以获得较高的激光功率密度, 石英光纤遂成为研究受激喇曼散射和其它非线性过程非常有效的手段之一。尽管人们目前还不十分清楚受激喇曼散射的作用机理, 然而利用光纤中的受激喇曼散射, 可以产生相干的红外辐射及形成喇曼激光器。

激光脉冲在光纤中传输时主要受三种因素的影响: 自相位调制, 受激喇曼散射和群速度色散。自相位调制使得泵浦激光光谱展宽, 在适当的条件下配以光栅对, 可实现超短激光脉冲的压缩^[1, 2], 获得飞秒激光脉冲; 受激喇曼散射能产生新波长的相干激光脉冲, 人们已在光纤中观测到高达10阶的斯托克斯脉冲^[3]; 群速度色散使得泵浦脉冲波形重整, 并且使得泵浦脉冲和斯托克斯脉冲产生空间上的分离^[4, 5], 群速度色散对于光通讯是极为不利的。Schadt等人分析了斯托克斯脉冲和泵浦脉冲的自相位调制, Stolen等人在实验上观察了光纤中的脉冲分离及斯托克斯脉冲的自相位调制, 然而尚未见到有用条纹相机对此进行较精确的测量。

本文对不同长度的单模光纤, 利用Nd:YAG主被动对撞锁模激光器的倍频激光脉冲泵浦, 用条纹相机研究了波长532 nm、脉宽40 ps的激光脉冲的受激喇曼散射及泵浦脉冲和斯托克斯脉冲的分离。

二、实 验 装 置

实验装置和研究光纤中的自相位调制所用装置类似^[6], 如图1所示。主被动对撞锁模

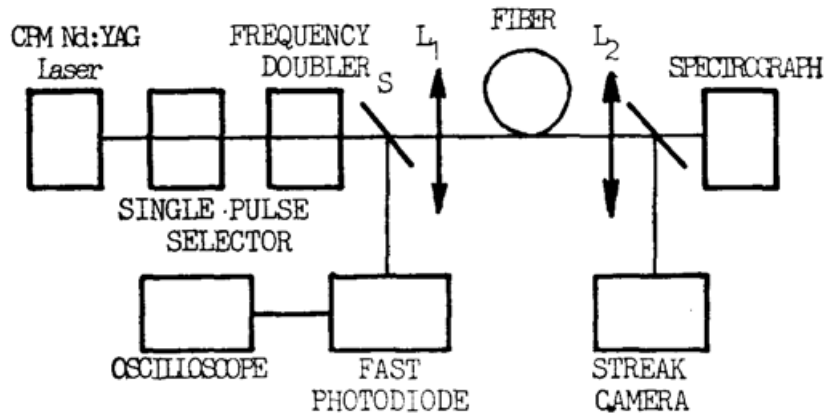


Fig. 1 Experiment setup

Nd:YAG 激光器产生 50 ps 的脉冲序列,经单脉冲选择开关从序列脉冲中选出一个脉冲、放大(图中未画出)、倍频后耦合到光纤中。实验中用 1 m 光栅光谱仪观察和拍摄脉冲激光的受激喇曼散射高分辨率光谱,光谱仪的线色散为 0.74 \AA/mm 。用快速光电二极管和高频示波器来监测脉冲能量的起伏及单脉冲选择质量。 S 为 45° 、 $1.064 \mu\text{m}$ 全反射镜,以消除 $1.064 \mu\text{m}$ 的激光脉冲对受激喇曼散射的影响。实验中使用了两种光纤:一种是 2 m 长的单模保偏可见光光纤,光纤芯径 $4 \mu\text{m}$,光纤耦合效率 20%。另一种是长度为 10 m 和 20 m 的红外单模光纤,芯径 $8 \mu\text{m}$,光纤耦合效率 30%。

三、实验结果及分析

1. 短光纤中的受激喇曼散射

图 2 为入射到光纤的单脉冲波形,典型的半高宽度 (FWHM) 为 40 ps。图 3 为单模保偏光纤中的受激喇曼散射光谱。图中左边的光谱对应于泵浦激光脉冲,光谱展宽是由于光纤中的自相位调制造成的,而受激喇曼散射的阈值相对较高。当光纤中的激光功率密度高于受激喇曼散射的阈值时,观测到喇曼频移为 440 cm^{-1} 的受激喇曼散射,此时喇曼转换效率较低,如图 3(a) 所示;增加光纤中的耦合激光功率,结果如图 3(b)、图 3(c),喇曼转换效率均高于 50%;在泵浦激光功率较高的情况下,泵浦激光将出现能量嵌位效应^[6],即继续增加的能量几乎全部转化为受激喇曼散射。

