

全光纤结构波长可调谐被动锁模掺铥光纤激光器

张怡静, 刘江*, 王璞

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 波长为 $2\ \mu\text{m}$ 的中红外掺铥光纤激光器可广泛应用于激光医疗、人眼安全雷达、非金属材料加工、光电对抗等领域, 具有其他类型光纤激光器不可替代的重要作用。报道了一种全光纤结构波长可调谐被动锁模掺铥光纤激光器。该光纤激光器利用半导体可饱和吸收镜与高双折射率光纤环境实现锁模皮秒脉冲与波长可调谐激光输出。高双折射率光纤环境由 2×2 激光分束器和高双折射光纤组成, 实验中通过改变光纤环境中高双折射光纤的温度, 得到了中心波长可调谐范围为 $1952\sim 1967\ \text{nm}$, 调谐宽度为 $15\ \text{nm}$, 重复频率为 $29\ \text{MHz}$, 最短脉冲宽度为 $6\ \text{ps}$ 的可调谐皮秒脉冲激光输出。

关键词 激光器; 光纤激光器; 波长可调谐; 被动锁模

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1001003

All-Fiber Wavelength-Tunable Passively Mode-Locked Thulium-Doped Fiber Laser

Zhang Yijing, Liu Jiang*, Wang Pu

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract The research on medium-infrared thulium-doped fiber lasers at $2\ \mu\text{m}$ wavelength is widely used in the field of laser medical, eye-safe radar, non-metal material processing, and electro-optical countermeasure system, it has an irreplaceable role compared with other wavelength fiber lasers. An all-fiber wavelength-tunable passively mode-locked thulium-doped fiber laser is reported. This laser realizes picosecond pulses and tunable wavelength by using a semiconductor saturable absorber mirror and a high-birefringence fiber optical loop mirror. This high-birefringence fiber optical loop mirror consists of a 2×2 coupler with output ports spliced to a high-birefringence fiber. The tunable picosecond pulse laser output is obtained by changing the temperature of the high-birefringence fiber in a fiber optical loop mirror. The center wavelength tunable range is from 1952 to $1967\ \text{nm}$, the tuning width is $15\ \text{nm}$, the repetition rate is $29\ \text{MHz}$, and the shortest pulse width is $6\ \text{ps}$.

Key words lasers; fiber laser; wavelength-tunable; passively mode-locked

OCIS codes 140.3510; 140.3070; 320.6629

1 引言

基于全光纤结构设计的超短脉冲激光器因其具有结构紧凑、环境稳定性好、单程增益高、可柔性传输等优点, 在众多领域拥有很好的应用前景^[1]。波长可调谐激光器因其发射波长可以在宽的光谱范围内调谐而广泛应用于光通信、光谱学、医学诊断、皮肤医学和光学仪器检测等领域。波长可调谐激光器可以同时满足多个波长的需求, 相比于使用多个不同发射波长的激光器, 其成本更低、更加方便。与可

调谐的连续光激光器相比, 可调谐的锁模激光器在时域与高强度方面是不可替代的光源, 特别是超短脉冲激光源具有脉冲宽度窄、峰值功率高、频谱范围宽等特点, 高强度的脉冲光束可以激发产生非线性效应^[2]和光致发光效应等, 因此可广泛的应用在光谱学^[3]、多光子显微成像^[4]、激光诱导击穿光谱(LIBS)、光信号处理^[5]、材料加工^[6]等领域。

掺铥光纤具有较宽的增益带宽, 可实现 $1.7\sim 2.1\ \mu\text{m}$ 波段范围内的激光输出^[7-8], 因此可以用于产生宽波长调谐范围的激光源^[9]。目前, 有多种方法

收稿日期: 2018-04-16; 修回日期: 2018-05-16; 录用日期: 2018-05-21

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(61505004)、北京市教委科技计划一般项目(KM201610005028)

* E-mail: liujiang@bjut.edu.cn

能够实现可调谐的锁模掺铥光纤激光器。光纤锥形滤波器^[10],利用不同波长之间的模式干涉,通过控制锥形光纤的拉伸长度实现波长可调谐输出。非线性偏振演化(NPE)^[4]和非线性放大环镜(NOLM)^[11]都是利用线性或非线性的相位转换实现中心波长的调谐输出。此外,还有石墨烯可饱和吸收体^[12]、衍射光栅^[13]、半导体可饱和吸收镜(SESAM)^[14]等方法。

