

掺 Er^{3+} 石英光纤中的共振增强 受激四光子混频*

华一敏 李 劬 陈英礼 陈益新
(上海交通大学应用物理系, 上海 200030)

提 要

首次实验观察到在 1064 nm 激光泵浦下掺 Er^{3+} 石英光纤中的共振增强受激四光子混频现象和光学自由感应衰减过程。在频域和时域上实验证明了 Er^{3+} 的 ${}^4I_{11/2}$ 激发态能级对受激四光子混频产生的反斯托克斯谱线的增强效应。

关键词: 光纤, 掺铒光纤, 受激四光子混频, 光学自由感应衰减。

本文首次报道掺 Er^{3+} 石英光纤中共振增强受激四光子混频和伴随着的光学自由感应衰减的实验现象。

实验装置如图 1 所示。泵浦光源是一台锁模重复率 82 MHz、锁模脉宽 130 ps、调 Q 重复率 1 kHz、调 Q 包络宽度 300 ns(峰值半高全宽度)、准连续输出 1064 nm 波长的 Nd:YAG 激光器。实验用的光纤是一根中国建筑材料科学研究院用溶液法生长的 $\text{Er}^{3+}/\text{GeO}_2/\text{SiO}_2$ 掺杂光纤。该光纤芯径 $5.7 \mu\text{m}$, 芯区一包层折射率差 0.0126, 长度 35 cm, Er^{3+} 掺杂量 25 ppm。图 2 是 Er^{3+} 离子的简化能级图。这根掺 Er^{3+} 石英光纤在 1064 nm 激光泵浦下产生了一对受激四光子混频斯托克斯(Stokes, 1172 nm)和反斯托克斯(977 nm)谱线。实验中观察到受激四光子混频反斯托克斯谱线有新的特征, 并对此进行了研究。实验用一台 0.5 m 单色仪、一个上升时间小于 1 ns 快速 Si-PIN 光电二极管和微机数据采集系统, 测量了光纤内泵浦激光峰值功率为 10 kW 时, 光纤产生的受激四光子混频光谱(图 3)。反斯托克斯谱线的中心波长为 977 nm, 受激四光子混频反斯托克斯谱线的强度大于受激四光子混频斯托克斯谱线的强度, 并且泵浦光转换为反斯托克斯谱的峰值功率转换效率大于 1%。我们还在 Tektronix 7904 A 型示波器上观察了反斯托克斯谱线时域脉冲波形(图 4)。

实验结果表明, 由于反斯托克斯谱波长正好对应于 Er^{3+} 的 ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 跃迁间隔, 因此 Er^{3+} 能级共振增强了受激四光子混频产生的反斯托克斯谱。由于泵浦光锁模脉冲的间隔为 12 ns, 在一个调 Q 包络内, 对于本文涉及的 Er^{3+} 能级, 锁模脉冲光均可作为连续光处理。在 1064 nm 波长激光泵浦下, 掺 Er^{3+} 石英光纤中 Er^{3+} 将通过双光子吸收过程激发到 ${}^2H_{11/2}$ 态。部分 ${}^2H_{11/2}$ 态的 Er^{3+} 将通过多声子过程弛豫到 ${}^4I_{11/2}$ 态; 部分 ${}^2H_{11/2}$ 态的 Er^{3+} 将通过受激态吸收过程跃迁到 ${}^4G_{9/2}$ 态, 接着发生 ${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 跃迁, 辐射 466 nm 光子。由于室温下亚稳态 ${}^4I_{13/2}$ 的自发辐射衰减寿命为 10 ms 量级^[1], 在重复率 1 kHz 的锁模调 Q 准连续

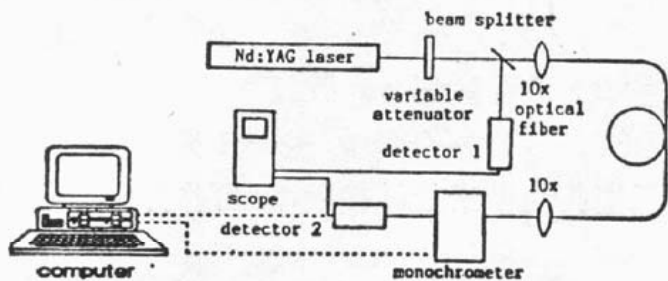


Fig. 1 Illustration of an experimental setup

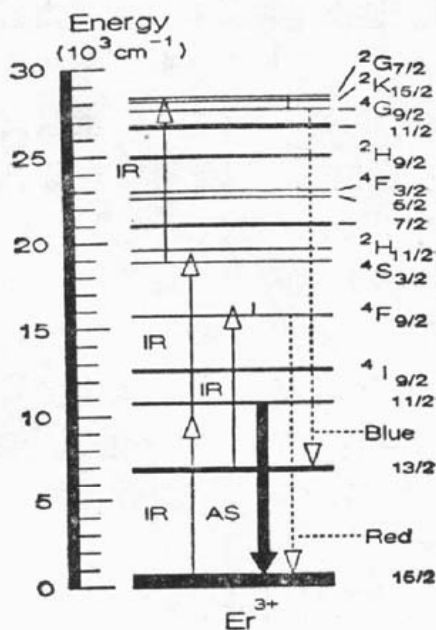


Fig. 2 A simplified energy level diagram for Er³⁺ doped silica fibers

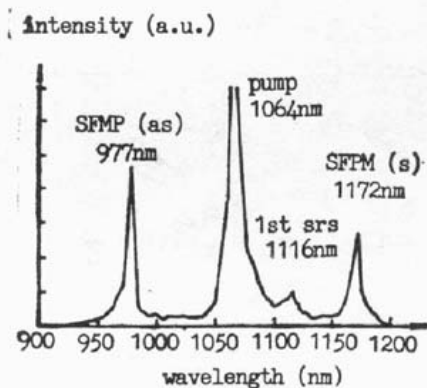


Fig. 3 The spectra of resonance enhanced stimulated four-photon mixing in the Er³⁺ doped silica fiber pumped at 1064 nm

