文章编号: 1002-2082(2010)03-0478-05

国产掺铥双包层光纤光谱特性研究

胡 辉[1,2], 杜戈果[1,2], 郭春雨[1,2], 闫培光[1,2], 刘国平[2], 高成彬[2], 阮双琛[1,2]
(1. 深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060;
2. 深圳大学 电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060)

摘 要: 对内包层截面为六边形的国产掺Tm^{3+}双包层光纤的光谱特性进行了较全面的实验研究。在1 064 nm 激光泵浦下, 观察到掺铥光纤发出明亮的蓝光, 对其上转换谱进行了测量, 并分析了产生的机理。在785 nm LD 泵浦下, 测量了光纤的荧光谱。选用3 种不同透过率的输出镜, 对长度分别为4.5 m 和2.2 m 的掺Tm^{3+}光纤实现了2 μm 波段的激光输出; 利用红外光谱仪测得了激光波长。实验获得最大输出功率达到5.1 W, 斜率效率41.9%, 并对实验结果做了分析。

关键词: 掺Tm^{3+}双包层光纤; 光纤激光器; 2 μm 激光; 频率上转换
中图分类号: TN 248 **文献标志码**: A

Spectral characteristics of domestic Tm-doped double cladding fiber

HU Hui[1,2], DU Ge-guo[1,2], GUO Chun-yu[1,2], YAN Pei-guang[1,2],
LIU Guo-ping[2], GAO Cheng-bin[2], RUAN Shuang-chen[1,2]
(1. Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering,
Shenzhen 518060, China; 2. College of Electronic Science and Technology,
Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Comprehensive researches of the spectral characteristics on the domestic Tm-doped double cladding fiber with hexagon inner cladding cross section are presented. When the fiber is pumped by 1 064 nm laser, the bright blue light is observed. The up-conversion spectra are measured and the mechanism is analyzed. The fluorescent spectra and the laser spectra are also measured when the fiber is pumped by a 785 nm LD. The fiber lasers operated at ~ 2 μm wavelength are obtained with three different output coupler mirrors and with two fiber lengths of 4.5 m and 2.2 m, respectively. The maximum output power is 5.1 W and the slope efficiency is 41.9%. The experiment results are analyzed.

Key words: thulium (Tm^{3+})-doped double cladding fiber; fiber laser; 2 μm laser; frequency up-conversion

引言

近年来, 光纤激光器由于具有效率高、光束质量好、可靠性好、结构紧凑等优点, 已经在通信、遥感、工业加工、军事等领域有着越来越广泛的应用[1-2]。2 μm 波段光纤激光器处于水分子吸收峰并且对人眼安全, 因此在外科手术具有巨大应用前景[3]。已有用2 μm 波段掺铥光纤激光器用于整形、美容等手术的报道。另外, 2 μm 波段掺铥光纤激光器在遥感、雷达以及作为3 μm~5 μm 光参量振荡的泵浦源等方面也有着重要的应用[4-5]。目前, 对于2 μm 波段掺铥光纤激光器的研究, 大多采用790 nm LD 作为泵浦源, 这是因为790 nm 处在

收稿日期: 2009-10-26; **修回日期**: 2010-02-02
基金项目: 深圳市科技局资助项目(200617)
作者简介: 胡辉(1985-), 男, 湖北广水人, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究工作。E-mail: neverhuhui@163.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Tm^{3+} 的最强吸收峰附近, 使得 Tm^{3+} 具有较高的吸收效率。另外, 大功率的790 nm LD 泵浦源也容易获得, 从而使获得高功率的2 μm 波段掺铥光纤激光器成为可能。铥离子能级丰富, 利用其频率上转换效应, 也可以获得480 nm, 650 nm 以及800 nm 波段激光输出, 已经有利用 Tm^{3+} 上转换效应来制作蓝光激光器的报道[6-7]。

本文运用1 064 nm 激光器对国产掺铥光纤进行泵浦, 获得了477 nm, 650 nm 以及804 nm 波段上转换谱, 并分析了光谱产生的原因; 运用790 nm LD 作为泵浦源, 测量了掺铥光纤的荧光特性, 利用不同输出透过率腔镜分别对长度为4. 5 m 和2. 2 m 的国产掺铥石英光纤进行了研究, 获得了2 μm 波段激光输出, 最大输出功率5. 1 W, 斜率效率41. 9%。

