

掺 Er^{3+} 和掺 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 光纤中 1313 nm 到 780 nm 的频率上转换过程*

胡巍 刘东峰 陈国夫 王贤华 侯洵

(中国科学院西安光机所 瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

提要 研究了在连续锁模和调Q锁模两种脉冲泵浦条件下, 掺 Er^{3+} 和掺 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 单模 $\text{GeO}_2/\text{SiO}_2$ 石英光纤中, 1313 nm Nd:YLF 激光到 780 nm 波长的频率上转换过程。 Er^{3+} 离子在共振吸收两个光子后到 $^4F_{9/2}$ 态, 再经快速的无辐射转移到 $^4I_{9/2}$ 态, 形成 780 nm 辐射。在连续锁模泵浦条件下, 1313 nm 至 780 nm 的转换效率比调Q锁模条件下更高, 而后者的峰值功率是前者的几百倍。

关键词 放大自发辐射, 频率上转换, 掺 Er^{3+} 光纤, 掺 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 光纤

1 引言

近年来, 随着掺铒光纤放大器和掺铒光纤激光器的深入研究, 掺杂稀土元素石英光纤中的各种非线性过程引起人们的注意, 其中包括频率上转换过程^[1~7]。利用这种从红外到可见光的放大自发辐射过程, 可以实现超荧光光源或激光光源。对掺铒光纤中的频率上转换已有许多研究, 在不同的波长(980 nm^[4], 1064 nm^[5], 1319 nm^[6], 1480 nm^[7])的连续^[5,7]或脉冲^[4,6]激光泵浦下的情况均有报道。其主要的发射光有 540 nm 绿光和 463 nm 蓝光。

本文研究了在连续锁模和调Q锁模两种脉冲泵浦条件下, 掺 Er^{3+} 和掺 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 单模 $\text{GeO}_2/\text{SiO}_2$ 石英光纤中, 1313 nm Nd:YLF 激光脉冲到 780 nm 波长光的频率上转换过程。在低峰值功率的连续锁模泵浦下, 1313 nm 至 780 nm 的转换效率比调Q锁模泵浦条件下更高, 后者的峰值功率却是前者的几百倍。对 463 nm 和 540 nm 等波长的发射光, 则是调Q锁模泵浦条件下的转换效率比连续锁模泵浦条件下高二到三个量级。我们对这一反常行为进行了分析。

2 实验装置

实验中使用一台 1313 nm 的 Nd:YLF 激光器作为泵浦源, 可以实现连续锁模运转或调Q锁模运转。连续锁模时脉冲宽度为 100 ps, 重复频率为 76 MHz, 脉冲间隔约 13.2 ns。调Q锁模运转时, 调Q脉冲包络宽为 1.5 μs , 重复率为 1.0 kHz。经 25 \times 显微物镜耦合进光纤中的最大平均功率约为 400 mW 左右, 对应调Q脉冲包络中心处的锁模脉冲的峰值功率为 35 kW, 而连续锁模脉冲的峰值功率只有 50 W, 相差 700 多倍。利用一台 1 m 的光栅单色仪测量光谱, 分别

* 国家自然科学基金及国家攀登计划飞秒激光技术和超快过程研究资助项目。

用光电倍增管和 Ge 光电二极管接收可见光和红外光信号。

测试中使用的掺铒单模光纤中铒离子的掺杂浓度是 500 ppm(重量比)。其芯径约为 $6\ \mu\text{m}$, 截止波长是 $0.975\ \mu\text{m}$, 在 $1.3\ \mu\text{m}$ 处的吸收大于 2000 dB/km。掺铒镱光纤中铒离子的掺杂浓度约 600 ppm, 镱离子的掺杂浓度约 200 ppm。其芯径约为 $6\ \mu\text{m}$ 。图 1 是简化的 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 离子的能级图。

