

文章编号: 1001-3806(2008)06-0639-03

单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤上转换效应实验研究

周次明, 陈留勇

(武汉理工大学 光纤传感技术研究中心, 武汉 430070)

摘要: 为了研究单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤中的上转换效应, 采用对比实验的方法, 用荧光分光光度计测量了单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤的绿色荧光, 并与掺 Yb^{3+} 光纤的绿色荧光进行了对比分析。得到 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤中的绿色荧光仍然是 Er^{3+} 离子激发态吸收所产生, 而 Yb^{3+} 只起到能量搬运作用的结果。结果表明, 两种光纤受激产生的荧光光谱、功率及其随抽运功率的变化关系, 都遵循不同规律。

关键词: 激光物理; 光纤激光; 上转换效应; 双包层光纤; 绿色荧光

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Experiment research of frequency up-conversion in double cladding Er^{3+} - Yb^{3+} co-doped fiber and Yb^{3+} doped fiber

ZHOU Ciming, CHEN Liuyong

(Research Center of Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract In order to study the frequency up-conversion in single model double cladding Er^{3+} - Yb^{3+} co-doped fiber, the green fluorescence emitted by single model double cladding Er^{3+} - Yb^{3+} co-doped fiber was measured with a fluorophotometer and compared with the green fluorescence in Yb^{3+} doped fiber. The results show that the fluorescence in the single model double cladding Er^{3+} - Yb^{3+} co-doped fiber is attributed to the absorption of Er^{3+} ions in the excited state of and the Yb^{3+} ions only transfer the pump energy to the Er^{3+} ions. It leads to the difference of an ionic fluorescence between the double cladding Er^{3+} - Yb^{3+} co-doped fiber and Yb^{3+} doped fiber in the spectra and the power and its variation law.

Key words laser physics; fiber laser; up-conversion; double cladding fiber; green fluorescent

引 言

以掺 Er^{3+} 光纤、掺 Yb^{3+} 光纤和 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤为代表的掺稀土光纤, 被广泛地用来作为光纤放大器以及光纤激光器的增益介质。它们可以将特定波长的抽运光转化到人们需要的较长波段^[1]。但是由于上转换作用, 也有一部分抽运光会转化到较短波段, 并以荧光的形式泄露掉, 降低了转化效率, 而且这些稀土离子的上转换发光辐射波长多在蓝绿波段^[2]。有些人报道过掺 Er^{3+} 光纤和掺 Yb^{3+} 光纤中的上转换荧光现象, 1991 年 KRUG 等首次对掺钕光纤中的绿色荧光进行了分析^[3]; YANG 等人从理论和实验上分析和说明了掺 Yb^{3+} 光纤在 980nm 抽运光的作用下发出的绿色荧光与合作荧光效应有关^[4]。这些报道多侧重于对这种荧光现象进行理论分析^[5], 并做一

些简单的实验研究, 少有详细测量荧光光谱、功率及其与抽运功率变化关系的报道, 而且, 没有见到单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤上转换荧光现象的报道。

$\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤是当前光纤放大器的首选, 有必要详细研究此光纤的发光光谱特性, 对于进一步优化双包层结构、掺杂材料种类及其浓度, 以及提高光纤放大器的增益和激光器的输出功率有重要意义。本文中报道了单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤在 980nm 抽运光的作用下, 也会发出绿色的荧光, 并对此荧光与掺 Yb^{3+} 光纤在 980nm 抽运光的作用下所产生的绿色荧光进行了详细测量和对比分析。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示。由于研究的主要是单模

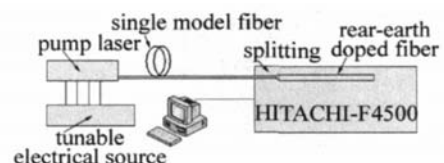


Fig 1 Experiment setup

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60477029)

