

高功率掺镱光纤放大器中频率上转换发光现象的研究

孙鑫鹏 赵长明 杨苏辉

(北京理工大学信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081)

摘要 建立了半导体抽运的高功率掺镱双包层光纤放大器实验系统,对放大器中的频率上转换发光现象进行了理论和实验研究,分析认为实验中由光纤侧面和两端观测到的绿色荧光是处于激发态的 Yb^{3+} 相互作用,同时湮没而产生的合作荧光。分别对光纤放大器信号端和抽运端输出的荧光谱进行了测量,将实验谱线与理论计算得到的合作发光谱进行了对比分析。研究了信号光和放大自发辐射对上转换发光的影响,根据速率方程推导出荧光强度与抽运功率之间的理论关系表达式,同时通过实验获得了荧光强度与抽运功率的关系曲线。

关键词 光纤放大器; 掺镱; 频率上转换; 合作荧光

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082808.1441

Frequency-Upconversion Luminescence in High-Power Yb^{3+} -Doped Fiber Amplifier

Sun Xinpeng Zhao Changming Yang Suhui

(Department of Optoelectronic Engineering, School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Experimental system of high power Yb^{3+} -doped double-clad fiber amplifier pumped by diode laser was set up. Frequency upconversion luminescence in this fiber amplifier has been studied theoretically and experimentally. Analysis shows that the green fluorescence at fiber side and ends is due to cooperative luminescence. The cooperative fluorescence spectrum from pump side and signal side of fiber has been measured and compared with theoretical spectrum. The influence of signal and amplified spontaneous emission on frequency upconversion fluorescence has been discussed. The relational expression between the fluorescence intensity and pump power was described theoretically based on the rate equation and the relational curve was obtained by experiment.

Key words fiber amplifier; Yb^{3+} doped; frequency upconversion; cooperative fluorescence

1 引言

近年来,以掺稀土离子光纤作为增益介质的各种光纤放大器发展迅速,常见的掺杂离子如 Er^{3+} 、 Nd^{3+} 、 Yb^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Tm^{3+} 等。其中 Yb^{3+} 由于具有较宽的吸收和发射带宽、能级结构简单、可掺杂浓度高等特点,在高功率光纤放大器中有极为重要的应用,受到了广泛关注。人们在研究中发现, Yb^{3+} 在受到激励时有频率上转换发光现象发生^[1~11]。本文对掺 Yb^{3+} 光纤放大器中可见荧光进行了理论和实验研究,分析了高功率条件下由光纤两端发射的可见荧光谱的不同。另外研究了较强的放大自发辐

射和信号光与可见荧光的关系。

2 实验装置

以中心波长 976 nm 的光纤输出半导体激光器作为抽运源,对单块非平面环形腔激光器(NPRO)产生的 1064 nm 连续单频激光进行放大。分别对光纤信号端和抽运端的输出光谱进行测量,实验装置如图 1 所示。双色镜 1 对抽运光的透射率为 93%,信号光反射率为 96%;双色镜 2 对信号光的透射率为 90%,抽运光反射率为 82%。采用的掺镱双包层光纤长度为 1.8 m,内包层为 D 型,半径为

收稿日期: 2007-12-20; 收到修改稿日期: 2008-04-02

基金项目: 国家部委预研项目(41302010107)资助课题。

作者简介: 孙鑫鹏(1980-),男,博士研究生,主要从事高功率光纤激光及光纤组束技术等方面的研究。

E-mail: sunwood@bit.edu.cn

导师简介: 赵长明(1960-),男,教授,博士生导师,主要从事光电子信息技术与系统、新型激光器件与技术等方面的研究。E-mail: zhaochangming@bit.edu.cn

200 μm , 数值孔径为 0.37, 纤芯半径 a 为 15 μm , 数值孔径为 0.06, 掺杂浓度 $N = 5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 。

