

doi:10.3788/gzxb20164506.0614003

基于非线性偏振旋转效应的多波长掺铥锁模 光纤激光器

刘鹏^{1,2}, 王天枢^{1,2}, 张鹏^{1,3}, 张岩^{1,2}, 马万卓^{1,3},
苏煜炜^{1,2}, 毕明喆^{1,2}, 张靓^{1,2}

(1 长春理工大学 空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 长春 130022)

(2 长春理工大学 理学院, 长春 130022)

(3 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘要:运用非线性偏振旋转效应实现了一种掺铥锁模多波长光纤激光器. 采用环形腔结构, 以 1 565 nm 半导体光源为泵浦源, 3 m 长掺铥光纤为增益介质. 利用非线性偏振旋转效应进行滤波. 当泵浦功率在 800 mW 时, 通过调节光纤偏振控制器, 激光器出现了被动锁模状态的脉冲输出, 脉冲重复频率为 3.178 MHz, 脉冲宽度为 617 ps. 进一步增加泵浦功率, 激光器进入多波长输出的工作状态. 调节偏振控制器在室温下得到 1~5 个稳定的波长激光输出, 边模抑制比为 40~60 dB.

关键词:激光器; 掺铥光纤激光器; 非线性偏振旋转; 锁模; 多波长; 可饱和吸收

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)06-0614003-5

Multi-wavelength Thulium-doped Mode-locking Fiber Laser Based on Nonlinear Polarization Rotation

LIU Peng^{1,2}, WANG Tian-shu^{1,2}, ZHANG Peng^{1,3}, ZHANG Yan^{1,2}, MA Wan-zhuo^{1,3},
SU Yu-wei^{1,2}, BI Ming-zhe^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2}

(1 National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology,
Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022, China)

(2 College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022, China)

(3 College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022, China)

Abstract: By using the nonlinear polarization rotation, a thulium doped mode-locked multi wavelength fiber laser was achieved. In the ring cavity, a 1 565 nm fiber laser pumps a 3 m long thulium doped fiber. Filtering is realized by the nonlinear polarization rotation effect. When the pump power is 800mW, the pulse output of the passively mode locked state is realized by adjusting the fiber polarization controller. The pulse repetition frequency is 3.178 MHz and the pulse width is 617 ps. Further increasing the pump power, the laser is working at a multi wavelength state. By adjusting the fiber polarization controller, a stable 1~5 wavelength laser output is obtained at a room temperature, and the edge is less than 40~60 dB.

Key words: Laser; Thulium-doped fiber laser; Nonlinear polarization rotation; Mode-locking; Multi-wavelength; Saturable absorption

OCIS Codes: 140.3460;060.3510;140.3600

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60907020)、吉林省自然科学基金(No. 20150101044JC)和长春市科技计划(No. 13KG31)资助

第一作者: 刘鹏(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤激光器技术. Email: 751853793@qq.com

导师(通讯作者): 王天枢(1975-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤激光器及空间激光通信技术. Email: wangts@cust.edu.cn