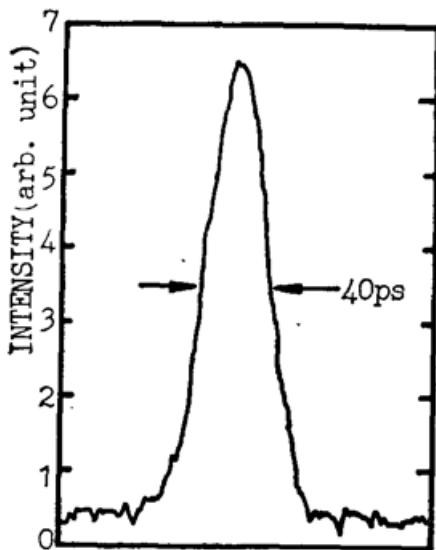


Fig. 2 The envelopment of the single pulse coupled into single mode fiber. The pulsewidth (FWHM) was 40ps

在 2 m 长的光纤中没有观察到明显的脉冲分离。激光脉冲分离所需要的光纤距离 l_{wo} 为^[4]:

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

式中 $\Delta\nu$ 是泵浦激光脉冲和喇曼斯托克斯脉冲的频率差, ν 是激光平均频率, T 是泵浦脉冲的宽度, $D(\lambda)$ 为光纤中的色散。对于 5320 \AA 的泵浦激光, $\nu/C = 18577 \text{ cm}^{-1}$, $D(\lambda) = 0.073$, $\Delta\nu = 440 \text{ cm}^{-1}$ 。对于 40 ps 的激光脉冲,喇曼斯托克斯脉冲和泵浦脉冲的分离距离是 6.94 m。实验中光纤较短,群速度

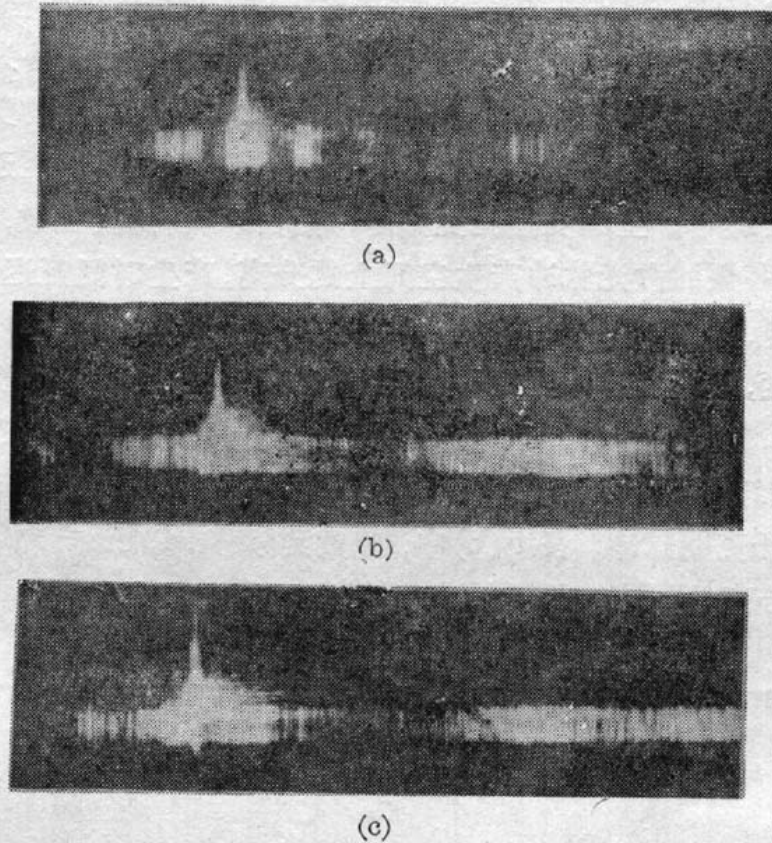


Fig. 3 The high resolution spectra of SRS in a 2 m long, single-mode polarization preserving optical fiber. The energy coupled into optical fiber increased from Fig. (a) to Fig. (c)

对激光脉冲在光纤中传输的影响较小。

2. 泵浦激光脉冲和喇曼斯托克斯脉冲的分离

分别用 10 m、20 m 的单模光纤研究了受激喇曼散射及泵浦脉冲和斯托克斯脉冲在光纤传输中形成的空间上的分离。图 4 为 20 m 光纤中典型的受激喇曼散射光谱 (10 m 中受

