

# 掺铒石英光纤中的受激拉曼散射 及受激四光子混频

刘邦群 高 晖\* 刘祖荫

(武汉大学物理系 武汉 430072 \* 中国科学院武汉物理与数学研究所 武汉 430071)

**提要** 报道了掺铒光纤受激拉曼散射(SRS)和受激四光子混频(SFPM)的实验研究。所用光纤长为 10 m, 泵浦源为 Nd:YAP 倍频 539.7 nm 脉冲激光, 脉冲能量为 0.1 J, 脉宽为 50 ns, 获得了从 552.1~622.8 nm 的 6 级受激拉曼散射谱和受激四光子混频的 Stokes(542.9 nm) 及反 Stokes(537 nm) 谱线。

**关键词** 掺铒光纤, 受激拉曼散射, 受激四光子混频

## 1 引 言

自 1972 年以来有许多文章报道了石英光纤及掺 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, GeO<sub>2</sub> 石英光纤的受激拉曼散射<sup>[1]</sup>及光纤拉曼激光器<sup>[2]</sup>、光纤拉曼放大器<sup>[3]</sup>的实验研究。光纤中的四波混频能有效地产生新的光波, 这方面也有许多报道<sup>[4]</sup>。而掺铒石英光纤中的受激拉曼散射和受激四光子混频报道极少。本文将报道单模掺铒石英光纤中的 SRS 和 SFPM 效应研究的新进展。

掺铒光纤是一种激活光纤, 一般用于制作光纤放大器, 工作波长恰好位于光纤通讯的最佳窗口<sup>[5]</sup>, 是极有价值的信号增强器件。掺铒光纤芯径极细, 只有几微米, 相互作用长度很长, 良好的非线性介质, 在强光泵浦下可产生 SRS, SFPM 和受激布里渊散射(SBS)。这些非线性光学效应将会影响掺铒光纤放大器的增益, 故研究掺铒光纤中的 SRS 和 SFPM 是很有意义的。

## 2 实验装置

掺铒光纤产生 SRS 和 SFPM 的实验装置如图 1 所示。泵浦源是染料(BDN)调 Q 的 Nd:YAP 激光, 波长  $\lambda$  为 1.0795  $\mu\text{m}$ , 再通过 LiNbO<sub>3</sub> 倍频, 产生波长为 539.7 nm 的单脉冲激光, 脉宽为 50 ns, 脉冲能量为 0.1 J。为了避免基频光打坏光纤输入端, 在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体后面放入一块滤光片, 滤掉基频光, 只让倍频光通过。泵浦光用显微物镜( $\times 10$ )耦合进入光纤, 耦合效率约为 30%。

实验所用光纤由天津电子工业部 46 所提供。光纤长度为 10 m, 芯径为 7  $\mu\text{m}$ , 皮径为 125  $\mu\text{m}$ , 数值孔径( $N \cdot A$ )为 0.163, 泵浦光波长附近的损耗为 10<sup>3</sup> dB/km。强泵浦光和掺铒光纤相互

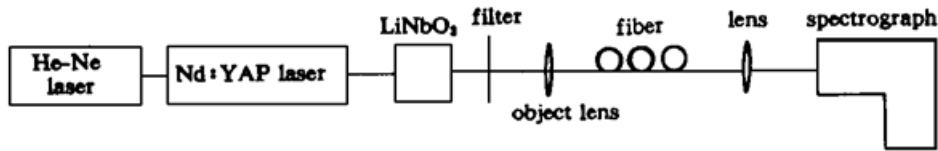


图 1 掺铈光纤产生 SRS 和 SFPM 的实验装置

Fig. 1 Illustration of the experimental setup

作用,产生 SRS 和 SFPM。从光纤输出端输出的光谱线,由透镜聚焦进入摄谱仪,用感光材料记录下 SRS, SFPM 光谱线和铁谱线。实验装置图中的 He-Ne 激光是用来调整光路的。用自动数字测微黑度计对所摄光谱底片扫描,得到各谱线的相对强度,如图 3 所示。