作者简介: 周次明 (1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感和光纤激光器的研究。

Email: zcm@whut.edu.cn

收稿日期: 2007-09-14 收到修改稿日期: 2007-11-21

$\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤在抽运光作用下受激励发出可见绿色荧光的现象, 抽运光从内包层注入, 能提高抽运效率, 但是不会改变其荧光光谱和强度变化规律, 而且由于实验用抽运激光器及其尾纤, 以及用于比较研究的掺 Yb^{3+} 光纤都是单模的, 因此, 采用参考文献 [4] 中研究掺 Yb^{3+} 双包层光纤绿光荧光的方法, 将掺杂光纤与单模光纤直接熔接, 抽运激光器发出的光被耦合进掺杂光纤的纤芯, 直接抽运光纤, 使其受激发出荧光。将发出荧光的掺杂光纤放入 HITACHI F4500 荧光分光光度计的分析室, 调节抽运激光器的抽运功率, 实时测量和记录各种不同条件下的荧光光谱。

实验中采用波长为 974nm 的单模半导体激光器作为抽运源, 半导体激光器的尾纤是一段普通的 G652 单模光纤。所使用掺杂增益光纤是单模钕镜共掺双包层光纤和掺镜单模光纤两种。钕镜共掺双包层光纤是美国 Nufem 公司的 EYDF-7/130 单模双包层光纤, 纤芯和内包层均为圆形, 数值孔径分别为 0.17 和 0.46。使用的掺 Yb^{3+} 光纤中氧化镱的体积分数为 0.004。HITACHI F4500 荧光分光光度计是一种荧光分析仪器, 具有高度的灵敏性, 能够实现快速扫描, 扫描范围为 200nm~900nm, 扫描精度可以达到 1nm。

2 实验结果与分析

当抽运光超过一定阈值后, 在单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤和掺镜光纤与单模传输光纤接头处, 都可以观察到明显的绿色荧光, 并且随着抽运功率的提高, 绿色荧光逐渐增强, 荧光区域随之逐渐扩大, 可能由于受到抽运激光器功率的限制, 没有看到整段光纤全部发出可见绿色荧光的现象。

用 HITACHI F4500 荧光分光光度计测得单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤和掺镜光纤发出的典型绿色荧光光谱如图 2 所示。图 2 中虚线数据是单模双包

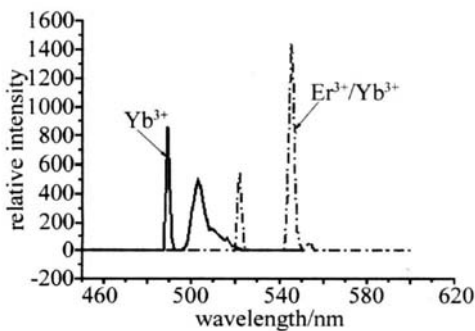


Fig 2 The representative green fluorescence spectrum of single mode double cladding $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber

层光纤所发上转换荧光光谱, 存在两个明显的荧光峰, 中心波长分别是 522nm 和 545nm, 图 2 中实线数据是掺 Yb^{3+} 光纤的上转换荧光光谱, 其中心波长分别是

489nm 和 503nm。可见, 两种光纤上转换荧光在波长范围、光谱形状和激发功率上都有明显不同。

单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤所发出荧光所对应的峰值波长, 正好与掺镜光纤中 Er^{3+} 上转换效应理论分析产生的荧光光谱相同^[6], 因此, 在单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤中的荧光并不是 Yb^{3+} 受激发发出, 仍然是 Er^{3+} 激发态吸收效应产生。这是因为在单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤中, 由于 Yb^{3+} 的吸收截面比 Er^{3+} 大得多, 特别是 Yb^{3+} 容易吸收 980nm 附近的抽运能量, 处于基态的离子被激发到高能级的效率很高, 而且 Yb^{3+} 可以达到较高的浓度, 也不会出现浓度淬灭, 当 Yb^{3+} 吸收抽运能量后, 能量会通过无辐射跃迁转移到 Er^{3+} 能量相近的能级上^[7]。单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤中的 Er^{3+} 吸收了来自 Yb^{3+} 能量后, 由于激发态吸收效应, 就发出绿色荧光, Yb^{3+} 在整个发光过程中只起一个能量传递的作用, 这也证实了 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺系统的工作机理。掺 Yb^{3+} 光纤所发出荧光的所对应的峰值波长, 与文献中报道的 Yb^{3+} 上转换效应理论分析产生的荧光光谱相同^[8-9]。

