

掺 $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 石英光纤中频率上转换的实验研究*

华一敏 李 劬 陈英礼 陈益新
(上海交通大学应用物理系, 200030)

摘要: 首次报道了实验研究连续 1064 nm Nd:YAG 激光器泵浦的掺稀土离子 $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 石英光纤中频率上转换过程。测量了掺 $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 石英光纤产生的频率上转换可见荧光谱, 并用能量转移、受激态吸收和双光子吸收过程解释了 467, 546 和 667 nm 三条频率上转换荧光谱线的产生机理。

关键词: 光纤, 掺铒/铒光纤, 频率上转换

Experiment on frequency upconversion in $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ doped silica fibers

Hua Yimin, Li Qu, Chen Yingli, Chen Yixin

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiao Tong University)

Abstract: Frequency upconversion in $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ doped silica fibers pumped by a CW1064 nm laser has been demonstrated for the first time. The visible fluorescence spectra of $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ doped silica optical fibers were measured. Energy transfer process, excited-state absorption and two-photon absorption of Er^{3+} ions were proposed to account for the experimental observation of three upconverted fluorescence spectral lines at 467, 546 and 667 nm.

Key words: fiber, $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ -doped fiber, frequency upconversion

近来, 人们对能够通过分步多光子吸收过程将红外光转换为可见光的材料产生了很大的兴趣。这种频率上转换过程提供了红外光泵浦产生短波长光的新途径。由于这个过程是多光子吸收过程, 有效的频率上转换需要较高的泵浦功率密度。而目前光通信用的石英光纤芯径只有几个微米, 用中等泵浦功率就能获得很高的泵浦功率密度, 并可维持很长的作用距离。因此, 在芯区掺入感兴趣的激活离子的光纤, 为频率上转换过程的研究提供了一种理想的实验材料。

最近, 在掺稀土离子 Nd^{3+} ^[1]、 Tm^{3+} ^[2] 和 $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ ^[3] 石英光纤中, 已产生了近红外光泵浦的频率上转换荧光。对于掺 $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 石英光纤, 频率上转换方面的研究迄今未见报道。本文报道了掺稀土离子 $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 石英光纤中频率上转换现象。在连续 1064 nm 激光泵浦下, 一根长度为 40 cm 的掺 $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 石英光纤产生了波长为 467, 546 和 667 nm 的三条可见荧

收稿日期: 1991年5月23日; 修改稿收到日期: 1991年7月15日。

* 国家自然科学基金和上海交通大学基金资助项目。

光谱线。

红外泵浦光源是一台输出波长为 1064 nm 的连续 Nd:YAG 激光器, 实验用的一根掺 Yb³⁺/Er³⁺ 石英光纤是中国建筑材料科学研究院用溶液法生长的。该光纤芯径 8 μm, 截止波长 1.24 μm, 长度 40 cm, Yb³⁺ 离子掺杂量 2700 ppm, Er³⁺ 离子掺杂量 900 ppm。图 1 是 Yb³⁺/Er³⁺ 离子的简化能级图。