1　实验与结果分析

实验所用光纤为国产双包层掺 Tm^{3+} 光纤, 纤芯直径27. 5 μm, 数值孔径0. 2; 内包层直径400 μm, 数值孔径0. 46, 横截面为六边形。分别对长度为4. 5 m 和2. 2 m 的掺 Tm^{3+} 光纤进行了实验研究。

1. 1　上转换研究

采用1 064 nm 激光器泵浦国产掺铥光纤, 实验装置如图1 所示, 泵浦源最大输出功率为5 W, 输出激光为平行光, 通过一个透镜耦合进光纤; 输出光经过滤光片后进入光谱仪。滤光片对400 nm ～ 820 nm 光高透, 对910 nm～1 110 nm 光高反。在泵浦功率分别为2. 3 W 和5 W 时, 对长度2. 2 m 国产掺铥光纤上转换谱进行测量, 结果如图2 所示。实验过程中观察到了明显的蓝光输出。从图2 可以看出, 上转换荧光谱最强在804 nm 附近, 477 nm 次之, 650 nm 最弱, 并且随着泵浦功率的增加, 输出荧光呈增强的趋势。上转换过程发生的主要原理如图3 所示。

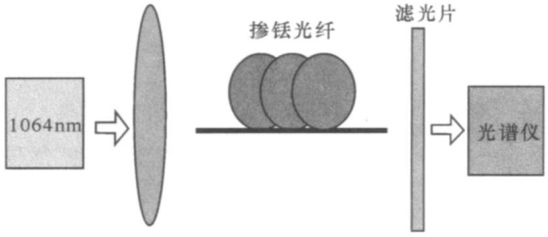

图1　上转换实验装置图

Fig. 1　Schematic diagram of up-conversion experiment

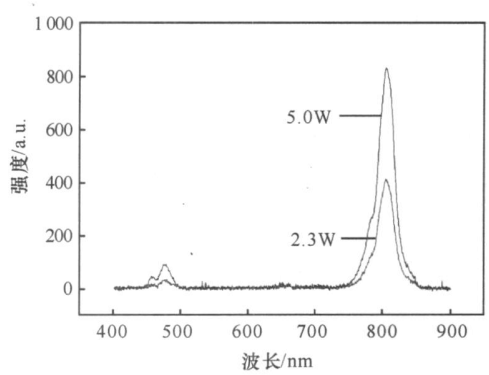

图2　不同泵浦功率下上转换实验光谱

Fig. 2　Up-conversion spectra in different pump powers

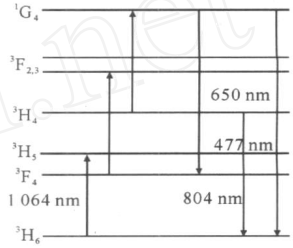

图3　Tm^{3+} 上转换过程示意图

Fig. 3　Schematic diagram of up-conversion process

一个基态粒子吸收一个泵浦光子后由 $^3H_6$ 跃迁到 $^3H_5$, $^3H_5$ 上的粒子不稳定, 会弛豫到 $^3F_4$, 然后再吸收一个泵浦光子跃迁到 $^3F_{2,3}$, $^3F_{2,3}$ 上的粒子同样不稳定, 会接着弛豫到 $^3H_4$ 上。处在 $^3H_4$ 能级上的粒子一部分会直接自发辐射到基态 $^3H_6$ 上, 同时发射波长804 nm 光子, 一部分会再吸收一个泵浦光子跃迁至 $^1G_4$ 能级上。由于 $^1G_4$ 能级上粒子极度不稳定, 会以自发辐射的方式向低能级跃迁, 其中一部分粒子会直接跃迁至基态 $^3H_6$, 同时发射波长477 nm 光子, 一部分会跃迁至 $^3F_4$ 能级, 同时发射波长650 nm 光子。实验过程中观察到明显的蓝光, 说明 Tm^{3+} 上转换效应较强。