为了进一步研究单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤荧光特性, 并与掺镜光纤进行对比, 改变激光器的抽运功率, 分别测量了两种光纤的荧光光谱和相对功率。

图 3 是两种光纤荧光光谱随抽运功率变化对比曲线图。图 3a 为单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤在相

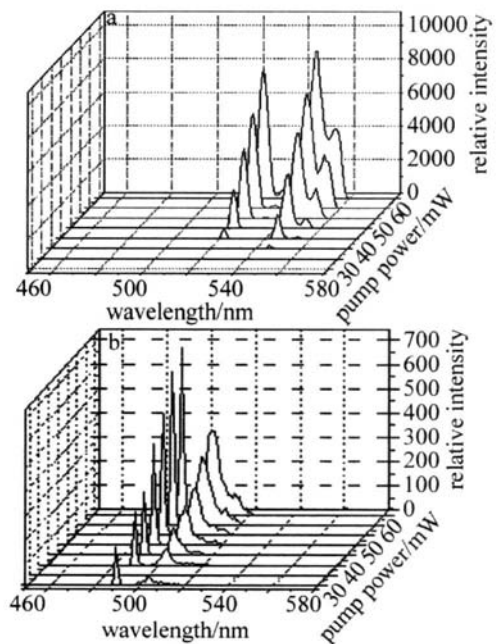


Fig 3 Green fluorescence spectra

a— spectrum of single mode double cladding $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber
b— spectrum of Yb^{3+} doped fiber

应抽运功率下发出的荧光光谱。抽运功率达 40mW 时, 545nm 波长荧光首先出现; 抽运功率达 45mW 时, 545nm 处荧光强度增加, 同时, 在 522nm 处出现一个

新的波长;随着抽运功率的增加,此两个波长荧光强度随之增加,抽运功率达 50mW 时,554nm 处出现第 3 个荧光峰;继续增大抽运功率,以此 3 个波长为峰值的荧光强度持续增强;在抽运功率达 55mW 时,在 532nm 处出现一个新的波长;在抽运功率达到 65mW 时,在 522nm, 532nm, 545nm 和 554nm 处的荧光相对强度分别达到 7671, 624. 1, 8750 和 4153 特别是 545nm 处荧光在抽运功率达到 70mW 时即达到荧光分光光度计的荧光相对强度 10000 但是荧光光谱的形状没有发生展宽,也没有新的峰值波长出现。

图 3b 为掺 Yb^{3+} 光纤在相应抽运功率下发出的荧光光谱。抽运功率达 30mW 时,489nm 和 503nm 波长处荧光都已出现,可见此光纤荧光阈值低于单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双层光纤;随着抽运功率的增加,这两个波长荧光强度随之增加,但是以 489nm 为中心的 10nm 范围荧光光谱形状没发生变化,以 503nm 为中心的荧光光谱持续展宽,由 30mW 抽运的 498nm~522nm 展宽到 65mW 抽运的 496nm~526nm。对比图 3a 相同抽运功率情况下,荧光功率大大低于单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双层光纤所产生的,在抽运功率达到 65mW 时,在 489nm 和 503nm 处的荧光相对强度分别仅为 688 和 345. 7。

图 4 为两种光纤所发荧光峰值波长处光强随抽运功率变化曲线图。图 4a 为单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双层包

中 A, B, C, D, E 分别对应 522nm, 532nm, 545nm, 554nm 和总体相对强度曲线。从曲线变化趋势可以看出,每个波长都存在一个抽运功率阈值:在抽运功率低于此值时,光纤只发出微弱的荧光,并且荧光强度随抽运功率增加缓慢变强;当抽运功率高于此值时,光纤所发出荧光的强度与抽运功率基本呈线性关系,每个波长在线性变化区间的斜率基本相等,可见每个波长出现后,以大致相同速度随抽运激光的增加而增加。总体强度随抽运功率变化曲线也存在一个阈值,其在阈值上下的变化规律与单个峰值波长的变化规律类似,如图 4a 中曲线 E 所示。