2010年,Fang等^[10]首次实现全光纤结构的波长可调谐被动锁模掺铥光纤激光器,通过改变碳纳米管锁模激光器中的锥形光纤的长度,获得了波长可调谐范围大于50 nm的脉冲激光输出。2015年,Kneis等^[13]利用衍射光栅在掺铥光纤激光器中实现了18 nm调谐范围的脉冲激光输出。2016年,Yan等^[4]利用NPE技术,在掺铥光纤激光器中,实现了波长范围1842~1978 nm的可调谐锁模脉冲激光输出。同年,Mashiko等^[15]报道了掺铥光纤激光器中可调谐的类噪声脉冲,通过使用SESAM与基于望远镜色散的可调谐滤波器,获得了波长从1895 nm到1942 nm的可调谐脉冲输出。2017年,Sun等^[16]通过NPE技术实现了全光纤结构的波长可调谐飞秒掺铥光纤激光器,波长调谐范围为1867~2010 nm,对应脉冲宽度为329~392 fs。同年,Xu等^[14]利用SESAM与光栅型的可调谐滤波器,实现了波长调谐范围为121 nm的脉冲激光输出。同年,Ma等^[17]通过非线性偏振旋转(NPR)技术,利用可调谐滤波器实现了波长范围为1835~1929 nm的可调谐输出,相对应的重复频率为3.085 MHz,脉冲宽度为75 ps。上述报道虽然实现了2 μm波段波长可调谐超短脉冲掺铥光纤激光器输出,但大都利用了空间结构,因此激光器的抗环境干扰性差,制造成本高,很难实现产业化生产。

本文报道了全光纤结构2 μm波段波长可调谐皮秒脉冲掺铥光纤激光器,该光纤激光器利用SESAM与高双折射率光纤环境,实现波长可调谐的皮秒脉冲激光输出。高双折射率光纤环境置于热电冷却仪(TEC)上,通过改变高双折射率光纤的温

度,进而调节激光谐振腔内的损耗,使得不同波长的激光在腔内的损耗不同。实验中获得的可调谐激光,其波长可调谐范围为1952~1967 nm,重复频率为29 MHz,最短脉冲宽度为6 ps。高双折射率光纤环境作为波长可调谐器件,代替了传统的可调滤波器,具有结构简单、成本低廉等优点。

2 实验装置

图1为全光纤结构2 μm波长可调谐皮秒脉冲掺铥光纤激光器的实验装置示意图。该激光器采用线型腔结构设计,谐振腔的总长度约为3 m。激光抽运源采用自制的中心波长为1550 nm的连续掺铥光纤激光器,最大平均输出功率为1 W。抽运光经过1550/2000 nm的波分复用器(WDM)进入掺铥增益光纤(TDF),光纤长度约为2 m,纤芯直径为9 μm,数值孔径为0.16。该增益光纤在1550 nm处纤芯抽运吸收率约为20 dB/m。WDM的信号端与SESAM直接耦合,SESAM作为脉冲调制的光开关,用于产生锁模激光脉冲输出。SESAM来自BATOP公司,其恢复时间为500 fs。掺铥光纤另一端熔接高双折射率光纤环境,高双折射率光纤环境由分束比为50/50的2×2的激光分束器和高双折射率光纤组成。激光分束器的一端熔接一段长为15 cm的高双折射率保偏无源单模光纤(PM-GDF-1550,Nufern,美国),其双折射率为 2.5×10^{-4} 。高双折射率光纤放置在TEC上,通过改变TEC的温度,从而改变不同波长的激光通过光纤环境的损耗,最终获得不同温度下,不同中心波长的激光输出。激光分束器的另外一端作为锁模激光脉冲的输出端,用于测量输出激光的功率和光谱等特征。

实验中分别使用分辨率为0.05 nm的光谱分析仪(AQ6375,YOKOGAWA,日本)和带宽为500 MHz示波器(DSO7052B,Agilent,美国)配合12.5 GHz的InGaAs光电探测器(ET-5000F,EOT,美国)对输出激光脉冲的光谱和时域进行探测,并使用自相关仪(FR-103XL,Femtochrome,美国)对锁模激光脉冲宽度进行测量。

