

## 新型高掺铥硅酸盐玻璃光纤及其光纤激光的研究

张钧翔<sup>1,2</sup>, 史伟<sup>1,2,3</sup>, 史朝督<sup>1,2</sup>, 房强<sup>3,4</sup>, 付士杰<sup>5</sup>, 盛泉<sup>1,2</sup>, 朱秀山<sup>5</sup>, Peyghambarian N<sup>5</sup>, 姚建铨<sup>1,2</sup>

1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 天津 300072;
2. 天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;
3. 山东海富光子科技股份有限公司, 山东威海 264209;
4. 天津欧泰激光科技有限公司, 天津 300384;
5. 亚利桑那大学光学科学学院, 美国亚利桑那州 85721)

**摘要:** 具有高稀土离子掺杂浓度的有源光纤一直以来是高性能单频光纤激光器的核心, 选用硅酸盐玻璃材料制作高掺杂有源光纤可以有效提升光纤增益。通过高温熔融工艺制备了铥离子掺杂浓度为 8 wt.% 的高掺杂硅酸盐玻璃, 测试了其光谱特性和荧光寿命, 并根据 McCumber 理论计算玻璃的受激发射截面。采用管棒法制备光纤预制棒, 拉制出尺寸为 7/125  $\mu\text{m}$  的高掺铥硅酸盐玻璃光纤。基于低损耗的异质光纤熔接, 测试了该光纤的增益特性, 并分别采用 2 cm 和 8 cm 的新型掺铥光纤搭建线形腔光纤激光器, 获得百毫瓦的 1950 nm 激光输出。研究表明, 在 8 wt.% 的高浓度掺杂下, 铥离子在文中的新型硅酸盐光纤基质中具备良好的发光能力, 这种国产高掺杂玻璃光纤在实现高性能单频光纤激光器方面具有明显优势。

**关键词:** 高掺铥硅酸盐玻璃光纤; 受激发射截面; 荧光寿命; 线形腔光纤激光器

**中图分类号:** TN244      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20200424

## Research of novel highly thulium-doped silicate glass fiber and related fiber lasers

Zhang Junxiang<sup>1,2</sup>, Shi Wei<sup>1,2,3</sup>, Shi Chaodu<sup>1,2</sup>, Fang Qiang<sup>3,4</sup>, Fu Shijie<sup>5</sup>, Sheng Quan<sup>1,2</sup>,  
Zhu Xiushan<sup>5</sup>, Peyghambarian Nasser<sup>5</sup>, Yao Jianquan<sup>1,2</sup>

1. Institute of Laser & Opto-electronics, School of Precision Instrument & Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. HFB Photonics Co., Ltd., Weihai 264209, China;
4. Tianjin Optera Laser Technology Co. Ltd., Tianjin 300384, China;
5. College of Optical Science, University of Arizona, Arizona 85721, USA)

**Abstract:** Active fiber with high rare earth ion doping concentration has always been the key component of high-performance single-frequency fiber lasers, and silicate glass can be used to fabricate highly doped active fibers with excellent unit gains. Here, highly doped silicate glass with the thulium ion doping concentration of 8 wt.% was prepared by a high-temperature melting process, and its spectral characteristics and fluorescence lifetime were measured. Based on McCumber theory, the emission cross section of the glass was calculated. By

收稿日期:2020-11-04; 修订日期:2020-12-02

基金项目:国家重点研发计划(2017YFF0104603); 山东省重点研发计划(2017CXCC0808, 2019JZZY020206)

作者简介:张钧翔,男,博士生,主要从事特种光纤及单频光纤激光器方面的研究工作。

导师简介:史伟,男,教授,博士生导师,博士,主要从事高性能光纤激光器、非线性光学和太赫兹光子学方面的研究工作。

the method of rod-in-tube, fiber preforms were prepared, and then the highly thulium-doped silicate glass fiber of 7/125  $\mu\text{m}$  was drawn. Based on low-loss specialty fiber fusion splicing, the fiber unit gain was measured, and linear-cavity fiber lasers based on 2 cm and 8 cm novel thulium-doped fibers were investigated, where 1950 nm laser output of hundred-milliwatt-level power was obtained. This work has shown that under such a high doping concentration of 8 wt.%, which is the highest thulium doping concentration to date, thulium ions still have good luminescence properties in this novel glass host. The homemade highly thulium-doped glass fiber in this paper can be used to fabricate high performance single-frequency fiber lasers.