### 3 结果与分析

图 2 是我们记录的 SRS 和 SFPM 的光谱图。和铁谱比较测得各谱线的波长列入表 1。

表 1 SRS 和 SFPM 谱线的峰值波长

Table 1 The peak wavelengths of the stimulated Raman scattering and stimulated four-photon mixing spectral lines

spectral lines	$S_{a1}$	$S_{a1}'$	$S_0''$	$S_0$	$S_0'$	$S_1''$	$S_1$	$S_1'$
wavelength (nm)	528.3	531.0	537.0	539.7	542.9	548.9	552.1	555.1
spectral lines	$S_2''$	$S_2$	$S_3''$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	
wavelength (nm)	561.5	564.7	575.0	577.9	592.1	607.0	622.8	

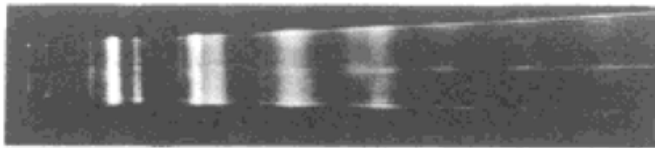


图 2 SRS 和 SFPM 的照片

Fig. 2 The photograph of the stimulated Raman scattering and stimulated four-photon mixing spectral lines

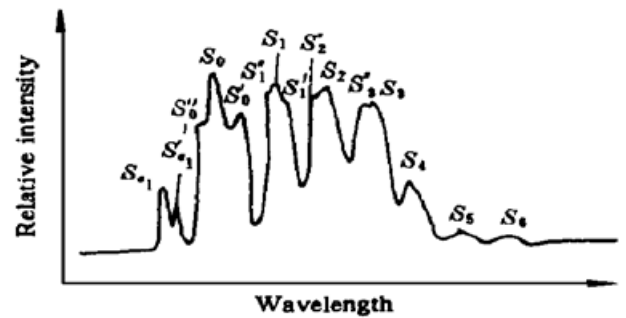


图 3 各谱线的相对强度

Fig. 3 The relative intensity of the stimulated Raman scattering and stimulated four-photon mixing spectral lines

图 3 是各级 SRS 和 SFPM 谱线的相对强度分布。其中,  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$  为 SRS 的 6 级 Stokes 线,其频率间隔约为  $410 \text{ cm}^{-1}$ ,此为  $\text{SiO}_2$  的串激受激拉曼散射 Stokes 谱线,  $S_{a1}$  为反 Stokes 拉曼散射谱线。各级拉曼频移略有差别,是因为拉曼谱的峰值位置由光纤拉曼增益光谱和光纤损耗光谱共同决定。从图 2 可见 Stokes 线的光谱被展宽,高级次的光谱比低级次的光谱更宽,造成这种情况的原因是由于光纤中的自相位调制和交叉相位调制的结果。

在我们的实验中,除了 SRS 非线性效应外,还观察到了新的谱线,见图 2 和图 3。 $S_0'$  和  $S_0''$  这一对强的谱线位于泵浦光  $S_0$  的两侧,是掺铈石英光纤在  $539.7 \text{ nm}$  激光泵浦下产生的一对

受激四光子混频线。长波长的 Stokes 线 ( $S_0'$ ) 波长为 542.9 nm, 短波长的反 Stokes 线波长为 537 nm, 它们与泵浦光的波数差为  $109 \sim 93 \text{ cm}^{-1}$ 。此结果正是部分简并四波混频所致, 即频率相同的两个泵浦光湮没, 同时产生低频 Stokes 和高频的反 Stokes 光子的情况。它们的频移为

$$\Omega_s = \omega_0 - \omega' = \omega'' - \omega_0$$

式中  $\omega_0$  为泵浦光的角频率,  $\omega'$  为 Stokes 光的角频率,  $\omega''$  为反 Stokes 光的角频率。四波混频过程中, 相位匹配条件要求  $\Delta k = 0$ , 在部分简并四波混频中,  $\Delta k = 0$  很容易达到。