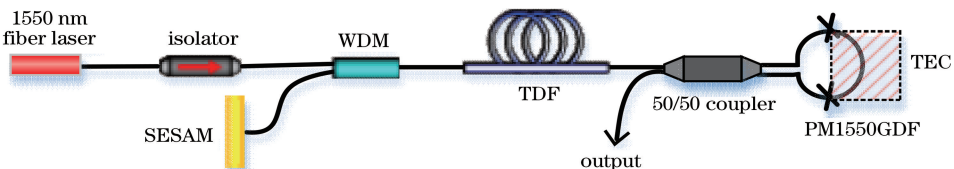


图1 全光纤结构波长可调谐被动锁模掺铥光纤激光器实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the all-fiber wavelength-tunable passively mode-locked thulium-doped fiber laser

3 实验结果与分析

在连续掺铒光纤激光器输出功率为 490 mW 时,将 TEC 固定在某一温度值,此时相应的激光输出波长为 1967 nm,通过示波器和高速光电探头,可观察到光纤激光器开始产生稳定的锁模脉冲。在获得稳定锁模激光脉冲后,改变 TEC 的温度,随着温度的升高,激光输出波长逐渐向短波长方向移动。图 2 为光纤环境中高双折射率光纤温度改变与激光器输出波长变化的曲线图。在稳定锁模状态下,温度从 25 °C 变化到 40 °C,对应的激光波长从 1967 nm 调谐到 1952 nm,调谐宽度为 15 nm。当温度高于 40 °C 时,锁模激光脉冲出现不稳定现象。这与 SESAM 耦合损耗有关^[18]。利用光谱仪测量了不同温度条件下的激光输出光谱,图 3 为全光纤结构波长可调谐被动锁模掺铥光纤激光器的输出光谱图,中心波长从 1952 nm 到 1967 nm 可调,对应 3 dB 光谱宽度为 (2.9 ± 0.1) nm。实验中通过调节高双折射率光纤的温度实现波长的连续可调。图 4 为在相同抽运功率下,不同输出波长对应的激光平均输出功率曲线,可以看出,随着输出波长的增加,平均输出功率也相应增加,在输出中心波长为 1967 nm 处,获得 5 mW 的最大平均输出功率。这主要与掺铥增益光纤的准三能级结构的重吸收作用有关^[19]。观察不同中心波长的激光的脉冲自相光信号可知,在获得稳定锁模状态下,波长范围 1967~1952 nm 的脉冲自相光信号曲线均相似,脉冲宽度在 5 ps 范围内浮动^[14]。图 5 为输出激光的脉冲序列,测得的脉冲重复频率为 29 MHz,此时重复频率与激光器谐振腔的长度相吻合。图 6 为掺铥光纤激光器在输出波长为 1965 nm 处时测得的脉冲自相关信号,其半峰全宽(FWHM)为 9.3 ps。假设脉冲形状为双曲正割型,则激光脉冲宽度为 6 ps。

光纤环境作为一个反射镜,由光定向传输的输出端与输入端连接的耦合器组成,因此,光进入耦合器分成两束,两束光在相反方向传输的光路是相同的,所有的光都重新反射回耦合器的输出端,反射率的大小与光纤端口熔接的质量和分束器的分束比有关^[20]。实验中所使用的高双折射率光纤环境由分束比为 50/50 的激光分束器与一段高双折射率保偏无源光纤组成。相比于传统的光纤环境,高双折射率光纤环境具有双折射效应,使得激光在通过保偏光纤时^[21],由于快轴与慢轴传输常数不同,对应的不同波长反射率不同,因此其光谱滤波作用呈现周

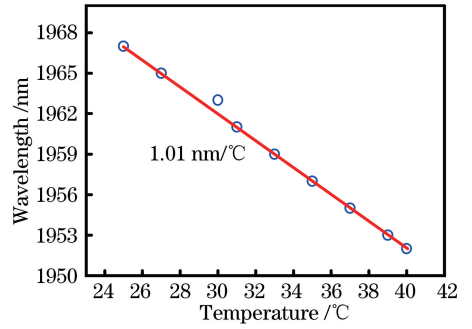


图 2 激光器输出波长随高双折射率光纤温度的变化曲线
Fig. 2 Variation curve of the laser output wavelength with the temperature of high-birefringence fiber