图 4b 为掺 Yb^{3+} 光纤在 489nm 和 503nm 处荧光相对强度,以及其总体相对强度随抽运功率变化曲线图。图中曲线 a, b, c 分别对应 489nm, 503nm 和总的相对荧光强度曲线。可见 489nm 和 503nm 处的荧光相对强度都随抽运功率的增加而非线性增加,但 489nm 处荧光的增长速率要高于 503nm 处的增长速率。同时,总的荧光相对强度也随抽运光的增强而增大,但是增长速度高于前两者,其原因在于,随抽运光的增强,荧光光谱持续展宽,进一步增加了荧光相对强度。对比图 4a 和图 4b, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双层光纤的总荧光相对强度远远高于掺 Yb^{3+} 光纤的,在抽运功率达到 70mW 时,图 4a 中荧光相对强度是 170000,图 4b 中仅为 3688 前者将近为后者的 46 倍。

3 结论

报道了单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双层光纤的上转换荧光现象,并将其与掺 Yb^{3+} 光纤在 974nm 抽运光作用下发出的绿色荧光进行了详细的对比实验研究,结果表明:单模双层光纤所发荧光仍然为 Er^{3+} 受激吸收产生, Yb^{3+} 只起能量传递的作用;相同抽运功率情况下,单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双层光纤所发出的荧光要明显远远大于掺 Yb^{3+} 光纤所发出的荧光,但掺 Yb^{3+} 光纤上转换荧光阈值低于单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双层光纤;对于单模 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双层光纤在抽运功率达到一定值后,其荧光只是随着抽运光的增强而迅速增强,光谱不存在展宽现象,但是掺 Yb^{3+} 光纤荧光强度不仅随着抽运光增强而增强,其光谱还存在不断展宽的现象。

参考文献

- [1] ZHENG Y L, ZHAO W, WANG X H, *et al*. The characters of femto second Er^{3+} doped fiber amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica* 2004 33 (3): 268-271 (in Chinese).
- [2] SMART R G, HANNA D C, TROPPER A C, *et al*. CW room temperature up conversion lasing at blue, green and red wavelengths in infrared pumped Pr^{3+} -doped fluoride fiber [J]. *Electron Lett* 1991, 27 (14): 1307-1309.

(下转第 662 页)

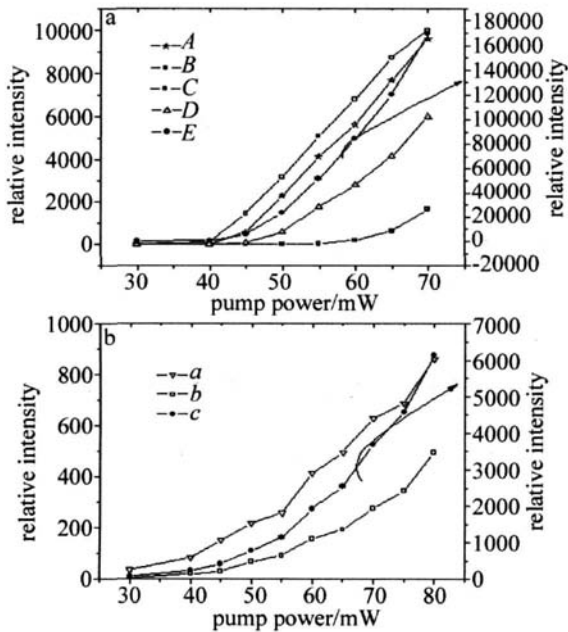


Fig 4 The fluorescence peak power curve along with the changing pump power
a— single mode double cladding $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber b— Yb^{3+} doped fiber