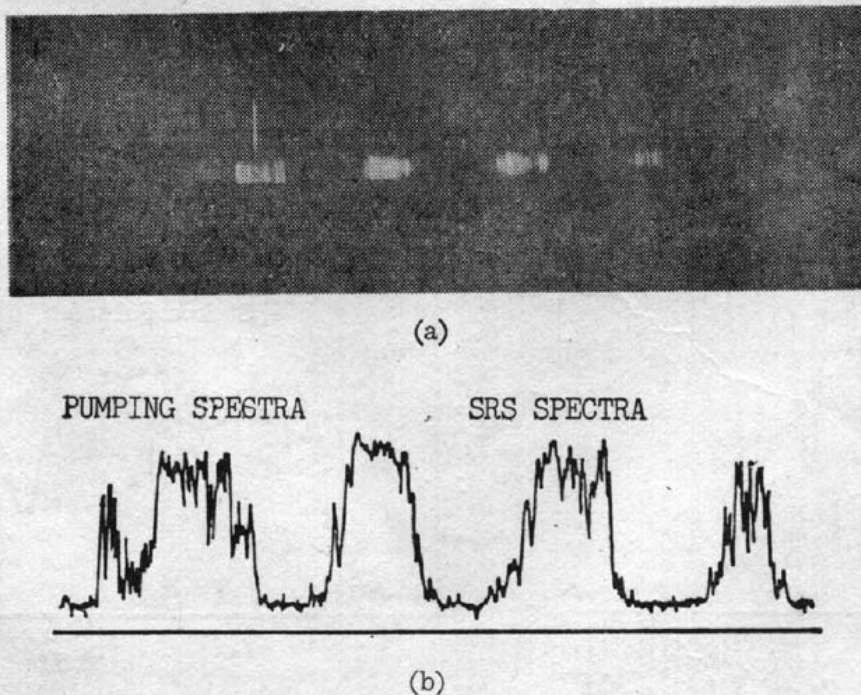


Fig. 4 The high resolution spectra of SRS in a 20 m long, single-mode optical fiber. (a) The photography of the SRS spectra and pumping pulse; (b) the density trace of Fig. 4(a)

激喇曼散射光谱完全类似)。图 4(a)为光谱的照片,图 4(b)是相应的密度扫描曲线。由图中可知,泵浦激光在光纤中产生了两阶受激喇曼散射,相应的喇曼频移为 240 cm^{-1} 、 442 cm^{-1} 及 682 cm^{-1} 。和单模保偏光纤中不同的是观察到频移为 240 cm^{-1} 的受激喇曼散射,这可能和光纤制作过程有关,或是在保偏光纤中该频移的喇曼增益太小以至于未测量到。

当泵浦激光在光纤中产生喇曼斯托克斯脉冲后,由于群速度色散,经过 ΔL 的传输距离后,斯托克斯脉冲将和泵浦激光脉冲产生空间上的分离,产生时间延迟 Δt 。

$$\Delta t = \Delta L \cdot D(\lambda) \cdot \Delta\nu / (C \cdot \nu) \quad (2)$$

对于给定的光纤长度,测量出脉冲延迟 Δt 就可以确定喇曼斯托克斯脉冲在光纤中形成的位置。

图 5 为 20 m 光纤在不同入射功率下的测量结果。图 5(a)中泵浦激光脉冲只产生频移 240 cm^{-1} 的喇曼斯托克斯脉冲。图 5(b)中,观察到频移 240 cm^{-1} 和 442 cm^{-1} 的斯托克斯脉冲与泵浦脉冲的分离。图 5(c)、图 5(d)分别对应于 3 个和 4 个斯托克斯脉冲的情况。在受

