

Tm³⁺:Ho³⁺ 共掺石英光纤激光器的实验研究*

董淑福^{1,2} 陈国夫¹ 王贤华¹ 于连君¹ 赵卫¹ 王屹山¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所,瞬态光学技术国家重点实验室,西安 710068)

(2 空军工程大学电讯工程学院,西安 710077)

摘要 用铽钬共掺石英光纤,在钛宝石激光泵浦下,获得了波长为 1870 nm、最大功率为 240 mW 的单模激光输出,斜率效率接近 31%。这是目前用该类光纤获得的最高转换效率。研究了输出激光功率、输出光谱随泵浦功率、激活光纤长度的变化关系,并对相应结果进行了分析。

关键词 铽钬共掺光纤;光纤激光器;红外激光;光纤激光理论

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

近年来,人们对稀土掺杂光纤激光器与放大器显示出非常浓厚的兴趣。在可见光尤其是近红外区的光纤激光的产生与放大已取得了巨大进展并获得广泛应用。对于波长 2~3 μm 的中红外激光,由于它在医疗和眼睛安全激光雷达中的潜在性能一直吸引着人们的注意力。Ho³⁺ 已被作为 2 μm 波长区域各种不同基质中激光的激活离子而广为研究^[1-5],而掺钬石英光纤激光器是研制波长为 2 μm 的紧凑、高效全固体激光源的最有前途的候选者^[4,6]。

但是,在单掺 Ho³⁺ 的硅质玻璃中,由于无辐射跃迁占据主导地位,激光产生效率比较低^[1,4]。在 800 nm 区域缺乏泵浦带是单掺 Ho³⁺ 系统的另外一个不利因素。2000 年,俄罗斯的 Kurkov A. S. 等人报道了用 1.15 μm 的掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器泵浦单掺 Ho³⁺ 的石英光纤,在入纤泵浦功率为 2 W 时,获得了 280 mW 的激光输出,斜率效率为 20%。实验中采用高性能的光纤布喇格光栅作为输入耦合器^[6]。

为了充分利用掺钬石英光纤的种种优点而避免其不足,有人提出采用加入敏化剂的方法^[7,8],这样不但可以提高激光效率,并且允许与某特定掺杂成份相匹配的泵浦波长来激励。目前,最为大家采用的是 Tm-Ho 共掺石英光纤。在不同的泵浦激光(800 nm 带和 1064 nm 带)抽运下,获得了输出功率为几 mW、十几 mW 到最大 71 mW 的 2 μm 带激光输出^[7-10]。

1 工作机理

图 1 为简化的 Tm-Ho 共掺系统的能级及跃迁

图^[8,10]。在波长约为 790 nm 的泵浦光子激发下, Tm³⁺ 被从³H₆ 基态激发到³F₄ 能级。当 Tm³⁺ 的浓度足够高时,在相邻的二个 Tm³⁺ 之间交叉弛豫就可能发生。这样,一个 Tm³⁺ 从³F₄ 能级弛豫到³H₄ 能级,同时将另外一个 Tm³⁺ 从基态³H₆ 能级激发到³H₄ 能级。处于³H₄ 能级的 Tm³⁺ 与处于⁵I₈ 基态的 Ho³⁺ 交换能量,将 Ho³⁺ 激发到⁵I₇ 能级而自己返回到基态,从而使 Ho³⁺ 在⁵I₇ 激发态和⁵I₈ 基态之间实现集居数反转,通过受激辐射产生激光。

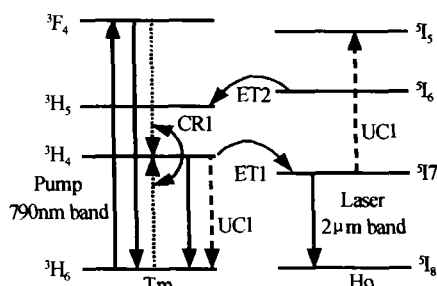


图 1 Tm-Ho 共掺石英光纤系统能级跃迁
Fig. 1 Schematic energy level diagram of Tm-Ho co-doped silica fiber system

可见,与单掺 Ho³⁺ 系统相比,将高浓度的 Tm³⁺ 与 Ho³⁺ 共掺可以获得 200% 的理论泵浦量子效率,从而提高了斜率效率。在氟化物玻璃光纤中,Tm-Ho 共掺激光器的斜率效率和量子效率分别为 52% 和 1.3^[11]。在石英玻璃基质中,由于在红外区中非辐射衰落占优势,Tm-Ho 共掺系统的泵浦量子效率要比氟化物玻璃基质低,Tm-Tm 交叉弛豫过程以及从 Tm 到 Ho 的能量转移过程必须分别与 Tm³⁺ 的³F₄ 和³H₄ 能级的快速非辐射及辐射衰落进行竞争。