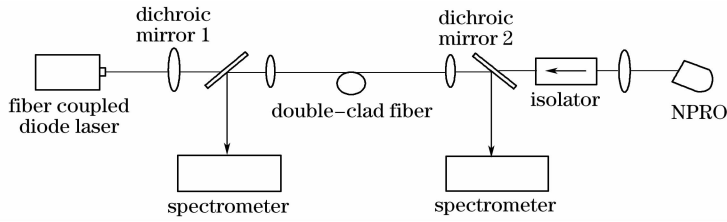


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

实验中首先可以在靠近抽运端的光纤侧面用肉眼观测到绿色荧光, 随着抽运功率逐渐增强, 可观察到发出荧光的光纤长度随之增加直至整根光纤。同时, 在光纤两端通过双色镜输出也可以观测到绿色圆形光斑。

3 实验结果及分析

采用 Acton Research 公司的 SP-2300i 型光谱仪分别对光纤放大器在信号端和抽运端的输出光谱进行测量。分别根据双色镜 1 和双色镜 2 对可见光波段不同波长的反射率, 对直接测量得到的光谱进行修正, 获得如图 2 中虚线所示的光纤中实际输出的光谱曲线。

图 2(a) 中虚线为光纤信号端实际发射的光谱曲线, 可以看到有三个荧光峰分别位于 488 nm、503 nm 和 515 nm 处。通过对能级结构的分析可知, Yb^{3+} 只有两个简并的多重态能级 $^2F_{7/2}$ 和 $^2F_{5/2}$, 上下能级间隔约为 10000 cm^{-1} , 比 Stark 子能级间隔大得多(如图 3)。其激光跃迁主要有: 能级 $d-a$, 发射中心波长 976 nm; 能级 $d-b$, 发射中心波长 1030 nm; 能级 $d-c$, 发射中心波长 1070 nm。在可见光范围内没有对应的跃迁能级。因此绿色荧光的产生与合作荧光有关, 它是由 Yb^{3+} 间的电多级相互作用所导致的, 是频率上转换机理的一种, 其发光过程如图 4 所示: 处于激发态的 Yb^{3+} 相互作用, 同时湮没而产生可见波段的合作荧光发射。

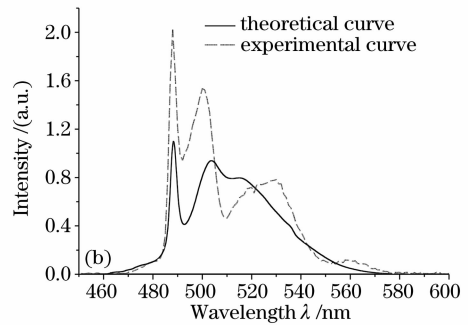
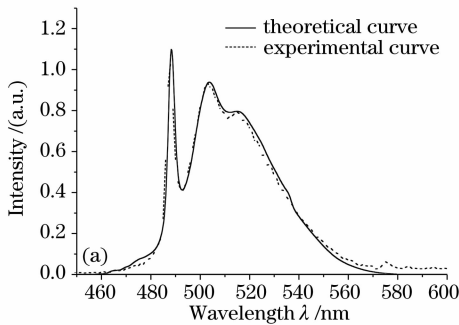


图 2 合作荧光光谱。(a) 信号端测量, (b) 抽运端测量

Fig. 2 Cooperative fluorescence spectrum. (a) From signal side, (b) from pump side

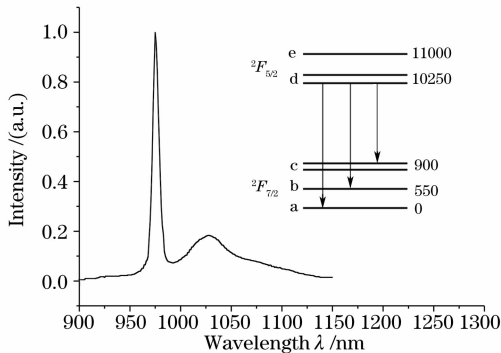


图 3 Yb^{3+} 发射谱和能级结构

Fig. 3 Emission spectrum and energy level of Yb^{3+}

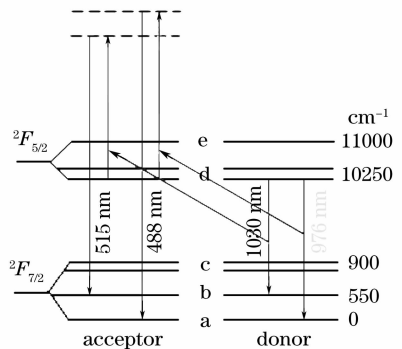


图 4 合作荧光过程

Fig. 4 Cooperative fluorescence process

参与合作发光的一对 Yb^{3+} 分别称为施主离子和受主离子,其红外跃迁频率分别为 ν_d, ν_a , 单个离子的红外荧光光谱为 $\Lambda_e^{[2]}$ (图 3)。则产生的合作荧光频率为