3 结果与讨论

图 2 和图 3 分别给出了在 3 m 长的掺铒光纤和 4.9 m 长掺铒镱光纤中, 平均功率相同时, 调 Q 锁模泵浦和连续锁模泵浦下可见光光谱的对比, 图中上面曲线为调 Q 锁模泵浦, 下面曲线为连续锁模泵浦。在掺铒光纤中, 可以看到 463 nm 的蓝光和 525 nm, 540 nm 的绿光的强度比其他谱线强两个量级以上。其中 463 nm 蓝光对应 ${}^2G_{7/2}$ 态到亚稳态 ${}^4I_{13/2}$ 的跃迁。525 nm 和 540 nm 绿光分别对应 ${}^2H_{11/2}$ 和 ${}^4S_{3/2}$ 态到基态 ${}^4I_{15/2}$ 的跃迁。657 nm 的红光对应 ${}^4F_{9/2}$ 态到基态 ${}^4I_{15/2}$ 跃迁, 并与 1313 nm 泵浦光的倍频过程产生共振。当连续锁模泵浦时, 以上谱线都变得很弱, 在掺铒镱光纤中已探测不到。780 nm(在掺铒光纤中为 783 nm, 在掺铒镱光纤中为 778 nm)对应 ${}^4I_{9/2}$ 态到基态 ${}^4I_{15/2}$ 的跃迁, 在两种泵浦条件下基本不变。

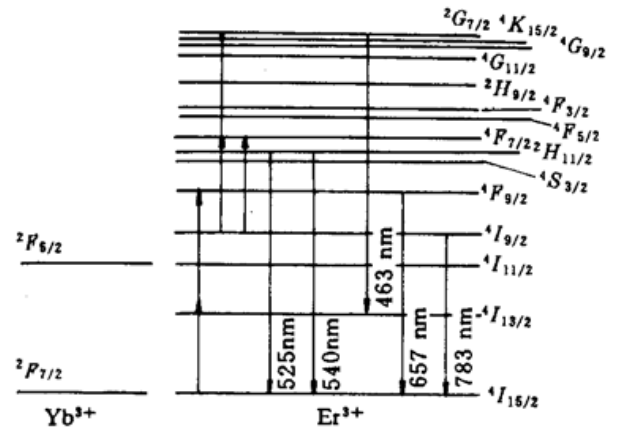


Fig. 1 A simplified energy level diagram of Er^{3+} and Yb^{3+} ions

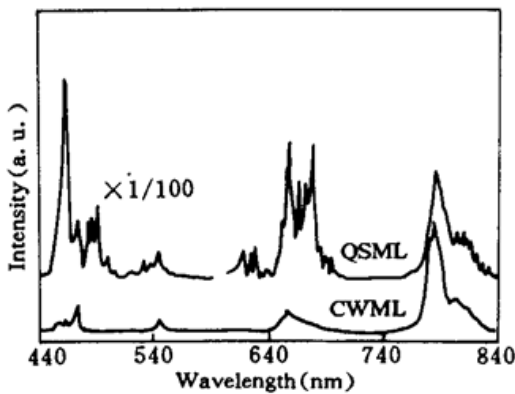


Fig. 2 The spectra of visible lights exiting from a 3 m long Er^{3+} -doped fiber pumped by a CW mode-locked laser (bottom) and a Q-switched mode-locked laser (top) with the same average power of 330 mW

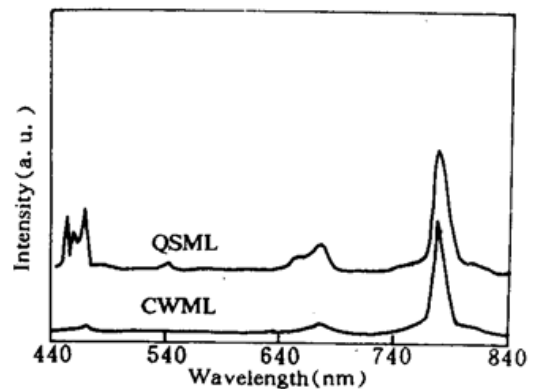


Fig. 3 The spectra of visible lights exiting from a 4.9 m long $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber pumped by the CW mode-locked laser (bottom) and the Q-switched mode-locked laser (top) with the same average power of 280 mW

Er^{3+} 离子的激发过程为^[6]: 首先经双光子共振吸收从 ${}^4I_{15/2}$ 基态激发到 ${}^4F_{9/2}$ 态, 再经快速的无辐射转移到 ${}^4I_{9/2}$ 态。从这里, 一部分离子进一步吸收一个光子到 ${}^4F_{7/2}$ 态, 经无辐射转移至 ${}^2H_{11/2}$ 态和 ${}^4S_{3/2}$ 态, 然后跃迁到基态发射 525 nm 和 540 nm 绿光; 另一部分则进一步吸收两个光子到 ${}^2G_{7/2}$ 态, 之后跃迁到亚稳态 ${}^4I_{13/2}$ 发射 463 nm 蓝光。所以, 蓝光是分步的四光子吸收过程, 绿光是分步的三光子吸收过程。657 nm 的红光 (${}^4F_{9/2}$ 态 - 基态 ${}^4I_{15/2}$ 跃迁) 和 780 nm 的近红

