

基于倾斜光纤光栅的连续可调谐锁模激光器

戴礼龙¹, 邹传杭¹, 黄千千¹, 黄梓楠¹, 凌远达¹, 邢志坤², 闫志君², 牟成博^{1*}

¹上海大学上海先进通信与数据科学研究院, 特种光纤与光接入网重点实验室,
特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444;

²华中科技大学光学与电子信息学院下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 以 45° 倾斜光纤光栅为起偏器, 采用非线性偏振旋转技术, 搭建了一台基于 45° 倾斜光纤光栅和锥型光纤的波长可调谐被动锁模光纤激光器。当输入抽运功率为 454 mW 时, 可实现稳定的锁模脉冲输出, 输出脉冲的中心波长为 1568.8 nm, 输出功率为 2.31 mW, 3 dB 带宽为 4.5 nm, 脉宽为 1.3 ps。锥型光纤作为可调节衰减器, 改变了腔内的损耗, 实现了波长从 1568.8 nm 到 1560.24 nm 的连续可调谐。该激光器可以应用在传感、光谱测量和通信等领域。

关键词 激光器; 锁模光纤激光器; 波长可调谐; 倾斜光纤光栅; 锥型光纤

中图分类号 TN248; TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0508026

Continuously Tunable Mode-Locked Fiber Laser Based on Tilted Fiber Grating

Dai Lilong¹, Zou Chuanhang¹, Huang Qianqian¹, Huang Zinan¹, Ling Yuanda¹,
Xing Zhikun², Yan Zhijun², Mou Chengbo^{1*}

¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract In this study, we demonstrate a wavelength-tunable passively mode-locked fiber laser based on a 45° tilted fiber grating and a tapered fiber using the nonlinear polarization rotation technique. Further, stable mode-locked pulses with a central wavelength of 1568.8 nm and output power of 2.31 mW can be obtained when the input pump power is increased to 454 mW. Accordingly, the 3-dB spectral bandwidth and pulse width are 4.5 nm and 1.3 ps, respectively. Subsequently, the central wavelength of the pulse can be continuously tuned from 1568.8 nm to 1560.24 nm using the tapered fiber as an adjustable attenuator to modulate the cavity loss. The demonstrated fiber laser can be used in several fields, including sensing, spectroscopy, and telecommunications.

Key words lasers; mode-locked fiber laser; wavelength tunable; tilted fiber grating; tapered fiber

OCIS codes 140.3510; 140.3600; 050.2770

1 引 言

近年来, 波长可调谐锁模光纤激光器被广泛运用于生物医学、光谱学、光纤传感器、光学器件和光通信^[1-5]等各个领域, 从而吸引了大量研究者的关注。虽然波长可调谐锁模激光器可通过主动锁模来

实现, 但是大体积、高成本和有限调制带宽等缺点限制了其性能和总体发展, 而被动锁模技术凭借其成本低廉、体积小等优势, 更加适合现代工业发展和科学研究。

被动锁模可通过碳纳米管^[6-7]、石墨烯^[8-9]、黑磷^[10]和过渡金属二硫化物^[11]等物理式可饱和吸收

收稿日期: 2018-12-12; 修回日期: 2019-01-21; 录用日期: 2019-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(61605107, 61505244)、国家青年千人项目、上海市青年东方学者(QD2015027)、天津大学光电信息技术教育部重点实验室开放基金(2018KFKT009)

* E-mail: moucl@shu.edu.cn

体实现,也可凭借基于光纤非线性效应的人造式可饱和吸收体,如基于非线性偏振旋转技术^[12]、非线性光学环镜^[13]和非线性放大环形镜^[14-15]来实现。虽然物理式可饱和吸收体制作简易、状态稳定、操作方便且光纤兼容性好,但是其具有损伤阈值低、调制深度小和输出功率小的缺点;而非线性偏振旋转技术作为一种典型的人造式可饱和吸收体,具有超快恢复时间和大调制深度等特点,可用于产生高能量、窄脉宽的脉冲,因此被大量应用于各种激光器系统中。近年来,45°倾斜光纤光栅(TFG)凭借其低插入损耗、大工作带宽、高偏振相关损耗和全光纤结构等优势,作为优异起偏器已在其他基于非线性偏振旋转技术的被动锁模光纤激光器中得到验证^[16-18]。