从图 2 可见, 受激四光子混频产生的 Stokes 线 ( $S_0'$ ) 比反 Stokes 线 ( $S_0''$ ) 强。这是因为 SFPM 产生的 Stokes 线 ( $S_0'$ ) 波长正好处于  $\text{Er}^{3+}$  能级的  ${}^4S_{3/2}$ - ${}^4I_{15/2}$  之间的辐射跃迁, 如图 4 所示。因此,  $\text{Er}^{3+}$  能级将共振增强受激四光子混频产生的 Stokes 谱线  $S_0'$ 。反过来, SFPM 亦将放大  ${}^4S_{3/2}$ - ${}^4I_{15/2}$  跃迁的谱线。因为掺铒光纤在 Nd:YAP 倍频 539.7 nm 光脉冲泵浦下, 光纤中  $\text{Er}^{3+}$  吸收 539.7 nm 的光, 从基态  ${}^4I_{15/2}$  跃迁到  ${}^2H_{11/2}$  态。处于  ${}^2H_{11/2}$  态的  $\text{Er}^{3+}$ , 一部分通过多声子过程弛豫到  ${}^4S_{3/2}$  态, 另一部分通过辐射 850 nm 的红外光跃迁到  ${}^4I_{13/2}$  态<sup>[6]</sup>。室温下,  ${}^4I_{13/2}$  能级的寿命为 10 ms, 是一个亚稳态。 ${}^4I_{13/2}$  态上的  $\text{Er}^{3+}$  又可以吸收泵浦光跃迁到  ${}^4G_{11/2}$  态。 ${}^4G_{11/2}$  态上的  $\text{Er}^{3+}$  通过多声子过程又弛豫到  ${}^4S_{3/2}$ 。则在强调 Q Nd:YAP 倍频激光脉冲泵浦下, 掺铒光纤中  $\text{Er}^{3+}$  的  ${}^4S_{3/2}$  态可布居很多粒子。一旦  ${}^4S_{3/2}$  态和  ${}^4I_{15/2}$  之间建立起粒子数反转, 则由四光子混频产生的 Stokes 光子可使仍处于  ${}^4S_{3/2}$  的  $\text{Er}^{3+}$  受激辐射回到基态, 从而使四光子混频的 Stokes 光脉冲沿着光纤的传输方向不断得到增强。以致它又可以作为泵浦光使光纤产生 Stokes 拉曼散射线  $S_1'$ , 频移为  $406 \text{ cm}^{-1}$ , 如图 3 所示。 $S_1'$  与  $S_1$  混频产生谱线  $S_1''$ , 波长为 548.9 nm。图 2, 3 中, 谱线  $S_1''$  的强度比较大, 这是由于  $S_0''$  泵浦光纤所产生的受激拉曼散射放大了 FPM 线的结果。 $S_2''$  和  $S_3''$  是  $S_1''$  泵浦光纤产生的两级 SRS 的 Stokes 谱线。

实验中, 我们发现除受激拉曼散射具有明显的阈值外, 受激四光子混频也具有阈值。另一方面, 我们看到 SFPM 光谱线的宽度比 SRS 光谱线窄很多, 这是由于 SFPM 必须受到相位匹配条件的限制的结果。

我们的实验研究表明, 掺铒光纤不仅可制作光纤放大器, 而且可以作为非线性介质, 产生 SRS, SFPM 等多种非线性效应。所以在掺铒光纤放大器中, 泵浦光的能量必须在 SRS 和 SFPM 的阈值能量以下, 才能获得高的放大增益。SFPM 的 Stokes 线还受到了  $\text{Er}^{3+}$  能级的共振增强, 有的混频线还进一步受到 Raman 放大。所以可以利用掺铒光纤中的 SRS, SFPM 非线性效应产生新波段的高功率相干辐射。