**Key words:** highly thulium-doped silicate glass fiber; emission cross section; fluorescence lifetime; linear-cavity fiber laser

## 0 引言

基于掺铥光纤的高性能光纤激光器可广泛应用于频率梳计量、环境传感、人眼安全的激光雷达、空间通信等领域。近年来,随着掺铥石英光纤组分、结构和制备工艺的优化和改善,光纤的掺杂浓度已经有了一定的提升,基于商用掺铥石英光纤已经实现了布拉格反射型 (Distributed Bragg Reflector, DBR) 短腔单频激光器<sup>[1]</sup>。但是,铥离子在石英玻璃中溶解度较低,通常需要在石英玻璃中大量共掺铝 (Al) 等元素来提高铥离子的溶解度,而这些元素的高掺杂会导致光纤的纤芯折射率大幅增加,使得光纤的数值孔径 (Numerical Aperture, NA) 增大,造成输出激光的光束质量下降。因此石英光纤在高掺杂情况下,通常需要额外的光纤微结构来保证有源光纤的单模特性<sup>[2]</sup>。

相比于石英玻璃,熔点较低的氧化物玻璃材料具有更疏松的网络结构,可掺杂更高浓度的稀土离子。近年来,锗酸盐、磷酸盐、碲酸盐、硅酸盐等氧化物玻璃材料逐渐被研究人员用来制作高掺杂有源光纤<sup>[3]</sup>。其中,硅酸盐光纤具有优良的物化特性,例如无毒、不易潮解、较高的机械强度和损伤阈值等。并且,在氧化物玻璃材料中,硅酸盐与石英的结构相似度最高,使得硅酸盐光纤和石英光纤更容易实现高质量熔接,因此硅酸盐光纤有着其他氧化物光纤不可替代的优势。澳大利亚麦考瑞大学的 S. D. Jackson 课题组和英国南安普顿大学的 W. A. Clarkson 课题组研究制备了多种掺铥硅酸盐光纤,并用于脉冲光纤激光器<sup>[4]</sup>、连续波单频光纤激光器<sup>[5]</sup>、高效同带泵浦光纤激光器<sup>[6]</sup>等研究中,获得了优良的实验成果。近年来,国内高掺杂硅酸盐光纤及其光纤激光的研究渐成热点,优化玻璃基质的组分和制备工艺,提高稀土离子在硅酸盐

基质中的掺杂水平并制作出高增益的有源光纤,具有重大研究意义和应用价值。

目前高掺杂氧化物玻璃光纤中铥离子的浓度通常为 5 wt.%, 最高掺杂浓度为 7 wt.%<sup>[3,7]</sup>。文中在已报道的铥离子掺杂浓度基础上,通过组分和工艺优化,进一步提高铥离子掺杂浓度到 8 wt.%, 探究该高掺铥硅酸盐玻璃的发光特性以及有源光纤的性能。基于研制的新型高掺杂硅酸盐光纤搭建了 DBR 型光纤激光器,通过 2 cm、8 cm 的掺铥光纤分别获得了 79 mW 和 166 mW 的 1950 nm 窄线宽激光输出,验证了该国产新型光纤的优良增益特性。

## 1 掺铥硅酸盐玻璃的制备和表征

硅酸盐玻璃的摩尔组成为  $40\text{SiO}_2-20(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-20(\text{CaO}+\text{BaO})-20(\text{ZnO}+\text{B}_2\text{O}_3)$ , 纤芯玻璃掺杂的  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  浓度为 8 wt.%。选用分析纯的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{BaO}$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3$ , 以及纯度为 99.999% 的  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  制备硅酸盐玻璃。所需的化学原料经称量后均匀混合,放在坩埚中随炉子升温至 1600  $^\circ\text{C}$  高温熔融,并在高温阶段保温一段时间,随后让坩埚随炉子冷却到 1400  $^\circ\text{C}$ , 并将坩埚里的玻璃液浇筑在模具上固化成玻璃块,将玻璃块放到退火炉中冷却至室温后取出。制作出的硅酸盐纤芯玻璃和包层玻璃如图 1 所示,由于纤芯玻璃中  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  浓度较高,玻璃呈现出淡黄绿色。