外光 (⁴I_{9/2} 态到基态 ¹I_{15/2} 的跃迁) 的存在正说明了 Er³⁺ 离子的激发过程是分步。Yb³⁺ 离子的掺杂使 Er³⁺ 离子对 1313 nm 光子的吸收能力减弱了, 特别是激发态吸收的几率减小了许多。因而在掺铒光纤中的蓝光和绿光很微弱。在低峰值功率的连续锁模脉冲泵浦下, 在 ⁴I_{9/2} 态的激发态吸收的几率也减小了许多, 使蓝光和绿光强度都变弱了。

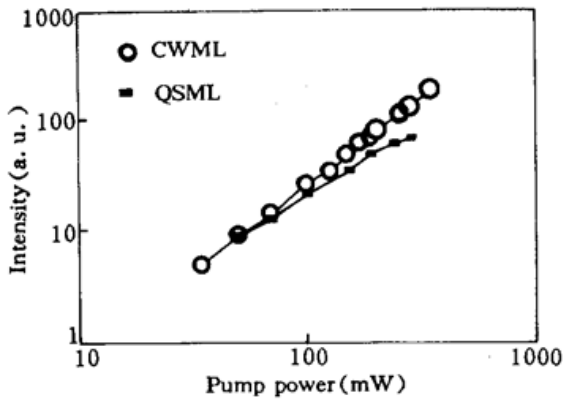


Fig. 4 The intensity of the 783 nm light as a function of the average pump power in an Er³⁺-doped fiber pumped by the CW mode-locked laser (circle) and the Q-switched mode-locked laser (square)

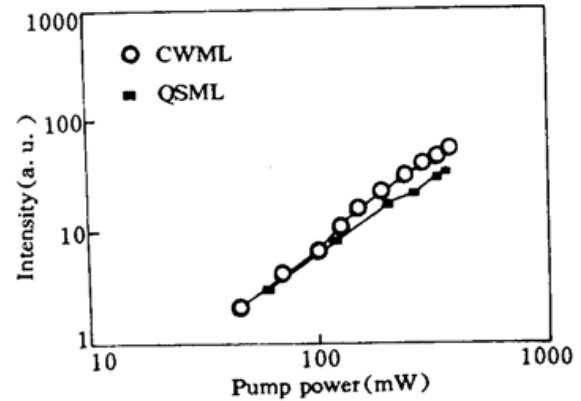


Fig. 5 The intensity of the 778 nm light as a function of the average pump power in an Er³⁺/Yb³⁺-doped fiber pumped by the CW mode-locked laser (circle) and the Q-switched mode-locked laser (square)

我们进一步考察了在两种泵浦条件下 780 nm 光信号强度与平均泵浦功率的关系, 见图 4 和图 5。在双对数坐标中, 783 nm 和 778 nm 的变化均近似为直线, 而且连续锁模泵浦下直线的斜率大于调 Q 锁模的。在图 4 所示的掺铒光纤中, 其斜率分别是 1.5 和 1.2, 掺铒镱光纤中则分别是 1.6 和 1.2。显然在高峰值功率时有饱和现象。由于信号强度与泵浦功率的 1.2~1.6 次幂成正比, 即

$$P_{\text{signal}} \propto P_{\text{pump}}^{1.2 \sim 1.6}$$

所以从 1313 nm 至 780 nm 的上转换效率正比于泵浦功率的 0.2~0.6 次幂, 即

$$\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{pump}}} \propto P_{\text{pump}}^{0.2 \sim 0.6}$$