收稿日期: 2015-11-30; 录用日期: 2016-03-09

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

光纤激光器具有阈值低、效率高、线宽窄、体积小、可调谐和性价比高^[1-5]等优点,是最主要的激光器之一。2.0 μm 掺铥光纤(Thulium-Doped Fiber, TDF)激光器可以输出人眼安全波段激光,在雷达、激光医疗、光电对抗以及特殊材料加工等领域具有重要应用^[6-9]。近年来,多波长光纤激光器成为研究的热点之一^[10],2 μm 波段多波长掺铥光纤激光器用于波分复用(Wavelength Division Multiplexer, WDM)自由空间光通信和光纤通信,可有效地减小 WDM 通信系统信道间隔,增加信道数量^[11],比采用多个单波长激光器组合作为光源的方法有明显优势,降低了激光器复杂性、系统成本和维护成本。因此,多波长光纤激光器在 WDM 光纤通信系统、光纤传感、光学仪器及系统检测等领域具有很大的应用潜力。目前,实现多波长掺铥光纤激光器稳定输出的方法有:利用光纤马赫-曾德(M-Z)干涉仪滤波的多波长掺铥光纤激光器^[12],采用环形腔结构,实现了 2 μm 波段输出的多波长激光数为 1~3,但该结构复杂、输出波长数较少、波长间隔不固定;利用非线性光纤环形镜的多波长掺铥光纤激光器^[13-14]采用 8 字型结构,可得到稳定的 42 个波长输出;采用基于四波混频效应的多波长掺铥光纤激光器^[15]可以得到 1~6 个波长的稳定输出,但是由于该结构均采用保偏器件,成本较高,由 SMF-MMF-SMF 组成的多模干涉滤波器也被应用于多波长可调谐掺铥光纤激光器的研究^[11],采用多模光纤作为波长选择器件,可以得到 1~3 个波长的稳定激光输出,3 dB 线宽为 0.04 nm。这些方法均得到了稳定的多波长激光输出,但存在结构复杂、成本较高、稳定性较差以及边模抑制比较低等缺陷。

将 2 μm 脉冲光纤激光器作为中红外激光器的泵浦源,已经成为国内外新型激光源研究的热点之一^[16-19]。实现 2.0 μm 波段掺铥超短激光脉冲输出主要采用的锁模方式有:主动锁模掺铥光纤激光器^[20],该激光器实现了重复频率为 37.88 MHz 的皮秒激光脉冲输出。但由于该结构并非全光纤结构,采用空间耦合方式导致环境因素影响较大,系统稳定性较差;非线性偏振演化锁模掺铥光纤激光器^[21],该结构得到了脉冲宽度为 260 fs,平均功率达到 30 mW 的脉冲激光输出,实现了激光器的全光纤化结构,提高了激光器的稳定性;由于碳纳米管、金纳米棒、二硫化钼等新型被动锁模材料的出现,使得可饱和吸收体锁模一直是被动锁模研究的热点之一。2015 年吉林大学提出了一种利用金纳米棒作为可饱和吸收体的被动锁模掺铥光纤激光器^[22],利用纵向表面等离子体共振吸收得到了脉宽为 4.02 ps,重复频率为 37.49 MHz,输出功率为 6 mW,中

心波长为 1 982 nm 的脉冲激光输出;非线性放大环境锁模掺铥光纤激光器^[23]采用 8 字环结构,得到了稳定孤子脉冲输出,中心波长为 2 017.3 nm,半峰全宽为 1.56 nm,重复频率为 1.514 MHz,脉宽为 2.8 ps。2 μm 脉冲激光器越来越高的性能参数以及全光纤化程度,使得其在系统稳定性,系统成本以及工业化应用等方面具有明显优势。

本文提出了一种基于非线性偏振旋转(Nonlinear Polarization Rotation, NPR)效应的多波长掺铥锁模光纤(Thulium Doped Fiber, PDF)激光器。采用 1 565 nm 半导体激光器作为泵浦源,3 m 的 TDF 作为增益介质,50 m 的单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)增加非线性效应,两个 PC 和一个起偏器组成环形腔结构,可实现 1~5 个波长稳定的多波长激光输出。

1 实验结构与工作原理

图 1 为基于 NPR 效应的锁模多波长掺铥光纤激光器实验结构,采用 1 565 nm 半导体激光器作泵浦源,经最大输出功率为 2 W 铒镱共掺光纤放大器(Erbium-Ytterbium Codoped Fiber Amplifier, EYDFA)放大至 W 级。通过 1 550 nm 隔离器(Isolator, ISO)后,由 1 560/2 000 nm 波分复用器注入 3 m 长 TDF 中,1 565 nm 泵浦光在 TDF 内被吸收,由 $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$ 能级跃迁产生的自发辐射光在光纤中不断被受激放大,得到放大的自发辐射光输出。TDF 的数值孔径、1 570 nm 处吸收、2 000 nm 模场直径分别为 0.15、15 dB/m、10.5 μm 。两个 PC 用来控制偏振态,一个 2 μm 光纤起偏器接入两 PC 之间,起偏器用来输出线偏振光。ISO 保证激光器腔内单方向工作,50 m 长 SMF 用来增强腔内非线性效应。一个 10/90 耦合器,10% 端口作为输出,90% 的光作正反馈在腔内循环。