## 4 讨 论

我们的实验研究表明, 掺铒光纤不仅可制作光纤放大器, 而且可以作为非线性介质, 产生 SRS, SFPM 等多种非线性效应。所以在掺铒光纤放大器中, 泵浦光的能量必须在 SRS 和 SFPM 的阈值能量以下, 才能获得高的放大增益。SFPM 的 Stokes 线还受到了  $\text{Er}^{3+}$  能级的共振增强, 有的混频线还进一步受到 Raman 放大。所以可以利用掺铒光纤中的 SRS, SFPM 非线性效应产生新波段的高功率相干辐射。

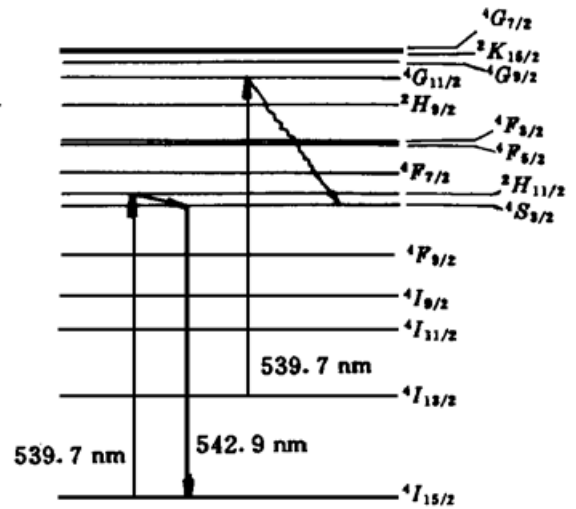


图 4  $\text{Er}^{3+}$  的简化能级图

Fig. 4 A simplified energy level diagram for  $\text{Er}^{3+}$  doped silica fibers

- 1 Gao Peijuan, Nie Caojiang, Yang Tianlong. Stimulated Raman scattering up to 10 orders in an optical fiber. *Appl. Phys.*, 1981, **24**(4) : 303~ 306
- 2 R. Pini, Renzo Salimbeni, M. Vannini *et al.*. High conversion efficiency ultraviolet fiber Raman oscillator-amplifier system. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(7) : 1048~ 1050
- 3 E. Desurvire, M. Papuchon, J. P. Pocholle *et al.*. High-gain optical amplification of laser diode signal by Raman scattering in single-mode fibers. *Electr. Lett.*, 1983, **19**(19) : 751~ 753
- 4 R. Pini, R. Salimbeni, A. F. M. Y. Haiker *et al.*. Continuously tunable multiple-order stimulated four-photon mixing in a multimode silica fiber. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(3) : 79~ 81
- 5 Dong Xiaoyi, Sheng Qiuqin, Lü Kechen *et al.*. Experimental research on laser amplification in Er<sup>+</sup>-doped fiber. *Acta Optica Sinica* (光学学报,) 1990, **10**(7) : 668~ 671 (in Chinese)
- 6 T. J. Whitley, C. A. Millar, M. C. Brierley *et al.*. 23 dB gain upconversion pumped erbium doped fibre amplifier operating at 850nm. *Electr. Lett.*, 1991, **27**(2) : 184~ 186

## Stimulated Raman Scattering and Stimulated Four-photon Mixing in Er-doped Silica Fiber

Liu Bangqun Gao Hui\* Liu Zuyin

(Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072

\* Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

**Abstract** This paper describes the experimental investigation of stimulated Raman scattering and stimulated four-photon mixing obtained from an Er-doped silica fiber. Six orders of stimulated Stokes scattering in the range of 552.1~ 622.8 nm and the Stokes ( $\lambda = 542.9$  nm) and anti-Stokes ( $\lambda = 537$  nm) of stimulated four-photon mixing have been obtained from a 10 m Er-doped single mode silica fiber, which was pumped by a frequency-doubled Q-switched Nd:YAP laser ( $\lambda = 539.7$  nm) with a pulse duration of 50 ns. Its output energy is 0.1 J.

**Key words** Er-doped fiber, stimulated Raman scattering, four-photon mixing