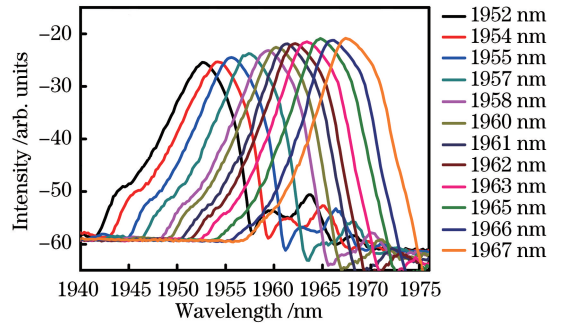


图 3 全光纤结构波长可调谐被动锁模掺铥光纤激光器输出的光谱
Fig. 3 Output spectra of the all-fiber wavelength-tunable passively mode-locked thulium-doped fiber laser

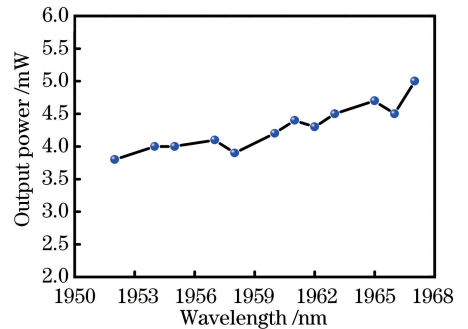


图 4 锁模激光器不同中心波长时的平均输出功率
Fig. 4 Average output power of the mode-locked laser at different central wavelengths

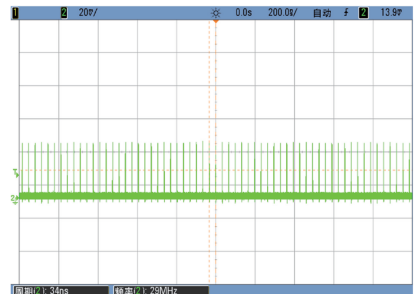


图 5 输出激光脉冲序列
Fig. 5 Output laser pulse train

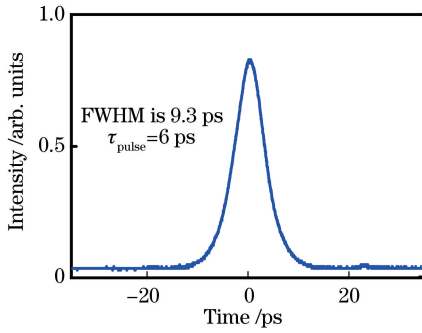


图 6 被动锁模掺铥光纤激光器输出脉冲的自相关信号

Fig. 6 Autocorrelation trace of the passively mode-locked thulium-doped fiber laser

期性,且主要与高双折射率光纤的长度和双折射率有关^[22]。高双折射率光纤环境的反射光谱是波长的函数,表现为周期性变化。其波长调谐周期的公式为

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / (B \cdot L), \quad (1)$$

式中 B 为光纤的双折射率, L 高双折射率光纤的长度, λ 为中心波长^[23]。传输的最小值与分束器的分束比 α 相关,约等于 $(1-2\alpha)^2$,然而传输的最大值取决于高双折射率光纤双折射轴的方向。高双折射率光纤的双折射率对温度很敏感,当光纤温度改变时,高双折射率光纤环境中不同波长的传输损耗也发生改变,所以反射光谱强度发生改变^[24]。

4 结 论

报道了全光纤结构 $2 \mu\text{m}$ 波段波长可调谐皮秒脉冲掺铥光纤激光器,该光纤激光器将高双折射率光纤环境与 SESAM 被动锁模技术相结合,实现波长可调谐的皮秒脉冲激光输出。通过调节高双折射率光纤的温度,进而改变激光谐振腔内的损耗,使不同波长的激光在腔内的损耗不同。实验实现了输出波长从 1952 nm 到 1967 nm 可调谐,重复频率为 29 MHz ,最短激光脉冲宽度为 6 ps 的锁模激光脉冲输出。该波长可调谐超短脉冲掺铥光纤激光器可用作材料光谱表征、气体分子检测等需要多波长以及脉冲光的领域。

参 考 文 献

[1] Liu J, Liu C, Shi H X, *et al.* 203 W all-polarization maintaining picosecond thulium-doped all-fiber laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(19): 194208.
刘江, 刘晨, 师红星, 等. 203 W 全光纤全保偏结构皮秒掺铥光纤激光器[J]. *物理学报*, 2016, 65(19): 194208.