$$\nu = \nu_d + \nu_a, \quad (1)$$

合作发光谱表示为

$$\Lambda(\nu) = \int_{\text{emission spectrum}} \Lambda_e(\nu_d) \cdot \Lambda_e(\nu_a) \cdot d\nu_d, \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式,即可将合作发光谱 $\Lambda(\nu)$ 写作单个离子荧光谱的自卷积形式:

$$\Lambda(\nu) = \int_{\text{emission spectrum}} \Lambda_e(\nu_d) \cdot \Lambda_e(\nu - \nu_d) \cdot d\nu_d = \Lambda_e(\nu_d) * \Lambda_e(\nu_d), \quad (3)$$

由(3)式计算得到的理论光谱如图 2(a)、图 2(b)中实线所示。

研究发现,光纤信号端发射的合作荧光谱线与理论光谱十分吻合。其中合作光谱中心波长为 488 nm 的尖峰对应了红外荧光谱 Λ_e 在 976 nm 处的发射峰,中心波长为 503 nm 的峰值对应 Λ_e 中 976 nm 和 1030 nm 处的发射峰,而中心波长为 515 nm 的峰值与 Λ_e 中 1030 nm 的发射峰相对应。

从光纤抽运端发出的荧光与理论光谱差别较大,如图 2(b)。与 976 nm 合作发光相对应的 488 nm 可见光谱峰值大大增强了,认为这主要是由于光纤中存在较强的 976 nm 抽运光引起的。另外在 530 nm 附近出现了一个较为平坦的荧光峰,分析认为这是由对应能级 d-c(中心波长 1070 nm)的 Yb^{3+} 合作发射产生的。同时发现原来中心波长 503 nm 处对应 976 nm 和 1030 nm 合作发光的荧光峰向短波方向移动,成为中心波长 500 nm 的更为尖锐的荧光峰,其产生变化的原因有待进一步深入研究。

对光纤放大器中的自发辐射光谱进行了测量。当没有注入信号光时,在高功率抽运下以放大自发辐射的形式产生了较强的红外辐射,在 1035 nm、1038 nm、1040 nm、1043 nm 和 1045 nm 等处有多个发射峰,以中心波长为 1045.3 nm 的峰最为尖锐,如图 5 中实线。当 50 mW 的 1064 nm 连续信

号光注入光纤后,自发辐射受到明显的抑制(图 5 中虚线),发射尖峰消失。但由于放大的自发辐射和信号光同样具有大量消耗激发态粒子的作用,因此实验中发现,信号光注入前后可见荧光光谱并无明显变化。

