

## 掺铥光纤激光器波长可调谐输出特性

陶蒙蒙<sup>1</sup>, 陶波<sup>1</sup>, 余婷<sup>2</sup>, 王振宝<sup>1</sup>, 冯国斌<sup>1</sup>, 叶锡生<sup>2</sup>

- (1. 西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024;  
2. 中国科学院上海光学精密机械研究所 空间激光信息技术研究中心, 上海 201800)

**摘要:** 利用 1 550 nm 光纤激光器搭建了一个同带泵浦环形腔掺铥光纤激光器, 并对其光谱输出特性进行了研究。在 1 550 nm 激光泵浦下, 1.6 m 掺铥光纤自发辐射谱覆盖 1 800~1 900 nm 范围, 3 dB 带宽大于 60 nm; 通过在腔内插入隔离器, 获得了线宽小于 0.2 nm 的激光输出, 中心波长在 1 900 nm 附近; 进一步在腔内加入 FP 腔, 获得了可调谐的窄线宽输出, 光谱调谐范围达 60 nm, 覆盖从 1 840~1 900 nm 的光谱范围, 激光线宽仅为 0.07 nm。另外, 在腔内使用通信波段用 FP 腔, 同样获得了较宽调谐范围的窄线宽输出。输出光谱分为 1 820~1 850 nm 和 1 865~1 915 nm 两个区域, 调谐范围共达 80 nm。结合使用 2 000 nm FP 腔的可调谐光谱范围, 该激光器在 1 820~1 915 nm 的范围都可以获得激光输出, 与掺铥光线的自发辐射谱基本相符。

**关键词:** 掺铥光纤激光器; 波长可调谐; 窄线宽

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1205002

## Output characteristics of tunable Tm-doped fiber lasers

Tao Mengmeng<sup>1</sup>, Tao Bo<sup>1</sup>, Yu Ting<sup>2</sup>, Wang Zhenbao<sup>1</sup>, Feng Guobin<sup>1</sup>, Ye Xisheng<sup>2</sup>

- (1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;  
2. Research Center of Space Laser Information Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** A ring cavity Tm-doped fiber laser system was built based on a 1 550 nm fiber laser. And, its spectral characteristics were investigated. With 1 550 nm pump, the spontaneous emission of the 1.6 m long Tm-doped fiber covered a spectral range from 1 800–1900 nm with a 3 dB bandwidth bigger than 60 nm. Inserting an isolator into the ring cavity, narrow linewidth output was obtained with a 3 dB linewidth smaller than 0.2 nm centering at around 1 900 nm. Further adding a tunable FP filter, tunable, narrow linewidth laser output was attained. The laser spectrum was tunable from 1 840–1 900 nm with a broad tunable range reaching 60 nm while maintaining a 3 dB linewidth of only 0.07 nm. In addition, a telecommunication FP filter at the 1 550 nm waveband was also exploited in this ring cavity laser system for wavelength tuning. And, a narrow linewidth, broadband tunable laser output in two separated spectral ranges was also recorded. Together with the 2000 nm FP laser system, this laser demonstrates a wide tunable range from 1 820–1 915 nm which is consistent with the spontaneous emission spectrum of the Tm-doped fiber.

**Key words:** Tm-doped fiber laser; wavelength tuning; narrow linewidth

收稿日期: 2016-04-12; 修订日期: 2016-05-15

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金课题(SKLLIM1409; SKLLIM1503)

作者简介: 陶蒙蒙(1989-), 男, 研究实习员, 硕士, 主要从事光纤激光技术方面的研究。Email: tonylemon@yeah.net

## 0 引言

掺铥光纤激光器发射光谱覆盖 1.7~2.1 μm 波段, 该波段内存在着很多化学气体和水的吸收峰以及大气透过窗口<sup>[1]</sup>, 因此在医学<sup>[2]</sup>、激光雷达<sup>[3]</sup>、大气遥感<sup>[4]</sup>以及通信<sup>[5]</sup>等领域有着广泛的潜在应用, 而且在很多应用中都要求激光光源具有宽谱调谐特性。

早在 1990 年, 英国南安普顿 D. C. Hanna 等人就使用双折射滤光片对掺铥光纤激光器的光谱调谐特性展开了初步研究<sup>[6]</sup>。1998 年, R. L. Shubochkin 等人报道了使用耦合器实现掺铥光纤激光器波长调谐功能的研究<sup>[7]</sup>。同年, S. D. Jackson 报道了通过调节增益光纤长度来改变掺铥光纤激光器输出波长的研究成果<sup>[8]</sup>。此外, 该报道实现了空间耦合掺铥光纤激光器的高功率输出, 引起了掺铥光纤激光器的研究热潮。此后, 基于空间耦合的高功率掺铥光纤激光器波长可调谐的研究报道层出不穷, 而且多采用体光栅调节的方式来实现对激光器输出波长的调谐<sup>[9-13]</sup>。