2 实验方案

实验中所用的光纤是由加拿大国家光学研究所 (INO) 制造的 TH520 铽钬共掺石英单模光纤,其纤芯成份为:0.158 mol% Tm₂O₃, 0.027 mol% Ho₂O₃, 8.68 mol% Al₂O₃, 1.35 mol% GeO₂, 3.40 mol%

*国家自然科学基金(批准号:60007003,60137010)资助项目
Email:shufudong@163.com
收稿日期:2003-04-04

P₂O₅ 以及 86.38 mol% SiO₂. 按照这一成份, 可以计算 Tm³⁺ 和 Ho³⁺ 的浓度分别为 6.18 × 10²⁵ m⁻³ (~8000 ppmw) 和 1.05 × 10²⁵ m⁻³ (~1300 ppmw). 纤芯直径和数值孔径分别为 8.5 μm 和 0.15, 因此单模截止波长为 1.67 μm. TH520 光纤的吸收谱如图 2 所示.

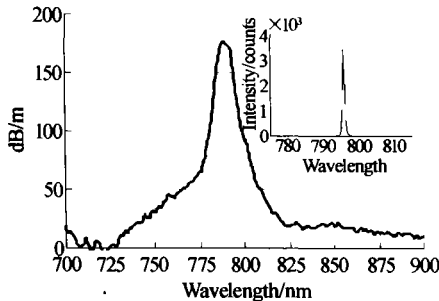


图 2 TH520 铥钬共掺单模石英光纤的吸收谱及 Ti:S 激光器的发射谱

Fig. 2 Absorption spectrum of TH520 Tm-Ho co-doped single mode silica fiber. The insert is the emission spectrum of the Ti:S laser

实验中所用的泵浦源为自行研制的连续波高性能钛宝石 (Ti:S) 激光器, 如图 3 上半部所示. Ti:S 晶体 3 mm 厚, 凹面镜曲率半径为 50 mm, 腔型为等臂长 (300 mm) Z 型折叠腔, 半折叠角为 8.67° 以实现像散补偿. 在波长为 532 nm、最大输出功率为 10 W 的 Nd:YVO₄ 固体激光器泵浦下, 获得了中心波长为 796 nm、最大功率可达 2W 的圆对称单模激光 (腰斑半径小于 200 μm), 其输出谱如图 2 中小图所示. 然后用该高性能激光去泵浦 Tm-Ho 共掺石英单模光纤.

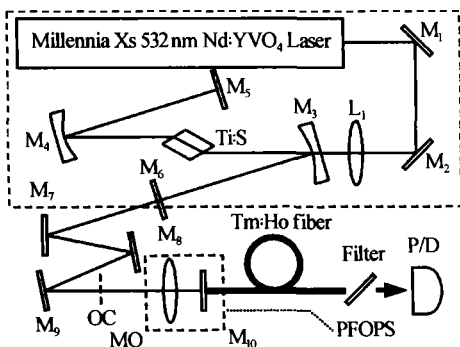


图 3 钛宝石泵浦的 Tm-Ho 共掺石英光纤激光器的实验装置
Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup of the Ti:S-pumped Tm-Ho co-doped silica fiber laser

对于 Tm-Ho 共掺石英光纤激光器的激光腔结构, 采用传统的法布里-泊罗 (F-P) 型腔, 如图 3 所示. 从钛宝石激光器输出的光束经耦合透镜 MO 和输入二色镜 M₁₀ 聚焦到 Tm:Ho 共掺光纤输入端面, 该输入镜在波长 1.82 ~ 2.04 μm 具有大于 91% 的反射率, 对波长 790 ~ 830 nm 的泵浦光具有 90% 以上的传输系数, 如图 4 所示. 并且 Tm:Ho 共掺硅光纤的输入端要紧靠输入镜, 以提高泵浦光的耦合效率和

激光的反馈效率. 以 Tm:Ho 共掺光纤的输出端面 (用精密光纤切割刀制作) 作为输出耦合镜 M₂, 它具有 4% 的非涅尔反射. 利用 10 倍高性能显微物镜进行耦合, 整体耦合效率达到 75% 以上. 输出激光经滤波后用美国光谱物理的 407A 功率计 (吸热式) 测量功率, 用 PbS 光电探测器、WDG500-1A 型光栅单色仪及机械斩波器等测量光谱.