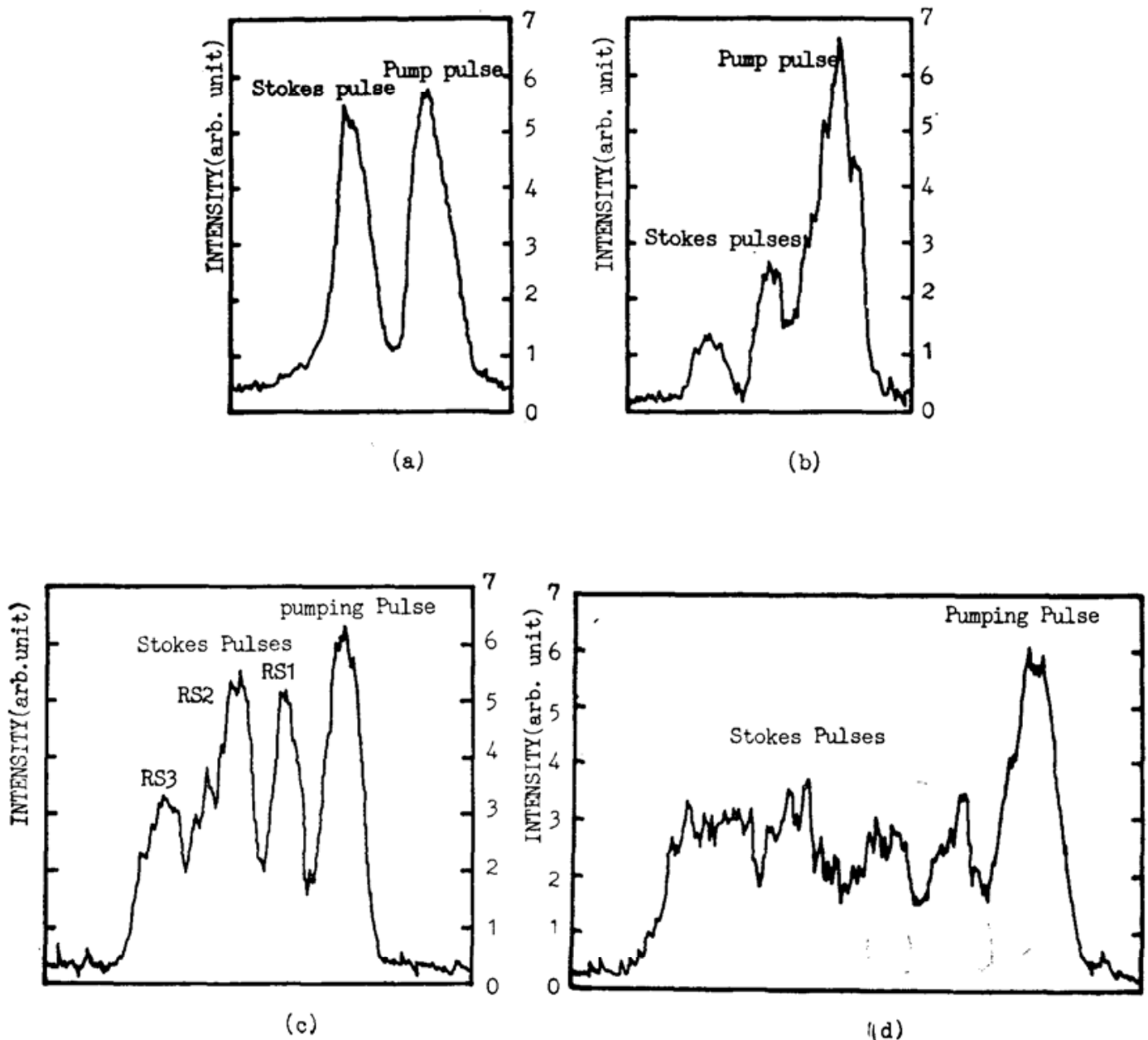


Fig. 5 The envelopments of output pulses from a 20 m long single-mode optical fiber measured by a Streak Camera with time resolution of 10 ps

激喇曼散射中, 首先产生的斯托克斯脉冲将作为更高级的斯托克斯脉冲的泵浦源。实验结果表明: 频移为 240 cm^{-1} 的斯托克斯脉冲超前泵浦脉冲 66 ps , 而 440 cm^{-1} 频移的斯托克斯脉冲超前 122 ps , 见图 5(c)。产生脉冲超前所需要的相应光纤长度由(2)式得: $\Delta L_1 = 20.9 \text{ m}$, $\Delta L_2 = 21.2 \text{ m}$, 见表 1。显然, ΔL_1 和 ΔL_2 都大于实验所用光纤的总长度, 然而喇曼斯托克斯脉冲不可能在进入光纤前就已经产生。实验表明^[4]: 喇曼斯托克斯脉冲实际上产生在泵浦激光脉冲前大约一个脉冲宽度的位置。所以合理地估算喇曼斯托克斯脉冲的产生位置, 应从 ΔL_1 和 ΔL_2 中减去相应的脉冲分离距离 l_{wo} 。由此得到喇曼频移 240 cm^{-1} 和 442 cm^{-1} 放大的斯托克斯脉冲形成的位置距光纤端分别为 11.8 m , 5.6 m 。综合表 1 的结果, 可得如下结论: 受激喇曼散射的喇曼斯托克斯脉冲大约在距光纤入射端一个分离距离的位置上形成。