随着 2 μm 波段光纤器件的不断成熟, 逐渐涌现出全光纤的掺铥光纤激光器波长调节方式。其中较为常用的是基于光纤光栅的波长调谐方式。H. Sakata 研究小组开发了一种基于长周期光纤光栅的环形腔掺铥光纤激光器全光纤波长调谐方法<sup>[14-15]</sup>。A. Pal 等人同样使用光纤光栅也实现了对掺铥光纤激光器波长的精确调谐和控制<sup>[16]</sup>。2013 年, Z. Li 等人使用光纤光栅构建了一个可调谐滤波器, 实现了掺铥光纤激光器的超宽范围光谱调谐<sup>[17]</sup>。另外, 基于 FP 腔的波长调谐方式则使得激光器结构更加简便<sup>[18-19]</sup>。

研究小组在之前的工作中对不同腔结构掺铥光纤激光器的运转特性进行了研究<sup>[20]</sup>, 并开展了 2 μm 脉冲输出的放大工作<sup>[21]</sup>。文中对掺铥光纤激光器的波长可调谐特性进行了研究。搭建环形腔掺铥光纤激光器, 使用 1 550 nm 同带泵浦, 得到了掺铥光纤的自发辐射光谱, 光谱范围覆盖 100 nm; 通过在腔内加入光纤隔离器, 消除了腔内激光信号拍频产生的光谱多峰结构, 得到了窄线宽激光输出, 光谱线宽小于 0.2 nm; 使用可调谐 FP 腔, 实现了激光器的窄线宽、可调谐输出, 输出激光线宽约为 0.07 nm, 可调谐范围达 60 nm; 另外, 利用 1 550 nm 通信波段 FP 腔作为选频器件, 同样获得了 2 μm 波段的窄线宽、可调谐输出。

## 1 实验系统

波长可调谐掺铥光纤激光器光路结构如图 1 所示。泵浦源(Pump)为一个 1 550 nm 光纤激光器。泵浦源通过一个 1 550/2 000 nm 波分复用器(WDM)耦合进入环形腔内对 1.6 m 长的掺铥光纤 (Tm-doped fiber)进行泵浦。信号光由一个分束比为 70:30 的输出耦合器(OC)引出。图中虚框 1 内的部分为一个光纤隔离器 (ISO), 虚框 2 内的部分为一个可调谐 FP 腔(FP Filter)。

激光器输出光谱由 Agilent 86140B 光谱仪进行测量记录。

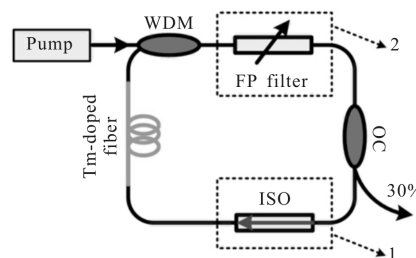


图 1 波长可调谐掺铥光纤激光器光路结构图

Fig.1 Experimental setup of the wavelength tunable Tm-doped fiber laser system

## 2 实验结果与分析

1 550 nm 激光泵浦下, 腔内没有隔离器和 FP 腔时, 激光器的典型输出光谱如图 2 所示。图中可以看出, 在没有光纤隔离器和 FP 腔时, 160 mW 泵浦下

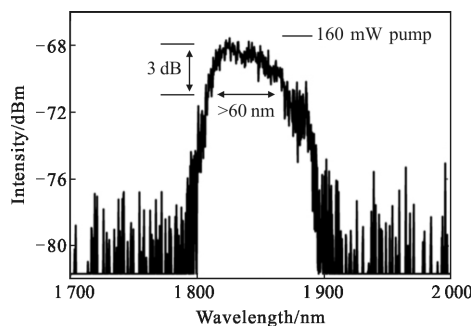


图 2 没有光纤隔离器和 FP 腔时, 160 mW 泵浦下激光器典型输出光谱

Fig.2 Typical laser spectrum at 160 mW pump power without ISO and FP filter

激光器产生放大的自发辐射(ASE),激发光谱覆盖 1 800~1 900 nm, 输出光谱 3 dB 线宽大于 60 nm, 辐射峰值在 1 825 nm 附近。