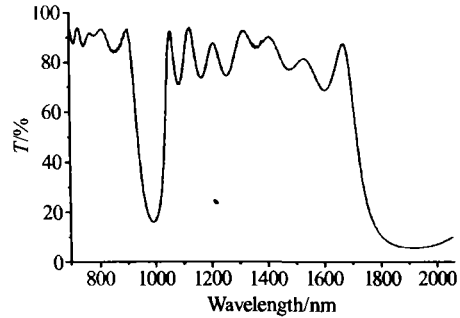


图 4 Tm-Ho 共掺光纤激光器的前腔镜的透过率
Fig. 4 Transmission co-efficient of the front mirror of the Tm-Ho fiber laser

3 实验结果

图 5 是利用不同长度的 Tm-Ho 共掺石英光纤获得的输出功率随泵浦功率的变化曲线. 其中, 当光纤长度为 52 cm 时, 在 1.4 W 的激光泵浦下 (相应的 Ti:S 泵浦功率为 7 W、入纤功率约为 1.05 W), 获得了功率为 240 mW 的激光输出, 激光泵浦阈值为 370 mW, 输出斜率效率为 30.86%; 当采用更长或更短的光纤时, 激光输出功率都下降. 图 6 为用 PbS 光电探测器及光栅单色仪等测量的 Tm-Ho 共掺光纤激光器的输出光谱, 光纤长为 53.5 cm, 输出功率为 130 mW (泵浦功率为 1 W). 可见, 中心波长约在 1870 nm, 输出谱宽小于 3 nm. 当增大或降低泵浦功率时, 输出波长相应的向长波长或短波长方向移动, 变化系数约为 0.007 nm/mW; 当改变激活光纤的长度时, 输出激光波长随光纤长度的增加而稍向长波长方向移动.

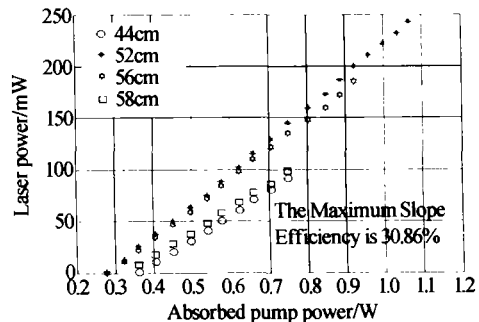


图 5 Tm-Ho 共掺石英光纤激光器输出激光功率随泵浦功率的变化

Fig. 5 The measured output power from the Ti:S-pumped Tm-Ho co-doped silica fiber laser as a function of launched pump power for different fiber lengths

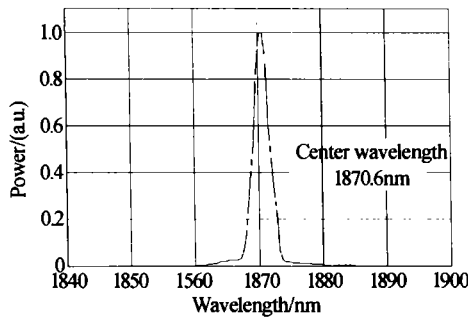


图6 Tm-Ho 共掺光纤激光器的输出光谱

Fig. 6 Output laser spectrum of the Ti:S-pumped Tm-Ho co-doped silica fiber laser

4 结论

采用Tm-Ho共掺石英单模光纤,在波长为796 nm的Ti:S激光泵浦下,获得了波长为1870 nm的高性能单模激光输出,斜率效率接近31%。这远远高于国际上采用同类光纤获得的实验结果。这也是国内用稀土光纤在中红外区域获得的最高功率。从测得输出激光的光谱来看,该振荡光的产生应归功于 Tm^{3+} 在 $^3\text{H}_4$ 到 $^3\text{F}_6$ 能级的跃迁,这与有关 Tm^{3+} 在红外区的荧光谱及激光谱是一致的^[8,12],而对于 Ho^{3+} ,其激励波长基本在 $2\ \mu\text{m}$ 左右^[6~8,10]。分析认为,导致这一结果的原因可能有以下几个方面:

1) 在Tm-Ho共掺光纤中,从 Tm^{3+} 的 $^3\text{H}_4$ 能级到 Ho^{3+} 的 $^5\text{I}_8$ 能级的能量转移必须与 Tm^{3+} 的激发态吸收(ESA)及荧光辐射进行激烈竞争,这正是Tm-Ho共掺系统的弱点;

2) 实验中所用的二色镜在 $2\ \mu\text{m}$ 带的反射系数不够高,反射带宽比较窄,如图4所示,这使得从 Tm^{3+} 到 Ho^{3+} 的能量转移以及进一步的在 $^5\text{I}_7$ 能级到 $^5\text{I}_8$ 能级间产生辐射,相对于 Tm^{3+} 的 $^3\text{H}_4$ 能级到 $^3\text{F}_6$ 能级的跃迁过程不占优势