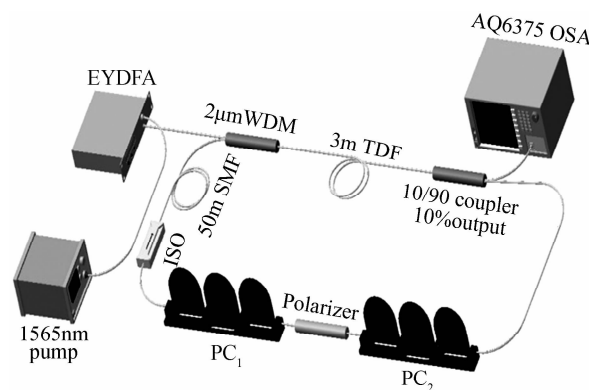


图 1 非线性偏振旋转效应多波长掺铥光纤激光器实验结构
Fig. 1 Schematic diagram of the nonlinear polarization rotation in multi wavelength thulium doped fiber laser experimental structure

经 EYDFA 放大的泵浦光在 TDF 中产生 2 μm 波段自发辐射,经起偏器输出线偏振光,通过控制 PC₁ 将

线偏振光调整为椭圆偏振光. 实验中, PC 可以实现线偏振和椭圆偏振两个偏振态之间的转化. 椭圆偏振光经过隔离器单向输入到单模光纤中, 在时域上由光纤中的光克尔效应导致光纤折射率随光强变化, 产生光场的自相位调制(Self Phase Modulation, SPM), 使椭圆偏振光在单模光纤中发生非线性相移, 在传输过程中偏振态发生与光强度有关的角度旋转. 当光通过 PC₂ 的时候调节 PC₂ 可以改变通过起偏器的光强, 两个 PC、SMF 和起偏器来控制腔内的这种强度关系.

基于非线性偏振旋转效应多波长锁模光纤激光器在工作时存在传输系数随光强增加而变大或变小两个区域, 这两个区域分别称为正反馈区和负反馈区^[24]. 其实质就是当泵浦功率从零开始逐渐增加时, 激光器工作在正反馈区域即传输系数随光强增加而变大, 此时腔内模式竞争较为激烈, 不易产生稳定的多波长激光输出. 当泵浦功率达到锁模阈值时, 调整偏振控制器可以使激光器进入被动锁模状态. 其被动锁模原理类似于可饱和吸收体的作用, 低强度的光被吸收继续在腔内振荡, 高强度的光可以通过^[24]. 此时该结构可用于 NPR 被动锁模掺铥光纤激光器的研究. 随着泵浦功率的增加, 光强被不断放大, 当达到正负反馈区临界点时光强不再随泵浦功率增加, 而是由于传输系数减小腔内损耗变大使得峰值功率被限制^[25]. 当非线性偏转效应达到饱和状态^[26]时, 传输效率随光强的增加而减小, 这种强度相关非均匀损耗能抑制腔内的模式竞争^[25-27], 使非均匀损耗和模式竞争趋于平衡. 起偏器的输出端是一段保偏光纤, 它和起偏器共同组成了一个类似 Lyot 双折射光纤滤波器的结构, 而且激光腔中透射率与波长呈正弦曲线关系, 其作用相当于在腔内增加了一个梳状滤波器. 抑制模式竞争和梳状滤波共同作用进而在室温下能够获得稳定的多波长输出.