增加泵浦功率,由于腔内熔接点带来的反射,激光器出现激光振荡,如图 3(a)所示。可以看出,在 400 mW 泵浦下激光器产生激发振荡,中心波长在 1 900 nm 附近,3 dB 线宽约为 6 nm。利用光谱仪观察其精细光谱发现,起振波长处呈多峰振荡结构,如图 3(b)所示。该多峰振荡结构是由增益光纤内部产生的前向激光信号和后向激光信号拍频产生的。在激光器谐振腔内加入单向隔离器,保证激光信号在腔内的单向传输即可消除该多峰结构。

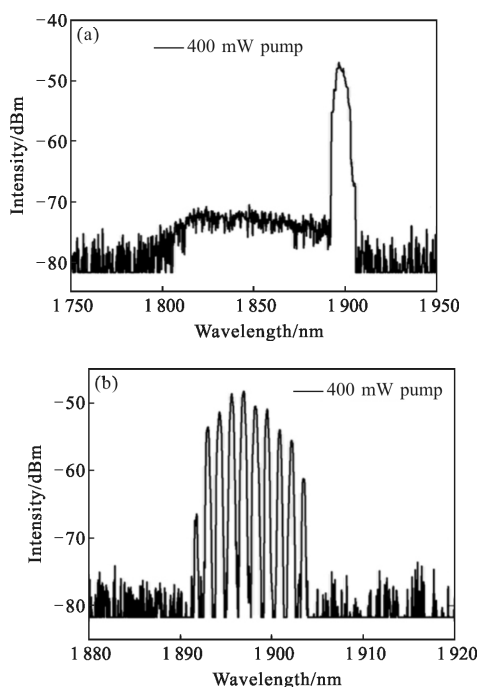


图 3 没有隔离器和 FP 腔时,400 mW 泵浦下激光器典型输出光谱(a)和激光器起振波长附近的精细光谱(b)  
Fig.3 Typical laser spectrum (a) and corresponding detailed laser spectrum (b) at 400 mW pump power without ISO and FP filter

在激光器腔内加入光纤隔离器,如图 1 中虚框 1 内所示。激光器的典型输出光谱如图 4 所示。由图 4(a)可以看出:激光器腔内增益光纤的自发辐射谱依然在 1 800~1 900 nm 之间,没有发生明显的变化。另外,与图 3(a)相比可以发现,腔内加入隔离器后,激光器线宽获得明显压缩。其原因是腔内信号光实现了单向传输,没有了激光信号间的拍频。图 4(b)

中的精细光谱验证了由拍频导致的激光光谱多峰振荡结构的消失。由图 4(b)可以看出,加入光纤隔离器后,400 mW 泵浦下激光器输出线宽仅 0.15 nm。

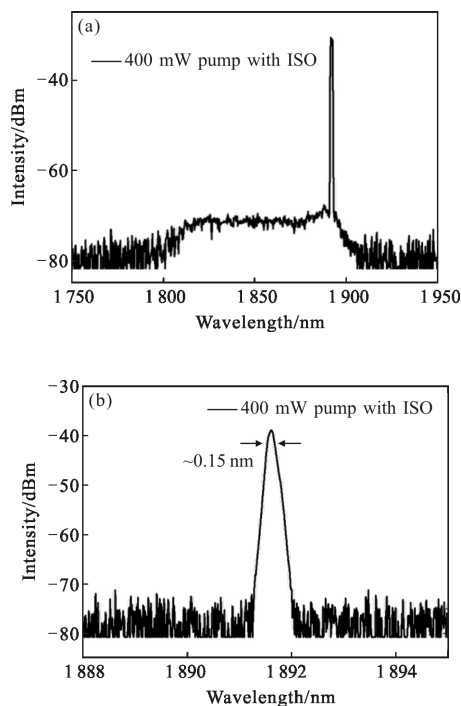
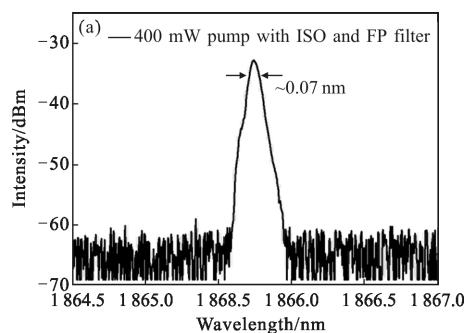


图 4 腔内插入隔离器后,400 mW 泵浦下激光器典型输出光谱图(a)和精细光谱(b)  
Fig.4 Typical laser spectrum (a) and corresponding detailed laser spectrum (b) at 400 mW pump power with ISO inserted