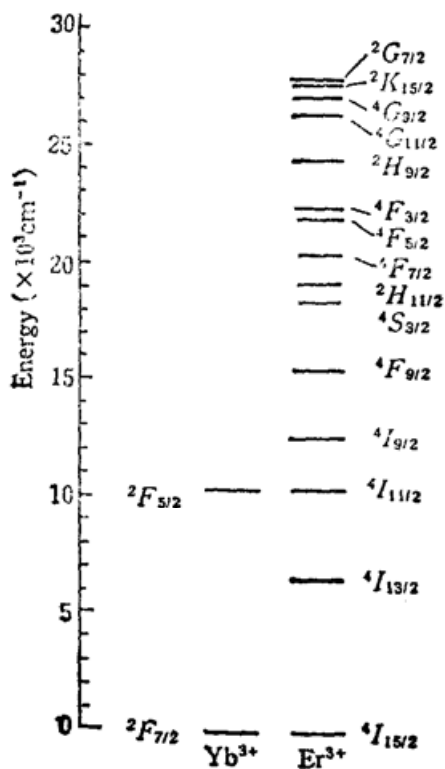


Fig. 1 Energy level diagram of Yb³⁺/Er³⁺ doped system

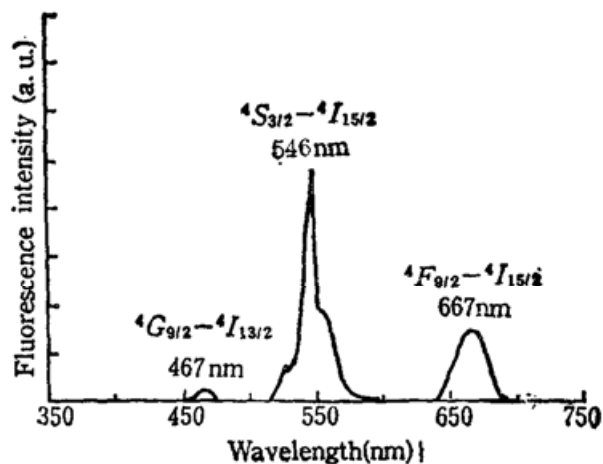


Fig. 2 Emission spectra of Yb³⁺/Er³⁺ doped silica fiber pumped at 1064 nm

我们用一台小型单色仪和一个 S-20 光电倍增管, 测量了光纤内连续红外激光功率为 100 mW 时, 掺 Yb³⁺/Er³⁺ 石英光纤产生的频率上转换荧光谱(图 2), 并用 404 型功率计测量了各荧光谱线的功率。当光纤内连续红外激光功率为 1 W 时, 467, 546 和 667 nm 三条可见荧光谱线的功率(转换效率)分别为 4(4 × 10⁻³%)、100(1 × 10⁻²%)和 30(3 × 10⁻³%) μW, 其中 546 nm 谱线的光强最大。

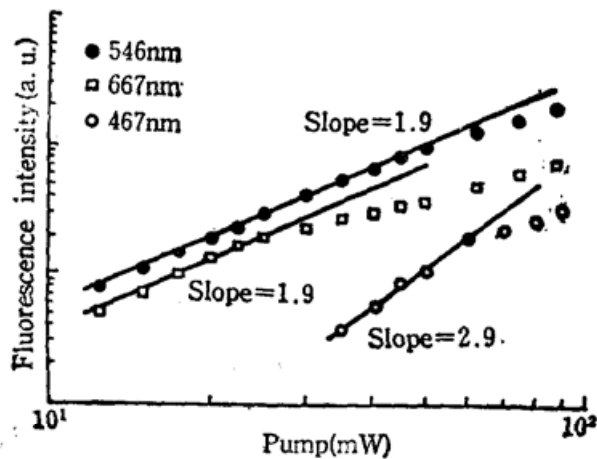


Fig. 3 Power dependence of emitted radiation at 467, 546 and 667 nm bands on the excitation power at 1064 μm

为了分析频率上转换的泵浦过程, 必须了解上述三条上转换荧光谱线强度随泵浦激光强度变化的关系。由于形成导模的上转换荧光在掺 Yb³⁺/Er³⁺ 石英光纤芯区被 Er³⁺ 离子再吸收, 将会影响泵浦激光强度与上转换荧光强度比值的测量。而掺 Yb³⁺/Er³⁺ 石英光纤芯径很细, 几十 μm 厚的包层中几乎没有掺 Er³⁺ 离子, 因而形成泄漏模的上转换荧光几乎没有被 Er³⁺ 离子再吸收。因此, 测量掺 Yb³⁺/Er³⁺ 石英光纤泄漏模的上转换荧光, 就可避免 Er³⁺

离子再吸收。因此, 测量掺 Yb³⁺/Er³⁺ 石英光纤泄漏模的上转换荧光, 就可避免 Er³⁺

离子再吸收的影响。

上转换荧光强度随泵浦激光功率变化的实验曲线如图 3 所示。546 和 667 nm 谱线荧光强度随泵浦激光功率变化的对数曲线的斜率均为 1.9。因此,实验结果证明 546 和 667 nm 谱线荧光强度与泵浦激光功率成二次幂关系,说明产生一个绿光子或红光子需要吸收二个红外光子。而 467 nm 谱线荧光强度随泵浦激光功率变化的对数曲线的斜率为 2.9。所以,实验结果证明 467 nm 谱线荧光强度与泵浦激光功率成三次幂关系,说明三个红外光子被吸收产生一个蓝光子。