纤芯玻璃经过研磨抛光,制得尺寸为  $15\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 2\text{ mm}$  的玻璃试样进行光谱测试和寿命测试。采用 Perkin Elmer 公司的 Lambda-900 UV-VIS-NIR 分光光度计可获得掺铥玻璃在 500~2 000 nm 范围内的吸收光谱,进而掺铥硅酸盐玻璃的吸收截面  $\sigma_a$  可由公式 (1) 得到<sup>[8]</sup>:

$$\sigma_a = \frac{2.303OD(\lambda)}{Nd} \quad (1)$$

式中:  $OD(\lambda)$  代表光密度, 其数值可由分光光度计测量结果直接读出;  $d$  代表玻璃样品的厚度;  $N$  代表玻璃样品中铥离子的掺杂浓度, 其计算公式如下:

$$N = \frac{2w\rho N_A}{(1+w)M} \quad (2)$$

式中:  $w$  代表玻璃样品中  $Tm_2O_3$  的质量分数;  $\rho$  代表玻璃样品的密度;  $N_A$  为阿伏伽德罗常量;  $M$  代表  $Tm_2O_3$  的摩尔质量。采用排水法测试出玻璃的密度为  $3.688 \text{ g/cm}^3$ , 因此铥离子的掺杂浓度为  $8.52 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ , 代入公式 (1) 可求出玻璃的受激吸收截面, 如图 2 所示。在  $500 \sim 2000 \text{ nm}$  波长范围内观测到四个吸收峰, 对应波长分别为 680、789、1207、1639 nm, 分别对应着铥离子的由基态能级  $^3H_6$  向激发态能级  $^3F_{2,3}$ 、 $^3H_4$ 、 $^3H_5$ 、 $^3F_4$  的跃迁。玻璃样品在  $500 \sim 2000 \text{ nm}$  范围内的主吸收峰在 1207 nm 处, 对应的受激吸收截面大小为  $6.8 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ , 第二吸收峰 789 nm 处的受激吸收截面大小为  $4.4 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ , 这与石英玻璃基质下铥离子在两波长处的吸收强弱有较大差异<sup>[9]</sup>, 但符合硅酸盐玻璃基质中铥离子的吸收特性<sup>[10-11]</sup>。玻璃样品在 1207 nm 的强吸收峰对应着  $^3H_6 \rightarrow ^3H_5$  的泵浦方式, 在利用该波长泵浦时, 铥离子  $^3H_4$  和  $^3F_4$  能级的能量上转换效应将导致上能级粒子先后跃迁到  $^3F_{3,2}$  能级和  $^1G_4$  能级, 有望产生 800 nm 红外光和 470 nm 蓝光。样品  $1.6 \mu\text{m}$  的吸收带呈现出双峰的结构, 主峰位于 1639 nm, 次峰位于 1720 nm。在常用泵浦波长 1570 nm 处, 样品的受激吸收截面为  $0.6 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。

利用 Edinburgh Instruments FLS 980 光谱仪测量

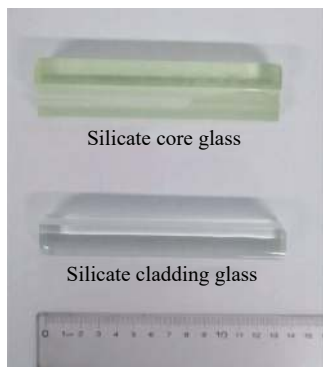


图 1 制备的硅酸盐纤芯玻璃和包层玻璃

Fig.1 Fabricated silicate core glass and cladding glass

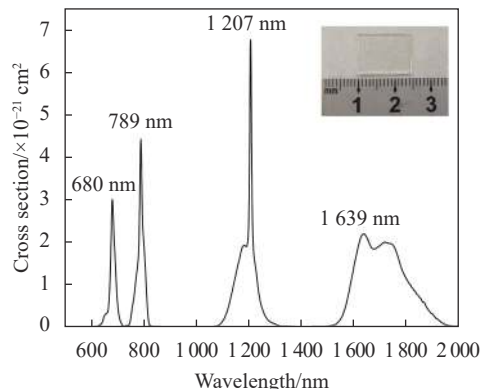


图 2 掺铥硅酸盐玻璃的受激吸收截面 (插图: 测试用的掺铥硅酸盐玻璃试样)