2 结果与讨论

采用光谱分析仪(AQ6375)测量输出信号, 注入的泵浦功率为 500 mW 左右时, 没有 2 μm 波段增益, 还未达到激光阈值. 继续增加泵浦功率至 800 mW 左右, 观测到 2 μm 波段单波长激光输出, 调节 PC 出现 Kelly 边带, 如图 2. 图 2(a) 为 Kelly 边带光谱, 图 2(b) 判断其

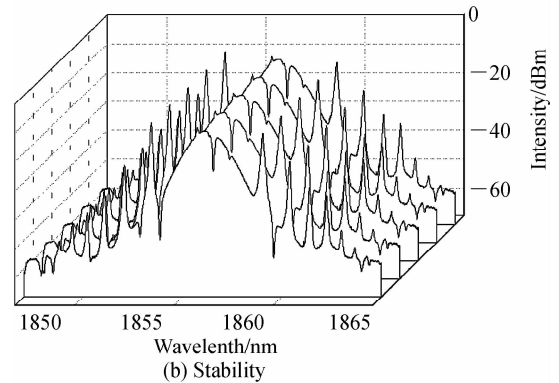
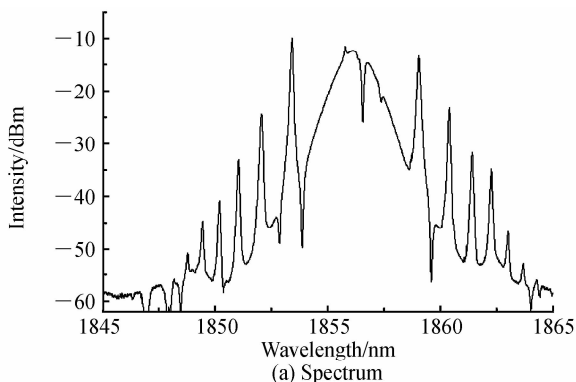


图 2 Kelly 边带光谱和稳定性

Fig. 2 Kelly side band and fluctuation

稳定性. 该结构此时运行在被动锁模状态, 说明非线性偏振旋转未达到饱和^[25-27]. 其被动锁模的原理类似于可饱和吸收体的作用, 低强度的光被吸收继续在腔内振荡, 高强度的光可以通过^[24].

采用一个 20/80 的耦合器将输出信号的 20% 接入 2 μm 波段光电探测器. 探测器的带宽为 10 GHz, 将探测器的输出端接入示波器中, 示波器型号为 Agilent DSO-X 93204A, 带宽为 32 GHz, 采样率为 80GSa/s. 图 3(a)、(b) 为数据处理后的脉冲序列图和单脉冲时域波形. 脉冲的重复频率为 3.178 MHz, 脉冲宽度为 617 ps. 根据重复频率的计算公式 $f = c/nL$, c 为光速, L 为激光器的腔长, n 为折射率系数, 实验结构的腔长约为 64 m, 计算出激光器的重复频率理论值为 3.125 MHz, 与实际测得数值相符.