继续在腔内加入一个工作波长在 2 000 nm 波段的 FP 腔,如图 1 中虚框 2 内所示,激光器输出光谱见图 5。

由图 5(a)可以看出:加入 FP 腔后,激光器输出光谱线宽进一步获得压缩,3 dB 线宽仅 0.07 nm。图 5(b)所示为 FP 腔在锯齿波连续扫描状态下,保持光谱强度最大值 5 min 记录的光谱。可以看出:该激光器在 1 840~1 900 nm 范围内均可实现波长调谐。



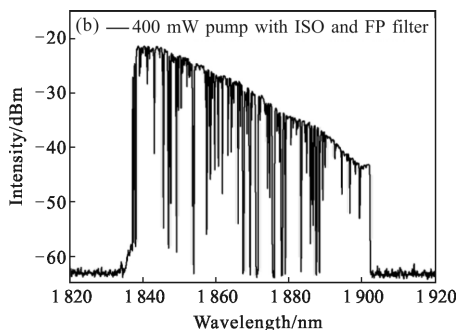


图 5 腔内插入隔离器和 FP 腔后, 400 mW 泵浦下激光器典型输出光谱图(a)及光谱调谐范围(b)

Fig.5 Typical laser spectrum (a) and tunable range (b) at 400 mW pump power with ISO and FP filter inserted

调谐范围内,随着波长的增加,激光强度逐渐降低,与图 2 中的自发辐射谱结构相符。调谐范围小于图 2 中的自发辐射谱范围,这是由 FP 腔的调谐能力所决定的。

为了对激光器内增益光纤的发射谱范围进行进一步的探索,将 2 000 nm 波段的 FP 腔更换为普通的通信用 1 550 nm 波段 FP 腔。使用 1 550 nm 波段 FP 腔的情况下,激光器输出光谱如图 6 所示。

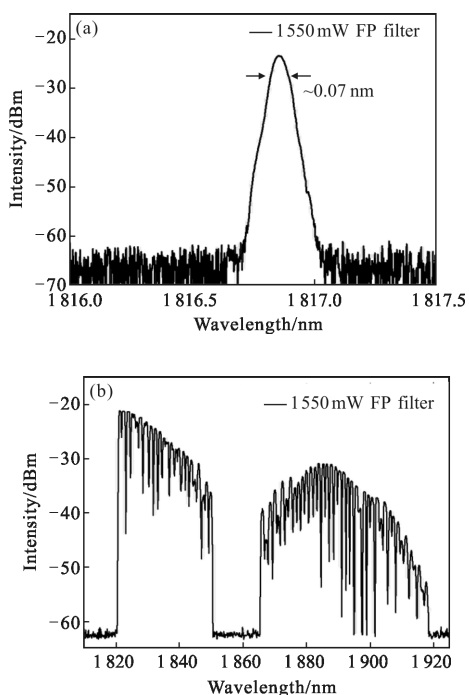


图 6 使用 1 550 nm 通信波段 FP 腔, 400 mW 泵浦下激光器典型输出光谱图(a)及光谱调谐范围(b)

Fig.6 Typical laser spectrum (a) and tunable range (b) at 400 mW pump power with 1 550 nm FP filter inserted

图 6(a)为 400 mW 泵浦下,使用 1 550 nm 通信波段 FP 腔获得的典型输出光谱。由图 6(a)可以看出,激光器在增益光纤发射谱内仍可以起振,且输出激光线宽与使用 2 000 nm 波段 FP 腔相仿。图 6(b)为 1 550 nm 通信波段 FP 腔在锯齿波连续扫描状态下,保持光谱强度最大值 5 min 记录的光谱。可以看出:激光器在 1 820~1 850 nm 和 1 865~1 915 nm 两个光谱区域内都可实现调谐输出,调谐范围达 80 nm。结合使用 2 000 nm FP 腔的可调谐光谱范围,可以发现,该激光器在 1 820~1 915 nm 的范围都可以获得激光输出,与图 2 中的自发辐射谱基本相符。

另外,需要指出的是,图 5(b)和图 6(b)在调谐范围内出现了一些强度较低的分立谱线,产生这些谱线的原因可能是激光在大气中的传输损耗造成的;图 6(b)中两个可调谐光谱区域中间的 1 850~1 865 nm 波段无法实现激光振荡,可能是由 1 550 nm 通信波段 FP 腔的镀膜特性决定的。

### 3 结 论

对掺铋光纤激光器的波长可调谐特性进行了实验研究。利用环形腔结构,观察到了掺铋光纤的 ASE 光谱,光谱范围覆盖约 100 nm;通过改变激光器的腔结构,研究了掺铋光纤激光器的光谱特性;通过使用 FP 腔,实现了 2 μm 波段的窄线宽、宽范围可调谐输出,可调谐范围与掺铋光纤 ASE 谱相符。该可调谐光源在光学传感以及光谱学等领域有着潜在应用。