Table 1

$\Delta\nu(\text{cm}^{-1})$	$\Delta t(\text{ps})$	$\Delta L(\text{m})$	$l_{wo}(\text{m})$	$\Delta L'(\text{m})$	L_s
240	65.8	20.9	12.7	8.2	11.8
442	122.2	21.2	6.9	14.3	5.6

对于图 5(c) 中的斯托克斯脉冲, RS3 实质上是 RS1 频移 442 cm^{-1} 与 RS2 频移 240 cm^{-1} 后产生的喇曼斯托克斯脉冲相干叠加的结果。至于 RS1 频移 240 cm^{-1} 时的喇曼斯托克斯脉冲, 由于它与 RS₂ 的喇曼频移接近, 并且 RS2 本身也有很强的自相位调制, 所以从光谱和时间上都很难再区分开。

图 6 是 10 m 光纤的输出激光脉冲。入射激光脉冲宽度 20 ps , 泵浦脉冲的延迟为 47 ps , 估算出喇曼斯托克斯脉冲的形成位置距光纤入射端 7.6 m , 约等于脉冲分离距离 6.4 m , 结果与 20 m 光纤基本一致。

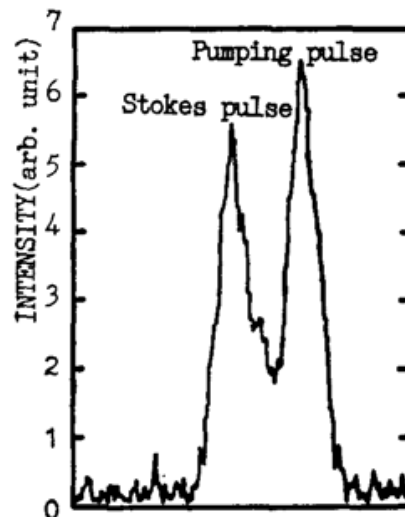


Fig. 6 The envelopment of the output pulse from a 10 m long, single-mode optical fiber measured by a Streak Camera with time resolution of 10 ps .

The pumping pulsewidth (FWHM) was 20 ps

四、结 论

本文从实验上研究了不同长度的单模光纤中的激光受激喇曼散射, 从实验结果可以得

出以下结论:

(1) 光纤中受激喇曼散射的斯托克斯脉冲在距光纤入射端大约一个分离距离的位置上形成。激光脉冲在光纤中的继续传输将造成泵浦激光脉冲和斯托克斯脉冲的分离。

(2) 在单模光纤中观察到喇曼频移分别为 240 cm^{-1} 、 442 cm^{-1} 的受激喇曼散射。其中频移为 240 cm^{-1} 的受激喇曼散射在光纤中尚不多见。

(3) 利用光纤中的泵浦脉冲和斯托克斯脉冲的时间上的相对延迟,根据式(2)可以对光纤中的色散等参数予以测量,对于液芯光纤尤为有利。

参加本实验工作的还有朱国英,陆海鹤同志。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。作者还要感谢本所联合实验室竺庆春同志在条纹相机测量上的帮助。

参 考 文 献

- [1] A. S. Gouveia-neto *et al.*; *Opt. Comm.*, 1987, **64**, No. 2, 163~166.
- [2] 樊立明等;《光学学报》,1991, **11**, No. 5 (May), 385~389.
- [3] GaoPei Juan *et al.*; *Appl. Phys.*, 1981, **24**, 303~306.
- [4] R. H. Stolen *et al.*; *IEEE J. Quantum Electronics*, 1986, **QE-22**, No. 11 (Nov), 2150~2160.
- [5] Dieter Schadt *et al.*; *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1986, **3**, No. 10 (Oct), 1257~1262.
- [6] 樊立明等;《光学学报》,1991, **11**, No. 2 (Feb), 161~165.

Stimulated Raman scattering in single-mode fiber and the walkoff between pumping and Raman-Stokes pulses

FAN LIMING, WANG SHIJIE, LI SHIYING, CHEN SHISHENG AND XU ZHIZHAN

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica

P. O. Box 800-211, Shanghai 201800)

(Received 19 October 1990)

Abstract

We have experimentally investigated stimulated Raman scattering in single-mode fiber and measured the relative delay time between pumping and Raman-Stokes pulses produced by the effect of group-velocity dispersion using a streak camera. From the results, we found that the source of the Raman-Stokes pulse was at about one walkoff length into the fiber.

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