层光纤在 522nm, 532nm, 545nm 和 554nm 处荧光相对强度, 以及其总体相对强度随抽运功率变化曲线图, 图

- Photonics Technology Letters 2006, 18(4): 562-564.
- [2] W IBERG A, M LLAN P P, ANDRES M V, *et al* Fiber-optic 40GHz mm-wave link with 2.5Gbit/s data transmission [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2005, 17(9): 1938-1940
- [3] MA L L, LI G H. Polarized light expressed by Poincaré sphere [J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 302-303(in Chinese).
- [4] WANG G, LI K, KONG F M. Study of characteristics of polarization mode dispersion in single mode fibers with elliptical birefringence [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 465-468(in Chinese).
- [5] ATTYGALLE M, LM C, NIRMALATHAS A, *et al* Extending optical transmission distance in fiber wireless links using passive filtering in conjunction with optimized modulation [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(4): 1703-1709
- [6] O'REILLY J J, LANE P M, HEIDEMANN R, *et al* Optical generation of very narrow linewidth millimeter wave signals [J]. Electron Lett 1992, 28(25): 2309-2311.
- [7] YU J, JIA Z, YIL, *et al* Optical millimeter wave generation or up conversion using external modulators [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2006, 18(1): 265-267
- [8] YU J, JIA Z, XU L, *et al* DWDM optical millimeter wave generation for radio-over fiber using an optical phase modulator and an optical interleaver [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2006, 18(13): 1418-1420
- [9] NIRMALATHAS A, NOVAK D, LM C, *et al* Wavelength reuse in the WDM optical interface of a millimeter wave fiber wireless antenna base station [J]. IEEE Trans Microwave Theory & Tech, 2001, 49(10): 2006-2009.
- [10] YU J, GU J, JIA Z, *et al* Seamless integration of an 8 × 2.5Gbit/s WDM-PON and radio-over fiber using all-optical up conversion based on Raman-assisted FWM [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2005, 17(9): 1986-1988.
- [11] SMITH G H, NOVAK D, AHMED Z, *et al* Overcome chromatic dispersion effects in fiber wireless systems incorporating external modulators [J]. IEEE Trans Microwave Theory & Tech, 1997, 45(8): 1410-1415
- [12] QI G, YAO J, SEREGELYI J, *et al* Optical generation and distribution of continuously tunable millimeter wave signals using an optical phase modulator [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(9): 2687-2695
- [13] CHEN L, WEN H, WEN S C. A radio-over fiber system with a novel scheme for millimeter wave generation and wavelength reuse for up-link connection [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2006, 18(19): 2056-2058.

(上接第 641页)

- [3] KRUG P A, SCEAT M G, ATKINS G R. Intermediate excited state absorption in erbium-doped fiber strongly pumped at 980nm [J]. Opt Lett 1991, 16(24): 1976-1978
- [4] YANG L Z, DONG S F, ZHEN Y L, *et al* Green luminescence analysis of ytterbium-doped double clad silica fiber [J]. Acta Photonica Sinica 2003, 32(8): 911-913(in Chinese).
- [5] XIE C X, FU Y, ZHANG S M, *et al* High power Er³⁺/Yb³⁺ codoped fiber super fluorescent source [J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 34-36(in Chinese).
- [6] MA L N, HU Z L, HU Y M, *et al* Study on up conversion fluorescence of Er³⁺-doped fiber amplifier pumped at 980nm [J]. Chinese Journal of Lasers 2005, 32(11): 1464-1468(in Chinese).
- [7] BARNES W L, POOLE S B, TOWNSEND J E, *et al* Er³⁺/Yb³⁺ and Er³⁺ doped fiber lasers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology 1989, 7(10): 1461-1465. [8] MAGNE S, OUERDANE Y, DRUETTA M, *et al* Cooperative luminescence in an ytterbium-doped silica fiber [J]. Opt Commun, 1994, 111: 310-316.
- [9] KRIVANOV A V, MARTNEZ I L, KURKOV A S, *et al* Cooperative luminescence and absorption in ytterbium-doped silica fiber and the fiber nonlinear transmission coefficient at λ = 980nm with a regard to the ytterbium ion pairs' effect [J]. Optics Express 2006, 14(9): 3981-3992.