Fig.2 Absorption cross section of Tm-doped silicate glass (Inset: the tested Tm-doped silicate glass)

样品的发射光谱和荧光寿命。选用 790 nm 激光进行泵浦, 测量了样品在  $1500 \sim 2400 \text{ nm}$  范围内的发射光谱。根据 McCumber 理论, 在满足稀土离子的能级寿命大于其能级多组态建立热平衡的时间这一前提下, 材料的发射截面  $\sigma_e(\lambda)$  和吸收截面  $\sigma_a(\lambda)$  可以通过公式 (3) 互相推导<sup>[12]</sup>:

$$\sigma_e(\lambda) = \sigma_a(\lambda) \frac{Z_l}{Z_u} \exp\left(\frac{E_0 - h\frac{c}{\lambda}}{k_B T}\right) \quad (3)$$

式中:  $Z_l$  和  $Z_u$  分别表示下能级和上能级的配分函数;  $E_0$  为零线能 (即激光下能级的最低能级与激光上能级的最低能级的能量差);  $h$  为普朗克常量;  $c$  为光速;  $k_B$  为玻耳兹曼常量;  $T$  为开氏温度。上下能级配分函数的定义式为:

$$\begin{cases} Z_l = \sum_j \exp\left(-\frac{E_{lj}}{k_B T}\right) \\ Z_u = \sum_j \exp\left(-\frac{E_{uj}}{k_B T}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $E_{lj}$  和  $E_{uj}$  表示激光下上能级分裂出的各 Stark 能级的能量。通过玻璃的归一化吸收和发射光谱可计算出  $E_0$  和  $Z_l/Z_u$  的数值<sup>[12]</sup>, 进而计算出样品中铥离子  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$  能级跃迁的受激发射截面, 如图 3 所示。该受激发射截面覆盖了  $1550 \sim 2050 \text{ nm}$ , 在 1862 nm 处样品具有最大的发射截面  $3.7 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ , 与报道的其他高掺铥玻璃的发射截面大小相当<sup>[10-13]</sup>。

在波长为 790 nm 的泵浦光激励下, 记录了玻璃样品在 1860 nm 发射波长处的荧光衰减曲线, 如图 4 所示。当荧光光强衰减到最大值的  $1/e$  时, 对应时间

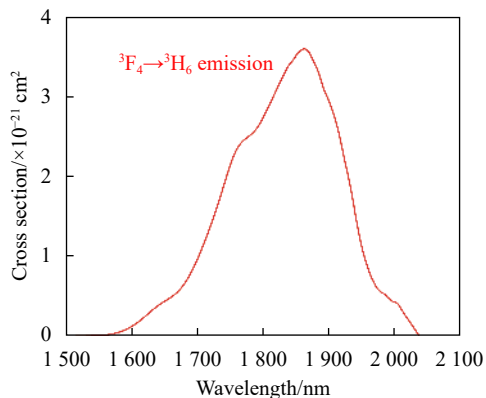


图 3 掺铥硅酸盐玻璃的受激发射截面

Fig.3 Emission cross section of Tm-doped silicate glass

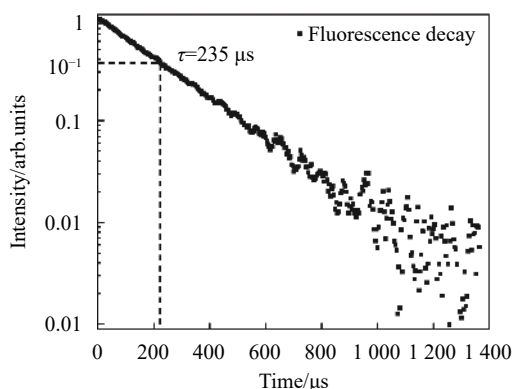


图 4 掺铥硅酸盐玻璃<sup>3</sup>F<sub>4</sub>能级的荧光强度随时间衰减曲线

Fig.4 <sup>3</sup>F<sub>4</sub> energy level fluorescence decay curve of Tm-doped silicate glass