锥型光纤具有特殊的波导结构,其光学性质得到较好的应用:利用倏逝场和纳米材料的相互作用,可将锥型光纤和碳纳米管结合作为有效的可饱和吸收体^[19];利用锥型光纤的高非线性效应可产生超连续谱^[20];利用锥型过渡区模间干涉效应,可将锥型光纤作为传感器和滤波器^[21-22];利用锥型光纤敏感的损耗机制,可实现激光器波长的可调谐。相比于其他波长可调谐方法,如法布里-珀罗干涉效应^[23]、商用可调谐滤波器^[24]、光纤双折射效应^[25]和光纤光栅^[26],锥型光纤具有插入损耗小、容易制备和易

于集成等优点,已成为一种有效的波长可调谐器件。Feng等^[27]通过弯曲锥型光纤实现了6 nm的波长可调谐调Q激光器;Ahmad等^[28]通过拉伸锥型光纤实现了4.4 nm的波长可调谐锁模激光器;Melo等^[29]通过弯曲锥型光纤实现了L波段20 nm的连续波可调谐。但是目前基于锥型光纤的波长可调谐锁模光纤激光器的研究较少。

本文搭建了一台基于45°TFG和锥型光纤的波长可调谐被动锁模掺铒光纤激光器。其中腔内45°TFG作为起偏器,可实现非线性偏振旋转技术,锥型光纤作为可变衰减器,可调节腔内损耗,实现有效、重复性高的波长连续可调谐,连续可调谐范围为1560.24~1568.8 nm。

2 核心器件的制备和特性表征

2.1 45°倾斜光纤光栅

45°TFG的原理结构如图1所示,当纤芯内的折射率改变区域以布儒斯特角排列时,光栅将前向传输的纤芯模耦合成包层辐射模和前向传输的纤芯模[即s光(偏振矢量垂直于入射面)的损耗很大,被滤除;而p光(偏振矢量在入射面内)几乎无损耗地通过],因此45°TFG可作为一种理想的光纤起偏器,使非偏振光变成线偏振光。

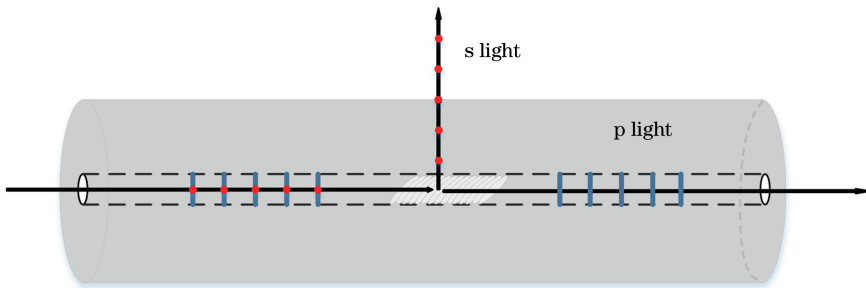


图1 45°倾斜光纤光栅光传输原理图

Fig. 1 Principle diagram of optical transmission of 45° tilted fiber grating

45°TFG通常采用紫外光刻写的相位掩模扫描技术制备,所使用的光纤为商用单模光纤(SMF28e, Corning, 美国),详细制造工艺可参见文献^[30]。采用商用光学矢量分析仪(OVA5000, LUNA, 美国)对45°TFG的偏振相关损耗和插入损耗进行表征,测量波长范围为1525~1610 nm,分辨率为2 pm,其结果如图2(a)、(b)所示。在1550 nm波长处,偏振相关损耗高达32 dB,插入损耗为3.8 dB。考虑到3 dB耦合到包层的辐射模(滤除的s光)和光纤连接以及熔接的损耗,经由45°TFG传播的p光的实际插入损耗很小,可有效实现

锁模。偏振相关损耗光谱图中的抖动来源于辐射模在包层-空气边界中的谐振^[30],需要说明的是,这种抖动并不影响光栅的特性和激光器的性能,可通过将光栅浸入与包层折射率匹配的凝胶或放入热收缩聚合物管来消除抖动。

2.2 锥型光纤

图3(a)为锥型光纤典型结构示意图,该结构可划分为锥腰区和双侧对称锥型过渡区。实验中所使用的锥型光纤是单模光纤(SMF28e, Corning, 美国),SMF28e通过标准的火焰加热拉伸法制备,实验装置如图3(b)所示。去除2~3 cm的单模光纤涂