1. 2　光纤激光器研究

对于2 μm 波段激光的获得, 本实验采用中心波长为785 nm 的LD 作为泵浦源, 一方面因为铥离子对785 nm 附近波段有较强的吸收效率, 另一方面是此种泵浦过程中会产生 $^3H_4$, $^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$, $^3F_4$ 能级之间交叉弛豫过程[8], 使得理论上的量子效率达到200%, 其具体原理分析如下: 如图4 所示, $^3H_6$ 的基态粒子吸收一个泵浦光子后会跃迁至 $^3H_4$ 能级, $^3H_4$ 能级上粒子不稳定, 自发辐射至 $^3F_4$ 能级。由于 $^3F_4$ 与 $^3H_4$ 之间能级差和 $^3F_4$ 与 $^3H_6$ 之间能级差非常接近, 因此 $^3H_4$ 能级上粒子弛豫至 $^3F_4$ 能级时

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

会把能量传递给一个基态粒子, 使得这个基态粒子也能跃迁至$^3F_4$能级, 即激光上能级, 从而使量子效率达到200%。但是由于上转换的存在, 激光器实际效率并未达到此值。

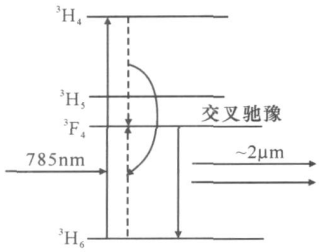

图4　掺铥石英光纤中交叉驰豫过程示意图

Fig 4　Schematic diagram of cross relaxation in Tm^{3+} doped silica fiber

1.2.1　光纤荧光谱

实验装置如图5所示。其中LD中心波长为785 nm, 最大输出功率25.6 W。耦合系统采用双透镜组合, 耦合效率为67%。实验先对两段光纤分别测试了荧光谱, 实验装置和图5类似, 只是去掉二色镜1, 二色镜2这时候起着对泵浦光过滤从而保护光谱仪的作用。结果如图6所示。

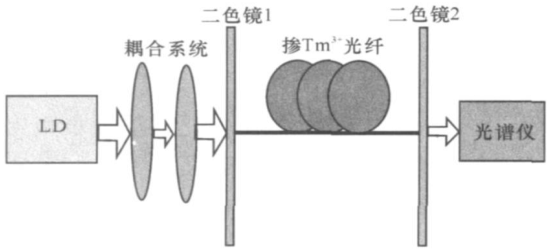

图5　2 μm 掺铥光纤激光器实验装置图

Fig 5　Schematic diagram of 2 μm Tm^{3+} doped fiber laser

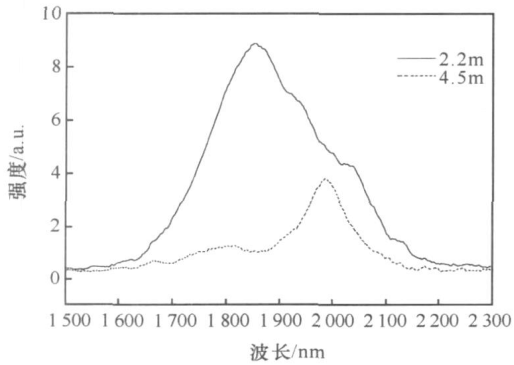

图6　不同长度下掺铥荧光谱

Fig 6　Fluorescence spectra of different fiber length

从图6可以看出, 掺铥光纤荧光谱范围很宽, 如果选择合适的谐振腔, 理论上可以获得1 650 nm～2 150 nm范围内的激光输出。同时, 2.2 m光纤荧光谱中心波长在1 850 nm附近, 4.5 m光纤荧光谱中心在1 979 nm附近, 由此可以看出, 光纤越短, 荧光谱中心波长向短波方向靠近。这是由于硅基质对短波长的光吸收更强所致, 因此长度越短, 短波长的光损耗越小, 荧光谱会向短波方向靠近。

1.2.2　激光器输出功率

谐振腔采用典型F-P腔, 其中, 二色镜1对1.9 μm～2.1 μm光高反, 反射率大于99%; 对泵浦光高透, 透过率大于90%。二色镜2分别使用3种不同透过率输出腔镜, 其一对泵浦光高反, 反射率大于99%, 对2 μm光透过率50%; 其二对泵浦光高反, 反射率大于98%, 对2 μm光透过率65%; 其三对泵浦光高反, 反射率大于98%, 对2 μm光透过率95%。