235 μs 即为样品<sup>3</sup>F<sub>4</sub>能级的自发辐射寿命,该数值与石英光纤中铥离子的荧光寿命相当<sup>[9]</sup>,但样品具有比石英光纤更高的铥离子掺杂浓度,因此可以实现更高的激光增益。

## 2 掺铥硅酸盐玻璃光纤的增益特性

基于 8 wt.% 铥离子掺杂的硅酸盐玻璃,采用管棒法制备光纤预制棒,并拉制出纤芯直径为 7 μm、包层直径为 125 μm 的掺铥硅酸盐玻璃光纤,光纤端面如图 5(a)所示。光纤的纤芯折射率为 1.60486,包层折射率为 1.59913,NA 为 0.135。选用 Corning 公司的 SMF-28e+ 光纤作为掺铥硅酸盐光纤的匹配光纤,两种光纤的参数见表 1。利用 Vytran GPX-3400 光纤熔接平台,采取非对称熔接的方法进行有源光纤与匹配光纤的熔接。图 5(b)为利用光学显微镜观察的掺铥硅酸盐玻璃光纤与石英光纤的熔接效果图,图中右侧为

掺铥光纤。在泵浦光作用下,熔接点处仅有少量的紫色上转换荧光泄露,说明熔接质量较好,通过进一步测试可知该熔接损耗约为 0.6 dB。

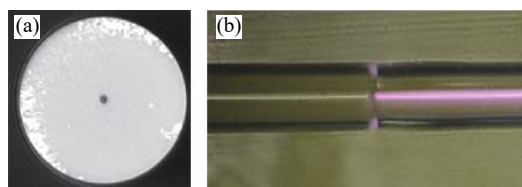


图 5 掺铥硅酸盐玻璃光纤的 (a) 端面和 (b) 与石英光纤的熔接效果图

Fig.5 (a) End face of Tm-doped silicate glass fiber and (b) the fusion splice of silica fiber and Tm-doped silicate fiber

表 1 硅酸盐光纤和石英匹配光纤的参数

Tab.1 Parameters of silicate fiber and matched silica fiber

Parameter	Tm-doped silicate fiber	SMF-28e+ silica fiber
Core diameter/μm	7	8.2
Cladding diameter/μm	125	125
Numerical aperture	0.14	0.135
Effective group index of core refraction @1310 nm	1.4676	1.6049

基于掺铥硅酸盐玻璃光纤与石英光纤的高质量熔接,搭建了掺铥光纤放大器测试新型光纤的增益性能。利用 2 cm 高掺铥硅酸盐玻璃光纤对功率为 1 mW、中心波长为 1950 nm 的种子源进行放大。记录不同泵浦功率下输出的信号光功率相对于不加泵浦时输出信号光功率的比值,计算出光纤的增益系数为 1.7 dB/cm。

## 3 基于高掺铥硅酸盐光纤的 DBR 型光纤激光器

为进一步研究新型掺铥光纤在激光器中的性能表现,搭建了如图 6 所示的 DBR 型光纤激光器。采用 1570 nm 单模光纤激光器作为泵浦源,其输出尾纤为 8/125 μm 尺寸的单模光纤,最大输出功率为 3 W。通过使用反射波长位于 1950 nm、反射率为 50% 的耦合输出光纤光栅 (OC FBG) 和反射率为 99% 的高反射光纤光栅 (HR FBG) 作为谐振腔的反馈元件。其中,HR FBG 基于单模光纤 (Corning, SMF-28e+) 制作,3 dB 带宽为 0.3 nm,OC FBG 基于保偏光纤 (Nufern,

PM 1550) 制作, 3 dB 带宽为 0.05 nm。受到保偏光纤双折射效应的影响, OC FBG 在快轴和慢轴方向各具有一个反射带, 其中一个反射带与 HR FBG 的反射带具有相同的中心波长, 可以保证腔内仅有单一偏振方向的光谐振。分别使用长度为 2 cm 和 8 cm 的有源光纤作为激光器的增益光纤, 采用基于保偏光纤的 1570/1950 nm 波分复用器(WDM) 进行泵浦光的耦合和 1950 nm 激光的输出, 未吸收的泵浦光由 HR FBG 的末端输出。为了避免光纤端面的反射光对激光器的影响, 图中的输出光纤均采用角度切割。