覆层,用酒精擦拭干净,避免加热过程中引入杂质,增加额外损耗;再将光纤固定在两边以精确控制移动的真空吸附槽,裸光纤部分对准火焰。适当选择火焰高度、拉伸距离和拉伸速度等参数,使单模光纤在火焰

加热融化状态下缓慢、均匀地向两侧拉伸,形成锥型光纤;通过显微观测系统测量锥型光纤的结构参数,测量得到锥腰直径为 $33.82 \mu\text{m}$,锥腰长度为 0.64 mm ,锥腰区直径均匀分布,如图 3(c)所示。

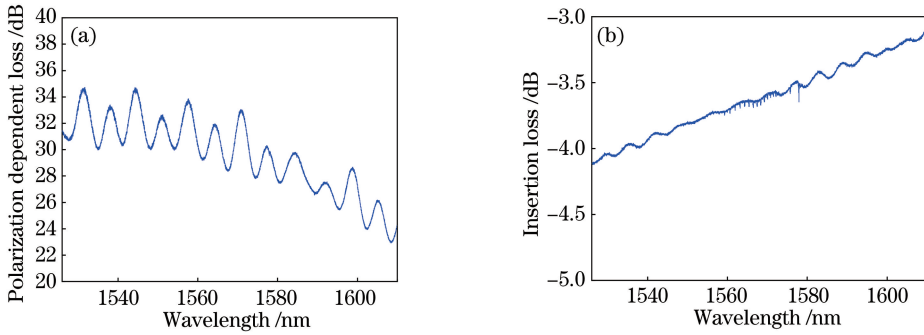


图 2 45°倾斜光纤光栅的特性。(a)偏振相关损耗;(b)插入损耗

Fig. 2 Characteristics of 45° tilted fiber grating. (a) Polarization dependent loss; (b) insertion loss

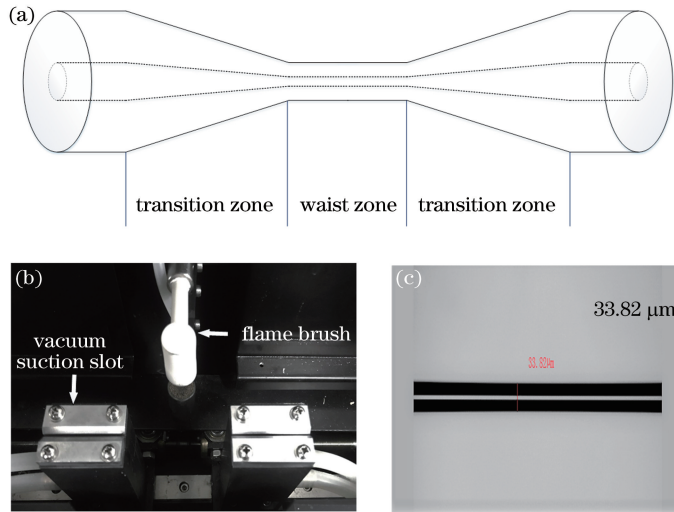


图 3 锥型光纤制备。(a)锥型光纤结构示意图;(b)拉锥装置图;(c)锥腰显微图

Fig. 3 Fabrication of tapered fiber. (a) Structural diagram of tapered fiber; (b) diagram of tapering device; (c) microscopic image of waist zone

图 4(a)为测量锥型光纤传输光谱的实验装置图,图中光源为放大自发辐射(ASE)光源,它是由 980 nm 抽运光通过波分复用器(WDM)进入掺铒光纤激发得到的,锥型光纤连接在光谱仪(AQ6370B, Yokogawa, 日本)与 ASE 光源之间。实验中采用一段等长度的单模光纤作为参考光纤,通过检测功率信号的差值来测量锥型光纤的插入损耗,结果如图 4(b)所示,在 1550 nm 波长处的插入损耗为 0.47 dB。

3 光纤激光器实验装置

波长可调谐被动锁模掺铒光纤激光器的实验装置如图 5 所示,增益介质是长度为 92.2 cm 的掺铒光纤(EDF, Er80-4/125),其在 1530 nm 波长处的吸