使用3种不同透过率腔镜, 对长度分别为4.5 m和2.2 m国产掺铥双包层光纤都获得激光输出, 所得实验结果如表1和图7所示。

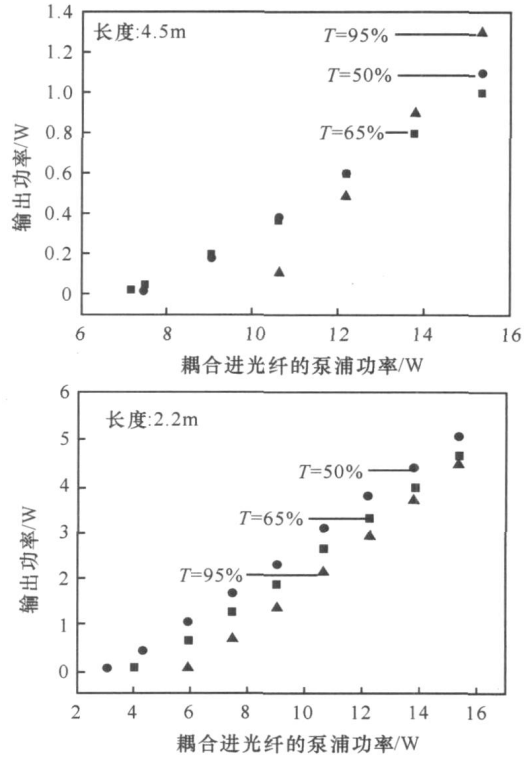

图7　不同光纤长度下的激光器实验结果

Fig 7　Experimental results with different fiber lengths

由实验结果可知, 输出镜透过率对激光的阈值功率、最大输出功率以及斜效率都有非常大的影响。透过率越大, 激光阈值功率越大, 斜效率相应也越大, 如果泵浦功率足够大, 所得激光输出功率也应越大。本实验由于泵浦功率的限制, 对于2.2 m

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

和4.5 m 光纤来说, 95% 透过率的输出镜情况下所得输出功率略小于其他两种情况, 但从实验结果曲线可知, 其仍有获得较大功率的趋势与潜力。对于长度为4.5 m 光纤, 50% 透过率和65% 透过率的情况在入纤功率不大时, 输出功率很接近, 这是因为光纤太长, 对输出激光吸收太大所致。对这两种光纤, 长度越长, 输出功率反而下降, 也是因为这个原因。本实验中, 透过率为 50% 的输出镜和长度为 2.2 m 是最佳选择, 无论其阈值还是输出功率都比其他几种情况好。

表1 对不同光纤长度、不同输出耦合镜实验结果比较

Table 1 Comparison of experiment results with different fiber length and output coupler mirrors

	光纤长度4.5 m			光纤长度2.2 m		
	阈值/W	输出功率/W	斜率效率/%	阈值/W	输出功率/W	斜率效率/%
腔镜1, T = 50%	7.5	1.1	14.6	3.1	5.1	41.9
腔镜2, T = 65%	7.2	1	12.7	4.0	4.7	42.2
腔镜3, T = 95%	10.6	1.3	24.8	5.9	4.5	47.3

1.2.3 激光光谱

实验过程中也分别对不同光纤长度下激光光谱(如图8 所示)进行了测量。对于激光谱, 4.5 m 光纤, 输出波长2.027 μm, 线宽2.47 nm; 对2.2 m 光纤, 输出波长2.001 μm, 线宽2.78 nm。由此可见, 光纤长度越长, 输出波长越长。这和不同长度光纤, 其荧光谱的中心波长差异一致。造成光纤长度不同, 荧光谱中心波长不同, 且输出激光波长也不同的主要原因是: 1.8 μm～2.1 μm 波段正好处于水分子的一个吸收峰, 且在1.93 μm 以后, 水分子的吸收系数随着波长的增加而减小, 如图9 所示。硅基光纤中存在一定数量的OH^- 离子, 光纤长度越长, 光纤对短波长的激光吸收相对要大, 因此长波长的激光更容易形成振荡, 输出激光。