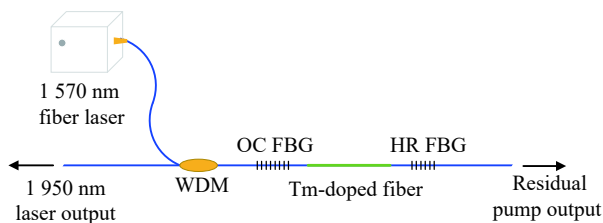


图 6 DBR 型掺铥光纤激光器的实验装置图

Fig.6 Experimental scheme of Tm-doped fiber DBR laser

图 7 为腔内有源光纤长度分别为 2 cm 和 8 cm 时激光器的输出功率随泵浦功率的变化关系。当选用 2 cm 掺铥硅酸盐光纤作为增益光纤时, OC FBG 较低的反射率导致了较大的腔损耗, 因此激光器具有约 1.09 W 的阈值。当泵浦功率小于 2 W 时, 激光器的输出功率随泵浦功率的变化呈现出较好的线性关系, 拟合可得出此时的斜率效率约为 5.4%; 当泵浦功率大于 2 W 时, 由于没有施加主动制冷, 激光器积累的热效应导致了熔接点的不稳定, 因此输出功率有一定的波动; 当泵浦功率为 2.9 W 时, 激光器达到最大输出

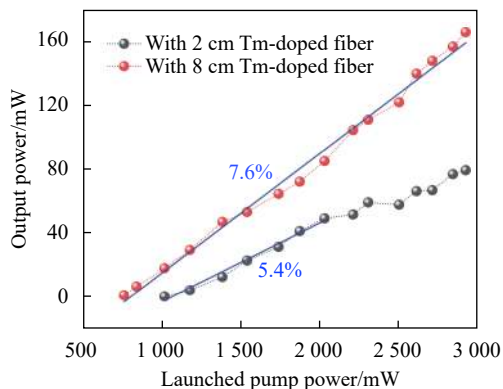


图 7 采用不同长度增益光纤时, 激光器输出功率随泵浦功率的变化  
Fig.7 Output power of the laser versus pump power with different active fiber lengths

功率 79 mW。当选用 8 cm 掺铥硅酸盐光纤作为增益光纤时, 激光器的阈值降为 0.76 W, 最大输出功率增加到 166 mW, 激光器的功率曲线具有较好的线性关系, 经拟合可得出其斜率效率约 7.6%。在 2.9 W 的泵浦功率下, 经过 2 cm 和 8 cm 掺铥硅酸盐玻璃光纤的吸收和损耗, 剩余泵浦功率分别为 1.33 W 和 0.16 W, 说明 8 cm 有源光纤能够实现泵浦的充分吸收。由于系统中的光纤对于 1950 nm 波长的激光均为良好的单模波导, 因此激光器始终输出单横模激光。

通过 Yokogawa AQ 6375 光谱分析仪记录了基于 2 cm 掺铥硅酸盐玻璃光纤的激光器在 2.9 W 泵浦下的输出光谱, 如图 8 所示。激光器的中心波长为 1949.9 nm, 最大输出时的信噪比 >60 dB, 激光的 3 dB 带宽 <0.05 nm, 达到了光谱仪的分辨率极限。在后续的研究中, 拟选用反射率更高的 OC FBG 和更短的有源光纤, 并充分裁剪光纤光栅的尾纤压缩谐振腔长度, 同时对有源光纤实施温度控制, 旨在获得稳定的窄线宽单频激光输出。

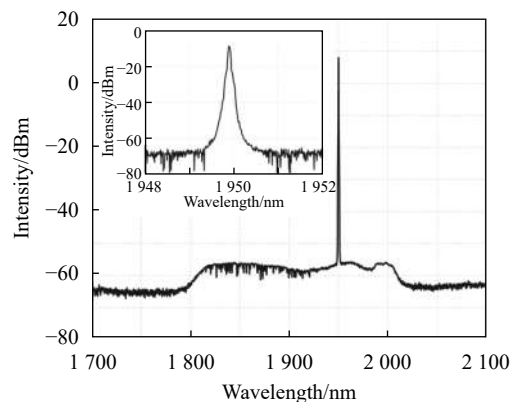


图 8 2 cm 增益光纤长度时, 激光器最大输出功率下的输出光谱 (插图: 光谱仪分辨率为 0.05 nm 时的激光光谱图)