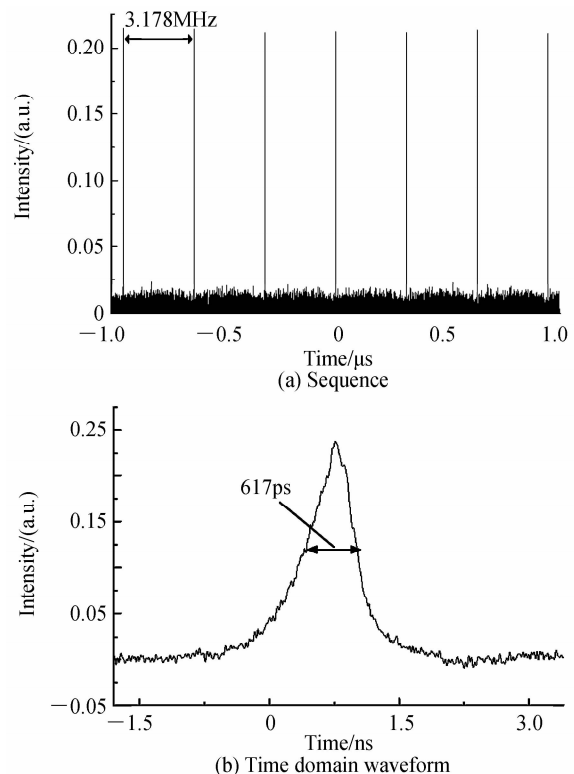


图 3 脉冲输出序列及单脉冲时域波形

Fig. 3 Pulse train output and Single pulse time-domain waveform

当泵浦功率增加到 1 W 时,调节偏 PC,非线性偏振旋转达到饱和^[20-23],传输随光强的增加而减小,峰值功率限制效应有效抑制了腔内的模式竞争.激光器运行在多波长激光输出状态.图 4(a)为泵浦功率为 1 W 时单波长输出,中心波长为 1 857.76 nm,3 dB 线宽为 0.1 nm,边模抑制比为 40 dB.图 4(b)为单波长 1 h 内功率稳定性.

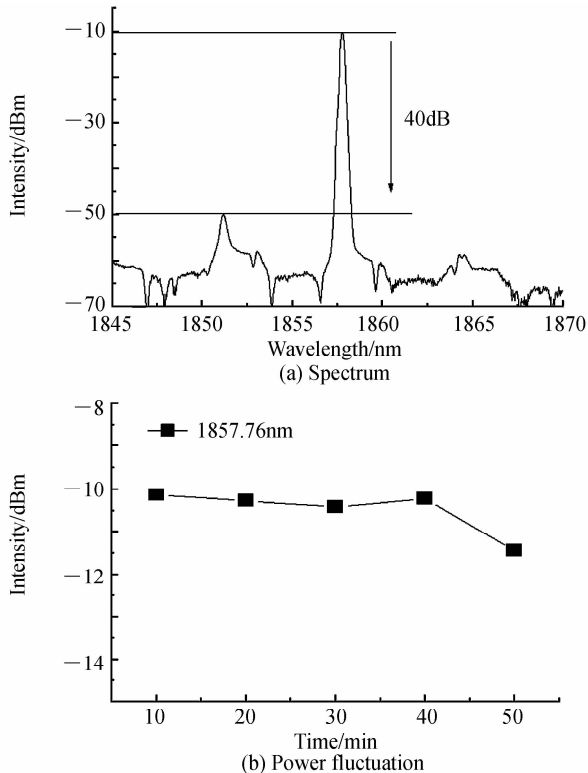


图 4 单波长稳定输出光谱图和一小时功率波动
Fig. 4 Single wavelength stability output and per hour power fluctuation

实验结构获得最多 5 个波长的多波长激光输出,边模抑制比为 45 dB,峰值功率最大差值为 7 dB,如图 5(a).

图 5(b)为 5 波长 1 h 内的功率波动,主要由腔内模式竞争、震动、泵浦源功率波动及光纤弯曲等实验环境因素引起.通过数据图线,可以看出其具有较好的功率稳定性.由于泵浦功率的不足,导致在 5 波长时腔内模式竞争较激烈,无法被抑制,因此功率波动较大.后续研究本实验组会采用更换泵浦源的方法来进一步优化实验结果,以获得更多波长数以及稳定性最佳的激光输出.激光器各个阶段的信噪比达到 40~60 dB,峰值功率最大差值 3~8 dB 等.调节偏振控制器可以改变中心波长的位置以及波长数目,原因可能是由于腔内的损耗改变引起的^[27].