掺 Yb³⁺/Er³⁺ 光纤中稀土离子的多光子吸收过程^[4]有基态吸收、受激态吸收和不同离子间能量转移过程等。在连续 1064 nm 激光泵浦下, Yb³⁺ 离子吸收一个红外光子产生 ²F_{7/2}-²F_{5/2} 跃迁, ²F_{5/2} 态的 Yb³⁺ 离子通过能量转移过程使基态的 Er³⁺ 离子激发到 ⁴I_{11/2} 态。室温下这个能量转移过程的效率在零布居数时为 37%, 在反转 50% 布居数时为 20%^[5]。接着其它在 ²F_{5/2} 高能态的 Yb³⁺ 离子再次通过能量转移过程,将 ⁴I_{11/2} 态的 Er³⁺ 离子激发到 ⁴S_{3/2} 态,或者 ⁴I_{11/2} 态的 Er³⁺ 离子通过受激态吸收一个红外光子过程激发到 ⁴S_{3/2} 态。然后伴随着 ⁴S_{3/2}-⁴I_{15/2} 跃迁,发射 546 nm 绿荧光。

产生蓝荧光的主要泵浦过程是,基态 Er³⁺ 离子通过双光子吸收过程跃迁到 ²H_{11/2} 态,然后在 ²H_{11/2} 受激态再吸收一个红外光子,跃迁到 ²G_{7/2}, ²K_{15/2} 和 ⁴G_{9/2} 态构成的能带中,最后 ⁴G_{9/2}-⁴I_{13/2} 跃迁,发射蓝荧光。这种产生蓝荧光的泵浦过程已在掺 Er³⁺ 石英光纤的频率上转换实验中得到证实^[6]。同时, ⁴S_{3/2} 高能态的 Er³⁺ 离子再次通过能量转移或受激态吸收一个红外光子激发到 ²G_{7/2}, ²K_{15/2} 和 ⁴G_{9/2} 态能带中的泵浦过程,也能激发 Er³⁺ 离子到 ⁴G_{9/2} 态。

根据绿和蓝荧光强度、667 nm 谱线荧光强度与泵浦激光功率成二次幂的实验测量值,以及石英玻璃中声子发射几率较大的特性,推断出 667 nm 红色荧光主要是 ⁴S_{3/2} 态的 Er³⁺ 离子通过多声子过程弛豫到 ⁴F_{9/2} 态,然后 ⁴F_{9/2}-⁴I_{15/2} 跃迁产生的。另外,由多声子过程从 ⁴I_{11/2} 态弛豫到 ⁴I_{13/2} 态,或由 ⁴G_{9/2} 态(伴随发射蓝荧光)跃迁到 ⁴I_{13/2} 态的 Er³⁺ 离子,再吸收一个红外光子跃迁到 ⁴F_{9/2} 态的过程也对 667 nm 红荧光的产生有贡献。

实验结果表明,在连续 1064nm 激光泵浦下,利用掺 Yb³⁺/Er³⁺ 石英光纤中稀土离子的基态吸收、受激态吸收和不同稀土离子间能量转移等过程,可产生频率上转换可见荧光。因此,将频率上转换过程作为一种变频手段,可制成微型 YAG 激光器泵浦的掺 Yb³⁺/Er³⁺ 石英光纤可见荧光源。这是一种宽带光谱并且谱线稳定的光源,与单模光纤耦合效率高而且可避免光学反馈,可应用于光纤陀螺等光纤传感系统。

中国建筑材料科学研究院提供本实验用的掺 Yb³⁺/Er³⁺ 石英光纤,谨此致谢。

参 考 文 献

- 1 T. F. Carruthers, I. N. Duling *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **54**(10), 875~877(1989)
- 2 A. S. L. Gomes, Gid B. de Araujo, OLEO'90, Anaheim, California, USA, May 1990, paper CME 2
- 3 D. O. Hanna, R. M. Percival *et al.*, *Opt. Commun.*, **78**(2), 187~194(1990)
- 4 F. E. Auzel, *Proc. of IEEE*, **61**(6), 758~786(1973)
- 5 W. L. Barnes, S. B. Poole *et al.*, *J. Lightwave Tech.*, **7**(10), 1461~1465(1989)
- 6 华一敏,李 劬 *et al.*, *光学学报*, **12**(3), 67~70(1992)