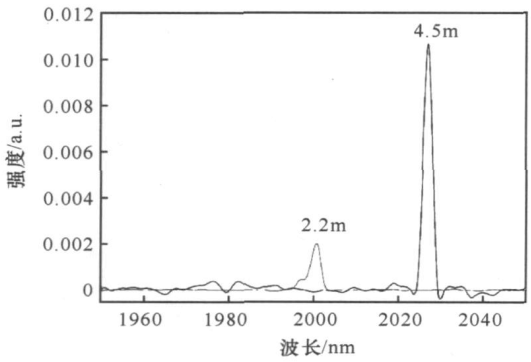

图8 不同光纤长度下输出波长

Fig. 8 Output wavelength of different fiber lengths

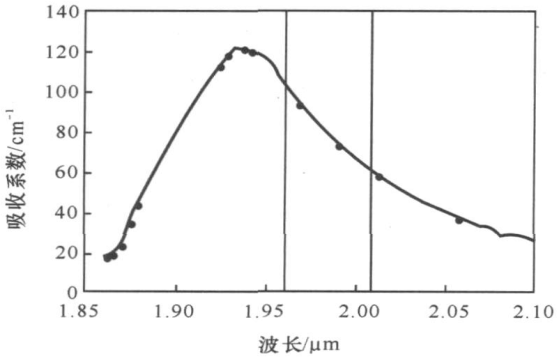

图9 水在1.8 μm～2.1 μm 处吸收曲线[9]

Fig. 9 Absorption coefficient curve of water in 1.8 μm～2.1 μm[9]

另外, Tm^{3+} 在硅基光纤中的吸收截面随着激光波长的增加而减小[10], 并且光纤越长, 对短波长的光自吸收增加, 输出波长相对越长, 与文献[11]报道的结果相一致。

2 结论

本文对国产掺Tm^{3+} 双包层光纤的光谱特性进行了较全面的研究。测量了1 064 nm 泵浦下的上转换谱, 并深入分析了其产生的机理; 使用785 nm LD 泵浦源, 获得了～2 μm 激光器最大输出功率5.1 W, 斜率效率41.9%; 讨论了不同光纤长度以及不同透过率输出镜对激光器输出功率的影响, 以及光纤长度对输出激光波长的影响。

参考文献:

[1] 黎大军. 掺铥双包层光纤激光器的研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2007: 1-6.
LI Da-jun. Research of thulium-doped silica double-cladding fiber laser [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2007: 1-6. (in Chinese)

[2] 夏林中, 杜戈果, 阮双琛, 等. 包层泵浦的高功率掺铥光纤激光器[J]. 光子学报, 2008, 37(6): 1089-1092.
XIA Lin-zhong, DU Ge-guo, RUAN Shuang-chen, et al. Cladding-pumped Tm^{3+}-doped silica fiber laser with high output power and good beam quality[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(6): 1089-1092. (in

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Chinese with an English abstract)

[3] DU Ge-guo, LI Da-jun, ZHANG Min, et al. LD-pumped 6W cw Tm^{3+}-doped silica double-cladding fiber laser[J]. Chinese Physics Letters, 2008, 25(3): 957-959.

[4] BARNES N P, WALSH B M, REICHLE D J, et al. Tm: fiber lasers for remote sensing[J]. Optical Materials, 2009(31): 1061-1064.

[5] CREEDEN D, KETTERIDGE P A, BUDNI, et al. Mid-infrared $ZnGeP_2$ parametric oscillator directly pumped by a pulsed 2 μm Tm-doped fibre laser[J]. Optics Letters, 2008, 33(4): 315-317.

[6] BOOTH I J, MACKECHNIE C J, VENTRUDO B F. Operation of diode laser pumped Tm^{3+} ZBLAN upconversion fiber laser at 482 nm[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1996, 32(1): 118-123.

[7] TALAVERA D V, MEJIA E B. Blue up-conversion Tm^{3+}-doped fiber laser pumped by a multiline Raman source[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(5): 053102-053105.

[8] FRITH G P, LANCASTER D G. Power scalable and efficient 790 nm pumped Tm^{3+}-doped fibre lasers[J]. SPIE, 2006, 6102: 1-10.

[9] PANKRATOV M M, PERRAULT D F, SHAPSHAY S M. Comparative laser-tissue interaction effects at 1.96 and 2.01 μm of Cr; Tm: YAG laser[J]. SPIE, 1992, 1646: 30-41.

[10] JACKSON S D, KING T A. Dynamics of the output of heavily Tm-doped double-clad silica fiber lasers[J]. Optical Society of America, 1999, 16(12): 2178-2188.

[11] HANNA D C, PERCIVAL R M, SMART R G, et al. Efficient and tunable operation of a Tm-doped fibre laser[J]. Optics Communications, 1990, 75(3-4): 283-286.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net