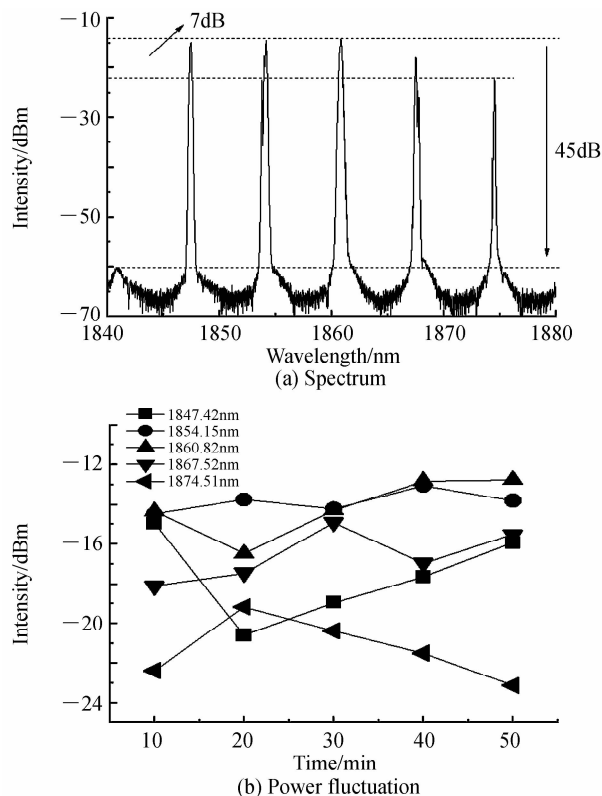


图 5 5 波长稳定输出光谱图和 1 h 功率波动
Fig. 5 Five wavelengths stability output and per hour power fluctuation

3 结论

提出了一种基于非线性偏振旋转效应的多波长掺铋锁模光纤激光器.分别分析了该激光器运行在被动锁模状态以及多波长状态下的工作原理.在室温下,通过对偏振控制器的调节以及泵浦功率的控制,分别实现了脉冲输出和多波长输出.脉冲的重复频率为 3.178 MHz,脉冲宽度为 617 ps.多波长稳定激光输出得到了 1~5 个波长.该结构具有良好的功率和波长稳定性.随着激光通信的飞速发展,对通信光源的要求越来越高,本实验结果为波分复用通信系统光源结构优化提供了重要参考.

参考文献

- [1] LIU Xue-ming, YANG Xiu-feng, LU Fu-yun, *et al.* Stable and uniform dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on fiber Bragg gratings and photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(1): 142-147.
- [2] XU Lei, MA Wan-zhuo, WANG Tian-shu, *et al.* The open interval double Brillouin Raman multi wavelength fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(9): 0906003. 许磊, 马万卓, 王天枢, 等. 全开腔双倍间隔布里渊-喇曼多波长光纤激光器[J]. *光子学报*, 2015, **44**(9): 0906003.
- [3] HE Wei, ZHU Lian-qing, DONG Ming-li, *et al.* Dual-wavelength Erbium-doped fiber laser based on fiber ring filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(8): 0806006.