[2] Swofford R L, Albrecht A C. Nonlinear spectroscopy [J]. *Annual Review of Physical Chemistry*, 1978, 29 (1): 421-440.
[3] Rota-Rodrigo S, Ibañez I, López-Amo M. Multi-wavelength fiber laser in single-longitudinal mode operation using a photonic crystal fiber Sagnac interferometer [J]. *Applied Physics B*, 2013, 110 (3): 303-308.
[4] Yan Z Y, Sun B, Li X H, *et al.* Widely tunable Tm-doped mode-locked all-fiber laser [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27245.
[5] Azimipour M, Pashaie R. Nonlinear optical signal processing on multiwavelength sensitive materials [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(21): 4324-4326.
[6] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers [J]. *Nature*, 2003, 424: 831-838.
[7] Liu J, Xu J, Wang Q, *et al.* High-pulse-energy passively mode-locked $2.0 \mu\text{m}$ thulium-doped ultrafast all-fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(6): 0602009.
刘江, 徐佳, 王潜, 等. 高能量全光纤结构被动锁模 $2.0 \mu\text{m}$ 掺铥超短脉冲光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0602009.
[8] Liu J, Tan F Z, Liu C, *et al.* Progress on high-power ultrashort-pulsed thulium-doped fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44 (2): 0201003.
刘江, 谭方舟, 刘晨, 等. 高功率超短脉冲掺铥光纤激光器的研究进展 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201003.
[9] Solodyankin M A, Obraztsova E D, Lobach A S, *et al.* Mode-locked $1.93 \mu\text{m}$ thulium fiber laser with a carbon nanotube absorber [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(12): 1336-1338.
[10] Fang Q, Kieu K, Peyghambarian N. An all-fiber $2\text{-}\mu\text{m}$ wavelength-tunable mode-locked laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(22): 1656-1658.
[11] Jin X X, Wang X, Wang X L, *et al.* Tunable multiwavelength mode-locked Tm/Ho-doped fiber laser based on a nonlinear amplified loop mirror [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(28): 8260-8264.
[12] Yang G, Liu Y G, Wang Z, *et al.* Broadband wavelength tunable mode-locked thulium-doped fiber laser operating in the $2 \mu\text{m}$ region by using a graphene saturable absorber on microfiber [J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(6): 065105.
[13] Kneis C, Donelan B, Berrou A, *et al.* Actively mode-locked Tm³⁺-doped silica fiber laser with wavelength-tunable, high average output power [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1464-1467.

- [14] Xu Z, Dou Z Y, Hou J, *et al.* All-fiber wavelength-tunable Tm-doped fiber laser mode locked by SESAM with 120 nm tuning range[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(21): 5978-5981.
- [15] Mashiko Y, Fujita E, Tokurakawa M. Tunable noise-like pulse generation in mode-locked Tm fiber laser with a SESAM[J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26515-26520.
- [16] Sun B, Luo J Q, Yan Z Y, *et al.* 1867-2010 nm tunable femtosecond thulium-doped all-fiber laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 8997-9002.
- [17] Ma W Z, Wang T S, Zhang Y, *et al.* Widely tunable 2 μm continuous-wave and mode-locked fiber laser [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12): 3342-3346.
- [18] Kivisto S, Hakulinen T, Guina M, *et al.* Tunable Raman soliton source using mode-locked Tm-Ho fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(12): 934-936.
- [19] McComb T S, Sims R A, Willis C C, *et al.* High-power widely tunable thulium fiber lasers [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(32): 6236-6242.
- [20] Frazão O, Baptista J M T, Santos J L. Recent advances in high-birefringence fiber loop mirror sensors[J]. *Sensors*, 2007, 7(11): 2970-2983.
- [21] Noda J, Okamoto K, Sasaki Y. Polarization-maintaining fibers and their applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, 4(8): 1071-1089.
- [22] Mortimore D B. Fiber loop reflectors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6(7): 1217-1224.
- [23] Álvarez-Tamayo R I, Durán-Sánchez M, Pottiez O, *et al.* Theoretical and experimental analysis of tunable Sagnac high-birefringence loop filter for dual-wavelength laser application [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(3): 253-260.
- [24] Álvarez-Tamayo R I, Durán-Sánchez M, Pottiez O, *et al.* A dual-wavelength tunable laser with superimposed fiber Bragg gratings [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(5): 055104.