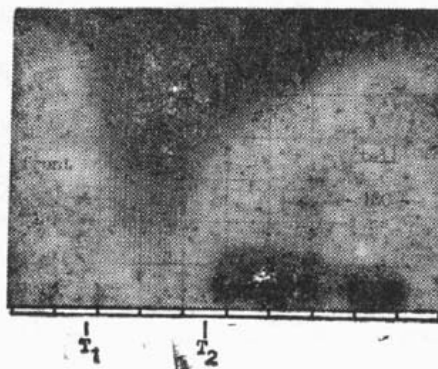


Fig. 4 The 977 nm anti-stokes pulses envelope of resonance enhanced stimulated four-photon mixing in the Er³⁺ doped silica fiber. A full and small mode-locked Q-switched envelope in the figure is that of pump pulses for reference

激光泵浦下，⁴I_{13/2} 态能保持一定的布居数。部分 ⁴I_{13/2} 态的 Er³⁺ 将通过受激态吸收过程跃迁到 ⁴F_{9/2} 态，然后也将通过多声子过程弛豫到 ⁴I_{11/2} 态。上述两种泵浦过程已在掺 Er³⁺ 石英光纤的频率上转换实验中得到证实^[2]。因此，1064 nm 泵浦激光能够增加 ⁴I_{11/2} 态的布居数。

另一方面，如图 4 所示，受激四光子混频过程是有阈值的并且前沿的阈值略高于后沿的阈值。1064 nm 泵浦激光的锁模调 Q 包络前沿 $T < T_1$ 部分的光强低于受激四光子混频阈值，因而无反斯托克斯锁模脉冲产生，但这部分的泵浦激光仍能使 ⁴I_{11/2} 态达到一定的布居数。锁模调 Q 包络中间高功率泵浦激光一方面增加 ⁴I_{11/2} 态的布居数，一方面产生反斯托克斯脉冲光。反斯托克斯脉冲光将使仍处于 ⁴I_{11/2} 激发态的 Er³⁺ 受激辐射光子返回基态，从而增强了反斯托克斯锁模脉冲的强度。一旦泵浦激光脉冲后沿强度低于受激四光子混频阈值，反斯托克斯脉冲突然消失。这时，可以预料到储存在 ⁴I_{11/2} 能级中的能量要辐射出来，产生衰减的相干再辐射。它对应于图 4 中反斯托克斯脉冲锁模调 Q 包络的后沿 $T >$

T_2 部分。这个过程具有光学自由感应衰减的特征^[3], 衰减时间 $T_F \approx 400$ ns。我们将用单个激光脉冲, 对该光纤中光学自由感应衰减过程作进一步的实验研究。上述分析表明时域上与调 Q 包络后沿受激四光子混频阈值对应的 ${}^4I_{11/2}$ 态布居数大于前沿对应的布居数, 因而前沿的受激四光子混频阈值略高于后沿的阈值。

由于 980 nm 波段的光是 $1.5 \mu\text{m}$ 掺 Er^{3+} 石英光纤放大器的理想泵浦源。用掺 Ti^{3+} 蓝宝石激光器产生的这个波段的激光作泵浦源, 已经获得 $1.5 \mu\text{m}$ 信号放大 48 dB 的实验结果^[4]。但是, 掺 Ti^{3+} 蓝宝石激光器价格很昂贵。因此, 利用 1064 nm 波长 Nd:YAG 激光器泵浦掺 Er^{3+} 石英光纤, 通过优化 Er^{3+} 的掺杂量和光纤长度两个参数, 进一步提高 1064 nm 泵浦光转换为 977 nm 共振增强受激四光子混频反斯托克斯谱的转换效率, 可作为实验研究 $1.5 \mu\text{m}$ 掺 Er^{3+} 石英光纤脉冲放大器的泵浦源。

中国建筑材料科学研究院提供本实验用的掺 Er^{3+} 石英光纤, 谨此致谢!

参 考 文 献

- [1] C. A. Millar, T. J. Whitley *et al.*; *Proc. IEE*, 1990, **137**, No. 3 (Jun), 155~162.
- [2] 华一敏, 李劬等;《光学学报》, 1992, **12**, No. 3 (Mar), 261~264.
- [3] Y. R. Shen; *The Principles of Nonlinear Optics*, (John Wiley & Sons, Inc., 1984).
- [4] W. J. Miniscalco, B. A. Thompson *et al.*; *Optical Fiber Communication Conference, U. S. A., 1990*, Paper FA2.

Resonance enhanced stimulated four-photon mixing in Er^{3+} doped silica fibers

HUA YIMIN, LI QU, CHEN YINGLI AND CHEN YIXIN

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

(Received 27 June 1991; revised 12 September 1991)

Abstract

Resonance enhanced stimulated four-photon mixing and optical free induction decay have been first demonstrated in Er^{3+} doped silica fibers under the excitation of a 1064 nm laser. The enhancement of anti-Stokes of stimulated four-photon mixing by the excited state ${}^4I_{11/2}$ of Er^{3+} has been confirmed in frequency- and time-domain.

Key words: fiber, Er^{3+} -doped fiber, stimulated four-photon mixing, optical free induction decay.