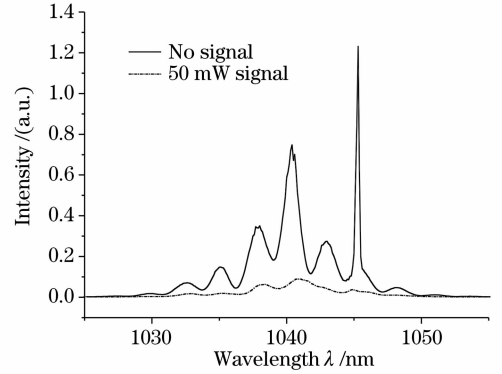


图 5 自发辐射光谱

Fig. 5 Spontaneous emission spectrum

由于可见荧光是相互作用的处于激发态的 Yb^{3+} 同时湮没合作发射产生的,因此应具有合作效应的特点,即辐射的光强与激发态粒子数的平方成正比。

设光纤中掺杂粒子数密度为 N , 上下能级的粒子数密度分别为 N_2, N_1 , 则有

$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} &= (W_p^a + W_s^a + W_{ASE}^a) N_1 - \\ &\quad (W_p^e + W_s^e + W_{ASE}^e + A_{21}) N_2, \\ W_p^{a,e} &= \frac{\sigma_p^{a,e} I_p}{h\nu_p}, \\ W_s^{a,e} &= \frac{\sigma_s^{a,e} I_s}{h\nu_s}, \\ W_{ASE}^{a,e} &= \sum_i \frac{\sigma_{ASEi}^{a,e} I_{ASEi}}{h\nu_{ASEi}}, \end{aligned}$$

其中 $W_p^{a,e}, W_s^{a,e}, W_{ASE}^{a,e}$ 分别为抽运光、信号光和放大自发辐射光的受激吸收、受激辐射几率, $\sigma_p^{a,e}, \sigma_s^{a,e}, \sigma_{ASEi}^{a,e}$ 分别为抽运光、信号光和放大自发辐射光受激吸收、受激辐射截面, ν_p, ν_s, ν_{ASEi} 为抽运光、信号光和放大自发辐射光频率, A_{21} 为自发辐射几率, h 为普朗克常数。

在稳态条件下 $dN_2/dt = 0$, 可求得

$$N_2 = \frac{\left[\frac{\sigma_p^a P_p \Gamma_p}{h\nu_p} + \frac{\sigma_s^a P_s \Gamma_s}{h\nu_s} + \sum_i \frac{\sigma_{ASEi}^a P_{ASEi} \Gamma_{ASEi}}{h\nu_{ASEi}} \right] \cdot N}{\frac{(\sigma_p^a + \sigma_p^e) P_p \Gamma_p}{h\nu_p} + \frac{(\sigma_s^a + \sigma_s^e) P_s \Gamma_s}{h\nu_s} + \sum_i \frac{(\sigma_{ASEi}^a + \sigma_{ASEi}^e) P_{ASEi} \Gamma_{ASEi}}{h\nu_{ASEi}} + \pi a^2 A_{21}}, \quad (4)$$

可见在高功率放大器中激发态粒子数与抽运功率 P_p 的关系表达式较为复杂,并不是简单的正比关系,式中还包含了信号光 P_s 和放大自发辐射 P_{ASEi} 。由于合作荧光强度 $I \propto N_2^2$, 将(4)式代入可知,合作荧光强度并

非正比于 P_p^2 , 而是有

$$I \propto \left\{ \frac{\left[\frac{\sigma_p^a P_p \Gamma_p}{h\nu_p} + \frac{\sigma_s^a P_s \Gamma_s}{h\nu_s} + \sum_i \frac{\sigma_{ASEi}^a P_{ASEi} \Gamma_{ASEi}}{h\nu_{ASEi}} \right] \cdot N}{\left(\frac{\sigma_p^a + \sigma_p^e}{h\nu_p} \right) P_p \Gamma_p + \left(\frac{\sigma_s^a + \sigma_s^e}{h\nu_s} \right) P_s \Gamma_s + \sum_i \frac{(\sigma_{ASEi}^a + \sigma_{ASEi}^e) P_{ASEi} \Gamma_{ASEi}}{h\nu_{ASEi}} + \pi a^2 A_{21}} \right\}^2$$

对不同抽运功率下光纤放大器信号端的可见荧光进行测量, 得到抽运功率与荧光光强的对数关系曲线如图 6 所示。曲线的斜率约为 1.4, 因此实验中的合作荧光强度大约与抽运功率的 1.4 次方成正比, 即 $I \propto P_p^{1.4}$ 。随着抽运功率的增加, 曲线斜率逐渐减小, 荧光光强逐渐趋于饱和。另外可以看到 488 nm、503 nm 和 515 nm 三个波长光强曲线的变化趋势一致, 说明这三个荧光峰是由同一上转换机理所产生的。