- 何巍, 祝连庆, 董明利, 等. 基于光纤环形滤波器的双波长掺铥光纤激光器[J]. 光子学报, 2015, **44**(8): 0806006.
- [4] NILSSON J, RAMACHANDRAN S, SHAY T M, *et al.* Introduction to the issue on high-power fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, **15**(1):1-2.
- [5] LOU Qi-hong, ZHOU Jun, ZHANG Hai-bo, *et al.* New progress in large core fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(9): 2235-2241.
楼祺洪, 周军, 张海波, 等. 大芯径光纤激光器的新进展[J]. 中国激光, 2010, **37**(9): 2235-2241.
- [6] WU Jian-feng, JIANG Shi-bin, QUA Tie-qun, *et al.* 2 μm lasing from highly thulium doped tellurite glass microsphere[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(87):211118-211118-3.
- [7] GENG Ji-hong, WU Jian-feng, JIANG Shi-bin, *et al.* Efficient operation of diode-pumped single-frequency thulium-doped fiber lasers near 2 μm [J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(4): 355-357.
- [8] RICHARDS B, TSANG Y, BINKS D, *et al.* Efficient $\sim 2 \mu\text{m}$ Tm 3^{+} -doped tellurite fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(4): 402-404.
- [9] XIA Lin-zhong, DU Ge-guo, RUAN Shuang-chen, *et al.* Cladding pumped high power thulium doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6):1089-1092.
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.
- [10] LI Zhi-hong, HEIDT A M, DANIEL J M O, *et al.* Thulium-doped fiber amplifier for optical communications at 2 μm [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(8): 9289-9297.
- [11] ZHANG Peng, WANG Tian-shu, MA Wan-zhuo, *et al.* Tunable multi-wavelength Tm-doped fiber laser based on the multimode interference effect[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(15): 4667-4671.
- [12] ZHONG Jing-wu, MA Wan-zhuo, ZHANG Peng, *et al.* 2 μm -band multi-wavelength tunable fiber laser research[J]. *Journal of Laser and Infrared*, 2015, (3):262-265.
钟敬武, 马万卓, 张鹏, 等. 2 μm 波段多波长可调谐光纤激光器研究[J]. 激光与红外, 2015, (3):262-265.
- [13] XU Hui-wen, YANG Hua, WEN Shuang-chun, *et al.* Tunable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(9): 2272-2276.
徐慧文, 杨华, 文双春, 等. 基于非线性偏振旋转的可调谐多波长掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2272-2276.
- [14] PENG Wan-jing, YAN Feng-ping, QI Li, *et al.* A 1.97 μm multi-wavelength thulium-doped silica fiber laser based on a nonlinear amplifier loop mirror[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, **10**(11): 115102.
- [15] WANG Xiong, ZHU Ya-dong, ZHOU Pu, *et al.* Tunable, multi-wavelength Tm-doped fiber laser based on polarization rotation and four-wave-mixing effect[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(22): 25977-25984.
- [16] ECKERLE M, KIELECK C, SWIDERSKI J, *et al.* Actively Q-switched and mode-locked Tm 3^{+} -doped silicate 2 μm fiber laser for supercontinuum generation in fluoride fiber. [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(4):512-514.
- [17] BUCCOLIERO D, STEFFENSEN H, BANG O, *et al.* Thulium pumped high power supercontinuum in loss-determined optimum lengths of tellurite photonic crystal fiber [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(6): 061106.
- [18] PHILLIPS C R, LANGROCK C, PELC J S, *et al.* Supercontinuum generation in quasi-phase-matched LiNbO 3 waveguide pumped by a Tm-doped fiber laser system[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(19): 3912-3914.
- [19] KULKAMI O P, ALEXANDER V V, KUMAR M, *et al.* Supercontinuum generation from ~ 1.9 to 4.5 μm in ZBLAN fiber with high average power generation beyond 3.8 μm using a thulium-doped fiber amplifier[J]. *Journal of the Optical of America B*, 2011, **28**(10): 2486-2498.
- [20] HUBNER P, KIELECK C, JACKSON S D, *et al.* High-power actively mode-locked sub-nanosecond Tm 3^{+} -doped silica fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(13): 2483-2485.
- [21] WANG Qing-qing, CHEN Tong, ZHANG Bo-tao, *et al.* All-fiber passively mode-locked thulium-doped fiber ring oscillator operated at solitary and noise-like modes[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(19): 3750-3752.
- [22] KANG Z, LIU M Y, GAO X J, *et al.* Mode-locked thulium-doped fiber laser at 1982 nm by using a gold nanorod saturable absorber[J]. *Laser Physics Letters*, 2015, **12**(4): 045105.
- [23] LI Jian-feng, ZHANG Zu-xing, SUN Zhong-yuan, *et al.* All-fiber passively mode-locked Tm-doped NOLM-based oscillator operating at 2- μm in both soliton and noisy-pulse regimes[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(7): 7875-7882.
- [24] FENG Xin-hua, TAM H, WAI P K A. Stable and uniform multi-wavelength erbium-doped fiber laser using nonlinear polarization rotation[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(18): 8205-8210.
- [25] TANG Ding-yuan, ZHAO Lian-Mei, ZHAO Bin, *et al.* Mechanism of multi-soliton formation and soliton energy quantization in passively mode-locked fiber lasers [J]. *Physical Review A*, 2005, **72**(4): 043816.
- [26] ZHANG Zhen-xing, ZHAN Lin, XIA Xiang-yang. Multi-wavelength Comb generation in self-starting passively mode locked fiber laser [J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2006, **48**(48):1356-1358.
- [27] ZHANG Z, YE Z, XU K, *et al.* Tunable nonlinear-polarization-rotation based multi wavelength fiber laser with in-line fiber filter [C]. Optical Fiber Communication & Optoelectronic Exposition & Conference, 2008. AOE 2008. Asia. 2008:1-3.