### 参 考 文 献:

- [1] Jackson S D. The spectroscopic and energy transfer characteristics of rare earth ions used for silicate glass fibre lasers operating in the shortwave infrared [J]. *Laser Photonics Rev*, 2009, 3(5): 466-482.
- [2] Fried N M, Blackmon R L, Irby P B. A review of Tm fiber laser ablation of kidney stones [C]//SPIE, Fiber Lasers VIII: Technology, Systems, and Applications, 2011, 7914: 791402.
- [3] Young R, Barnes N P. Profiling atmospheric water vapor using a fiber laser lidar system [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(4): 562-567.
- [4] Bremer K, Pal A, Yao S, et al. Sensitive detection of CO<sub>2</sub> implementing tunable Tm-doped all-fiber laser[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(17): 3957-3963.
- [5] Li Z, Heidt A M, Daniel J, et al. Thulium-doped fiber

- amplifier for optical communication at 2  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt Express*, 2013, 21(8): 9289–9297.
- [6] Hanna D C, Percival R M, Smart R G, et al. Efficient and tunable operation of a Tm-doped fiber laser [J]. *Opt Commun*, 1990, 75: 283–286.
- [7] Shubochkin R L, Kozlov V A, Carter A, et al. Tunable thulium-doped all-fiber laser[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1998, 10(7): 944–945.
- [8] Jackson S D, King T A. High-power diode-cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser [J]. *Opt Lett*, 1998, 23(18): 1462–1464.
- [9] Clarkson W A, Barnes N P, Turner P W, et al. High-power cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser with wavelength tuning from 1 860 nm to 2 090 nm [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(22): 1989–1991.
- [10] Shen D Y, Sahu J K, Clarkson W A. High-power widely tunable Tm-fiber lasers pumped by an Er,Yb co-doped fiber laser at 1.6  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt Express*, 2006, 14(13): 6084–6090.
- [11] McComb T S, Sims R A, Willis C, et al. High-power widely tunable thulium fibre lasers [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(32): 6236–6242.
- [12] Hemming A, Jackson S D, Sabella A, et al. High power, narrow bandwidth and broadly tunable Tm, Ho-co-doped aluminosilicate glass fibre laser [J]. *Electron Lett*, 2010, 46(24): 1617–1618.
- [13] Wang F, Shen D Y, Fan D Y, et al. High power widely tunable Tm-fiber laser with spectral linewidth of 10 pm[J]. *Laser Phys Lett*, 2010, 7(6): 450–453.
- [14] Sakata H, Ichikawa M, Nakagami H. Tunable Tm-doped fiber ring laser operating at 1.9  $\mu\text{m}$  using force-induced fiber grating as wavelength tuner[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(3): 291–295.
- [15] Ichikawa M, Araki S, Nakagami H. Wavelength control of a Tm-doped fiber laser using nonidentical mechanical long-period fiber gratings[J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10: 025101.
- [16] Pal A, Sen R, Bremer K, et al. All-fiber tunable laser in the 2  $\mu\text{m}$  region, designed for CO<sub>2</sub> detection[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(29): 7011–7015.
- [17] Li Z, Alam S U, Jung Y, et al. All-fiber, ultra-wideband tunable laser at 2  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(22): 4739–4742.
- [18] Geng J, Wang Q, Wang J, et al. All-fiber wavelength-swept laser near 2  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(19): 3771–3773.
- [19] Wei Y, Hu K, Sun B, et al. All-fiber widely wavelength-tunable thulium-doped fiber ring laser incorporating a Fabry-Perot filter[J]. *Laser Phys*, 2012, 22(4): 770–773.
- [20] Tao Mengmeng, Huang Qijie, Yu Ting, et al. LD clad-pumped high efficient Tm-doped fiber lasers with different laser cavities [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2008–2011. (in Chinese)  
陶蒙蒙, 黄启杰, 余婷, 等. LD 泵浦不同腔结构高效运转掺铥光纤激光器 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2008–2011.
- [21] Tao Mengmeng, Yan Yan, Wang Fei, et al. A Tm-Ho codoped fiber based all fiber amplification of a gain-switched 2  $\mu\text{m}$  fiber laser [J]. *Modern Applied Physics*, 2014, 5(2): 125–128. (in Chinese)  
陶蒙蒙, 闫燕, 王飞, 等. 基于铥钬共掺光纤的增益开关 2  $\mu\text{m}$  激光放大[J]. 现代应用物理, 2014, 5(2): 125–128.