3) 实验中所用的Tm-Ho共掺石英单模光纤的长度偏短,不利于从 Tm^{3+} 到 Ho^{3+} 的高效能量转移;

4) 实验中所用的Tm-Ho共掺石英单模光纤中 Tm^{3+} 与 Ho^{3+} 的浓度比偏低(约为6.2:1),因此,难以激励足够多的 Ho^{3+} 以达到激光跃迁阈值。

参考文献

- Gandy H W, Ginther R J. Stimulated emission from holmium activated silicate glass. *Proc IRE*, 1962, **50**: 2113 ~ 2114
- Allen R, Esterowitz L, Goldberg L, et al. Diode-pumped $2\ \mu\text{m}$ holmium laser. *Electron Lett*, 1986, **22**(18): 947
- Brierley M C, France P W, Millar C A. Lasing at $2.08\ \mu\text{m}$ and $1.38\ \mu\text{m}$ in a holmium doped fluoro-zirconate fiber laser. *Electron Lett*, 1988, **24**(9): 539 ~ 540
- Hanna D C, Percival R M, Smart R G, et al. Continuous-wave oscillation of holmium-doped silica fiber laser. *Electron Lett*, 1989, **25**(9): 593 ~ 594
- Wetenkamp L. Efficient CW operation of a $2.9\ \mu\text{m}$ Ho^{3+} -doped fluorozirconate fiber laser pumped at 640 nm. *Electron Lett*, 1990, **26**(13): 883 ~ 884
- Kurkov A S, Dinov E M, Medvekov O I, et al. Efficient silica-based Ho^{3+} fiber laser for $2\ \mu\text{m}$ spectral region pumped at $1.15\ \mu\text{m}$. *Electron Lett*, 2000, **36**(12): 1015 ~ 1016
- Ghisler C, Luthy W, Weber H P, et al. A Tm^{3+} sensitized Ho^{3+} silica fiber laser at $2.04\ \mu\text{m}$ pumped at 809 nm. *Optics Comm*, 1994, **109**: 279 ~ 281
- Oh K, Morse T F, Kilian A, et al. Continuous-wave oscillation of thulium-sensitized holmium-doped silica fiber laser. *Opt Lett*, 1994, **19**(4): 278 ~ 280
- Ghisler C, Luthy W, Weber H P. Cladding-pumped of a $\text{Tm}^{3+}:\text{Ho}^{3+}$ silica fiber laser. *Optics Comm*, 1996, **132**: 474 ~ 478
- Jackson S D, King T A. CW operation of a $1.064\ \mu\text{m}$ pumped Tm-Ho-doped silica fiber laser. *IEEE J Quantum Electron*, 1998, **34**(9): 1578 ~ 1587
- Allain J Y, Monerie M, Poignant H. High-efficiency CW thulium-sensitized holmium-doped fluoride fiber laser operating at $2.04\ \mu\text{m}$. *Electron Lett*, 1991, **27**(21): 1513 ~ 1515
- Jackson S D, King T A. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers. *J Lightwave Technology*, 1999, **17**(5): 948 ~ 956

Experimental Researches on $Tm^{3+} : Ho^{3+}$ Co-doped Silica Fiber Lasers

Dong Shufu^{1,2}, Chen Guofu¹, Wang Xianhua¹, Yu Lianjun¹, Zhao Wei¹, Wang Yishan¹

1 State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shannxi, P. R. China 710068

2 Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shannxi, P. R. China 710077

Received date:2003-04-04

Abstract Solid-state lasers oscillating at the mid-infrared spectral regions have been of interest for its specific applications such as laser surgery and eye - safe lidar . The experimental results of a Ti : S - pumped CW - operation Tm:Ho co-doped single-mode silica fiber laser emitting at the 1.9 μm band are reported. The maximum output power of 240 mW is achieved at an absorbed pump power of 1.05 Watt at 796 nm. The slope efficiency is near 31% , which is the highest conversion coefficient to our knowledge. Relations between the measured output power or spectrum from the Ti:S-pumped Tm-Ho co-doped silica fiber laser and the launched pump power for different fiber lengths are also researched. Conclusions can be drawn that the resulted wavelength may mainly due to the property of the dichroic mirror.

Keywords Tm-Ho co-doped fiber; Optical fiber lasers; Infrared lasers; Optical fiber lasers theory



Dong Shufu was born in 1971, in Qingdao, China. He received the B. S. degree in optical fiber communication and M. S. degree in communication & electronics from Air-force Telecommunication Engineering Institute, China, in 1994 and 1997, respectively. He is now an associate professor in Air Force Engineering University and also a Ph. D. candidate in the State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, where he is engaged in research of optical fiber lasers & amplifiers. His interests cover optical communication system and devices, especially the optical fiber lasers & amplifiers.