调 Q 锁模脉冲的峰值功率是连续锁模时的 700 多倍, 因此其转换效率至少应高 5 倍至 50 倍。实际却相反, 连续锁模时转换效率更高。在其他波长都没有这种反常现象。我们认为原因有两个: 一是 ⁴I_{9/2} 能级的寿命比较长, 大约 200 ns^[8], 远大于 13.2 ns 的锁模脉冲间隔。这样多个脉冲的泵浦效果可以累积, 从而有较高的上转换效率。二是在高峰值功率下表现出的饱和现象。在掺铒光纤中, 在 ⁴I_{9/2} 态离子进一步吸收光子形成 463 nm 蓝光和 525 nm, 540 nm 绿光。当调 Q 锁模泵浦下, 蓝光和绿光的强度远远大于 783 nm 光强度, 说明它们抑制了从 ⁴I_{9/2} 能级到基态的跃迁, 形成饱和。在掺铒镱光纤中情况类似, 但没有强的蓝光和绿光产生。另一方面拉曼效应也是形成饱和的原因之一。对于 3~5 m 的短光纤, 拉曼效应阈值很高, 连续锁模脉冲泵浦时不发生拉曼效应。而调 Q 锁模泵浦下, 则产生拉曼光。在高功率下, 拉曼效应可以使超过一半的泵浦能量转移到斯托克斯光^[9], 从而限制了 780 nm 光的强度增长。以上这些效应的共同作用, 使得在低峰值功率的连续锁模泵浦下, 1313 nm 至 780 nm 的转换效率比调 Q 锁模泵浦条件下更高。

致谢 感谢电子工业部 46 所为我们提供掺饵光纤和掺饵镱光纤。

参 考 文 献

- 1 Gerard Monmom, Bernard Dussardier, Eric Maurice *et al.*. Fluorescence and superfluorescence line narrowing and tunability of Nd³⁺ doped fibers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1994, QE-30(10): 2361~2367
- 2 T. F. Carruthers, I. N. Duling II, C. M. Shaw *et al.*. Visible-wavelength amplified spontaneous emission in a neodymium-doped optical fiber pumped at 1064 nm. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, 54(10): 875~877
- 3 A. S. L. Gomes, Cid B. de Araujo, B. J. Ainslie *et al.*. Amplified spontaneous emission in Tm³⁺ doped monomode optical fibers in the visible region. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 57(21): 2169~2171
- 4 Peter A. Krug, Mark G. Sceats, G. R. Atkins *et al.*. Intermediate excited-state absorption in erbium-doped fiber strongly pumped at 980 nm. *Opt. Lett.*, 1991, 16(24): 1976~1978
- 5 华一敏, 陈英礼, 陈益新. 掺饵石英光纤中频率上转换的实验研究. *光学学报*, 1992, 12(3): 261~264
- 6 D. L. Nicacio, E. A. Gouveia, A. M. Reis *et al.*. Generation of intense green light through amplified spontaneous emission in Er³⁺ doped single mode optical fiber pumped at 1.319 μm. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1994, QE-30(11): 2634~2638
- 7 Shin Arahira, Kenji Watanabe, Keisuke Shinozaki *et al.*. Successive excited-state absorption through a multistep process in highly Er³⁺ doped fiber pumped by a 1.48 μm laser diode. *Opt. Lett.*, 1992, 17(23): 1679~1681
- 8 J. Thogerson, N. Bjerre, J. Mark. Multiphoton absorption and cooperative upconversion excitation in Er³⁺ doped fiber. *Opt. Lett.*, 1993, 18(3): 197~199
- 9 A. S. Gouveia-Neto, A. S. Gomes, J. R. Taylor. High efficiency single pass soliton Raman compression in an optical fiber around 1.4 μm. *Opt. Lett.*, 1987, 12(12): 1035~1037

Laser Frequency Upconversion from 1.313 μm into 780 nm in Er³⁺-doped and Er³⁺/Yb³⁺-doped Germanosilicate Single-mode Optical Fibers

Hu Wei Liu Dongfeng Chen Guofu Wang Xianhua Hou Xun

(State Key Lab. of Transient Optical and Technology, Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

Abstract We observed the frequency upconversion of a 1.313 μm Nd:YLF laser pulse into 780 nm through the amplified spontaneous emission (ASE) in Er³⁺-doped and Er³⁺/Yb³⁺-doped germanosilicate single-mode optical fibers pumped by a CW mode-locked (CW+ML) laser and a Q-switched mode-locked (QS+ML) laser, respectively. The emission at 780 nm corresponds to ⁴I_{9/2}—⁴I_{15/2} transition, and its pumping mechanism is accomplished by a first step resonant two-photon absorption to ⁴F_{9/2} state, followed by a fast nonradiative relaxation to ⁴I_{9/2} state. The conversion efficiency of 1.313 μm light into 780 nm light pumped by the CW+ML laser is higher than pumped by the QS+ML laser with the peak laser power being several hundred times higher.

Key words frequency upconversion, amplified spontaneous emission, Er³⁺-doped fiber, Er³⁺/Yb³⁺-doped fiber