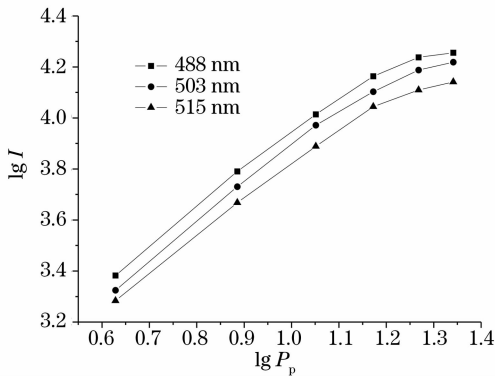


图 6 荧光光强与抽运功率的对数关系曲线

Fig. 6 Dependence of fluorescence intensity on pumping power

4 结 论

高功率掺镱光纤放大器中的频率上转换发光为合作荧光, 处于激发态的 Yb^{3+} 同时湮没产生可见波段的合作发光, 这个过程消耗了反转粒子, 导致了光纤放大器能量转换效率降低。因此进一步深入研究上转换发光现象对于提高效率, 改进光纤放大器性能是十分必要的。

参 考 文 献

1 K. C. Mishra, J. K. Berkowitz, E. A. Dale *et al.*. Cooperative two-photon luminescence[J]. *J. Lumin.*, 1990, **46**(4): 209~215

2 S. Magne, Y. Ouerdane, M. Druetta *et al.*. Cooperative luminescence in an ytterbium-doped silica fibre [J]. *Opt. Commun.*, 1994, **111**(3~4): 310~316

3 Chen Xiaobo, Li Song, Song Zengfu *et al.*. Study on strong cooperative upconversion luminescence of ytterbium-ytterbium clusters in oxyfluoride glass[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(12): 2581~2587

4 M. J. Bell, W. G. Quirino, S. L. Oliveira *et al.*. Cooperative luminescence in Yb^{3+} doped phosphate glasses [J]. *J. Phys. Condens. Matter.*, 2003, **15**(27): 4877~4887

5 Zhou Gang, Dai Shixun, Yu Chunlei *et al.*. Enhancement of upconversion luminescence due to the formation of nanocrystals Er^{3+} -doped tellurite glasses [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(1): 36~38

6 Liu Zhengwei, Yang Huixian, Yang Xiaoliang *et al.*. Study on the up-conversion mechanism of Yb^{3+} [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2003, **23**(5): 846~848
刘政威, 杨恢先, 阳效良等. Yb^{3+} 离子的能量上转换机制的探讨 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2003, **23**(5): 846~848

7 Hu Wei, Liu Dongfeng, Chen Guofu *et al.*. Frequency upconversion in germanosilicate single mode optical fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(1): 24~27
胡 巍, 刘东峰, 陈国夫等. 普通单模石英光纤中频率上转换过程的研究 [J]. *光学学报*, 1997, **17**(1): 24~27

8 Duan Zhongchao, Zhang Junjie, He Dongbing *et al.*. Upconversion luminescence of Tm^{3+}/Yb^{3+} codoped oxyfluoride glasses pumped at 970 nm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1659~1663
段忠超, 张军杰, 何冬兵等. 970 nm 抽运下 Tm^{3+}/Yb^{3+} 共掺氧氟玻璃的频率上转换发光 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1659~1663

9 Feng Ming, Ruan Shuangchen, Du Chenlin *et al.*. Frequency upconversion in Yb^{3+} -doped fiber laser in the visible region [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 648~650
冯 鸣, 阮双琛, 杜晨林等. 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器中频率上转换产生可见光的实验研究 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 648~650

10 Zhou Yaxun, Wang Jun, Dai Shixun *et al.*. Effect of Yb^{3+} on infrared and upconversion emission of Er^{3+} -doped tellurite-based glasses [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1688~1693
周亚训, 王 俊, 戴世勋等. Yb^{3+} 对掺铒碲酸盐玻璃红外和上转换发光的影响 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1688~1693

11 Xu Shiqing, Huang Jun, Zhang Liyan *et al.*. Investigation on upconversion luminescence of Yb^{3+} -sensitized Tm^{3+} -doped oxyhalide tellurite glasses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 225~229
徐时清, 黄 俊, 张丽艳等. Yb^{3+} 敏化 Tm^{3+} 掺杂氧卤碲酸盐玻璃的上转换发光研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 225~229