Fig.8 Spectrum of the laser at maximum output power with 2 cm active fiber (Inset: laser spectrum measured with a resolution of 0.05 nm)

## 4 结 论

文中对制备的新型国产高掺铥硅酸盐玻璃光纤进行了详细的测试表征, 包括激光玻璃发光性能表征、光纤增益测试以及光纤在 DBR 型光纤激光器中的性能表现。研究结果表明: 掺铥硅酸盐玻璃在 789 nm 处的受激吸收截面大小为  $4.4 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ , 在

1570 nm 处的受激吸收截面大小为  $0.6 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ , 通过倒易法计算出样品中铥离子  $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  能级跃迁的最大受激发射截面为  $3.7 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$  (@1862 nm), 玻璃样品中铥离子  $^3\text{F}_4$  能级的荧光寿命为 235  $\mu\text{s}$ ; 通过 2 cm 的掺铥光纤测得其在 1950 nm 波长处的增益系数大于 1.7 dB/cm; 基于 2 cm 和 8 cm 的有源光纤分别搭建了 DBR 结构的线形腔光纤激光器, 1950 nm 激光的最大输出功率分别为 79 mW 和 166 mW。综上可知, 该新型光纤具有良好的增益特性, 在高性能单频光纤激光系统中具有广泛的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] Shi Wei, Fu Shijie, Fang Qiang, et al. Single-frequency fiber laser based on rare-earth-doped silica fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1003001. (in Chinese)
- [2] Simakov N, Hemming A V, Carter A, et al. Design and experimental demonstration of a large pedestal thulium-doped fibre [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3126-3133.
- [3] Wang W C, Zhou B, Xu S H, et al. Recent advances in soft optical glass fiber and fiber lasers [J]. *Progress in Materials Science*, 2019, 101: 90-171.
- [4] Eckerle M, Kieleck C, Świdorski J, et al. Actively Q-switched and mode-locked  $\text{Tm}^{3+}$ -doped silicate 2  $\mu\text{m}$  fiber laser for supercontinuum generation in fluoride fiber [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 512-514.
- [5] Zhang Z, Boyland A J, Sahu J K, et al. High-power single-frequency thulium-doped fiber DBR laser at 1943 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(7): 417-419.
- [6] Burns M D, Shardlow P C, Barua P, et al. 47 W continuous-wave 1726 nm thulium fiber laser core-pumped by an erbium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5230-5233.
- [7] Fu S, Shi W, Feng Y, et al. Review of recent progress on single-frequency fiber lasers [Invited] [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): A49-A62.
- [8] Gebavi H, Milanese D, Balda R, et al. Spectroscopy of thulium and holmium heavily doped tellurite glasses [J]. *Journal of Luminescence*, 2012, 132(2): 270-276.
- [9] Jackson S D, King T A. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(5): 948-956.
- [10] Li M, Bai G, Guo Y, et al. Investigation on  $\text{Tm}^{3+}$ -doped silicate glass for 1.8  $\mu\text{m}$  emission [J]. *Journal of Luminescence*, 2012, 132(7): 1830-1835.
- [11] Tang G, Zhu T, Liu W, et al.  $\text{Tm}^{3+}$  doped lead silicate glass single mode fibers for 2  $\mu\text{m}$  laser applications [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(6): 2147-2157.
- [12] Zhang L, Zhang J, Yu C, et al. A method for emission cross section determination of  $\text{Tm}^{3+}$  at 2.0  $\mu\text{m}$  emission [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(10): 103117.
- [13] Tang Guowu, Wen Xin, Huang Kaimin, et al.  $\text{Tm}^{3+}$  -doped barium gallo-germanate glass single-mode fiber with high gain per unit length for ultracompact 1.95  $\mu\text{m}$  laser [J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11(3): 032701.