收为 $(80 \pm 8) \text{ dB/m}$, 群速度色散 $\beta_2 = +31.9 \text{ ps}^2/\text{km}$;波分复用器(WDM, 980 nm 和 1550 nm 复用)将 980 nm 抽运光(TSLD1100, 光谷互连科技公司,武汉,中国)耦合至激光器内,尾纤是群速度色散 $\beta_2 = +4.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ 的 OFS980 光纤,长度为 187.8 cm,抽运光源的最大功率为 666 mW; 45° TFG 作为光纤起偏器,将其放置于两个偏振控制器(PC1 和 PC2)之间,通过调节偏振控制器改变腔内偏振态,以实现锁模;偏振无关隔离器(PI-ISO)用来确保腔内激光的单向振荡;输出耦合器(OC)将 10%的信号输入到分析仪器中。利用紫外固化胶将锥型光纤的两端分别固定在两个一维水平光学调整架(精度为 $10 \mu\text{m}$)上;通过改变调整架的间距使锥型光纤弯曲。谐振腔内的其他光纤为群速度色散

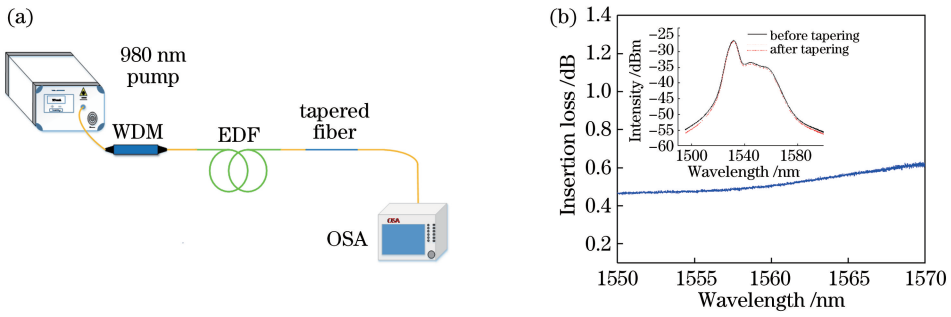


图 4 锥型光纤特性测量。(a)锥型光纤传输光谱测量实验装置图；
(b)锥型光纤插入损耗测量结果图(插图:为锥型光纤拉制前后透射谱)

Fig. 4 Measurements of tapered fiber characteristics. (a) Experimental setup of transmission spectrum measurements of tapered fiber; (b) measurement results of insertion loss of tapered fiber (inset: optical transmission spectra before and after tapering)

$\beta_2 = -22.8 \text{ ps}^2/\text{km}$ 的单模光纤(SMF28e, Corning, 美国), 腔的总长度约为 16 m。考虑到锥腰长度较短, 其产生的色散影响可以忽略不计, 最终得到腔的净色散为 -0.2639 ps^2 。

输出脉冲光谱由光谱分析仪(OSA, AQ6370B, Yokogawa, 日本)观察, 时域脉冲波形由带宽为 12.5 GHz 的光电探测器(818-BB-51F, Newport, 美国)接收, 并由带宽为 8 GHz、采样率为 40 GSa/s 的示波器(DSO90804A, Keysight, 美国)监测, 脉冲频谱信号由电子频谱分析仪(SSA 3032X, Siglent, 深圳, 中国)分析, 脉冲形状和宽度通过一台商用自相关仪(FR-103WS, Femtochrome, 美国)来测量。

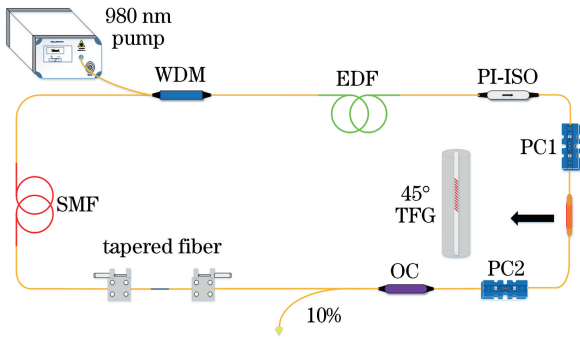


图 5 波长可调谐被动锁模掺铒光纤激光器实验装置图

Fig. 5 Experimental setup of wavelength-tunable passively mode-locked Erbium-doped fiber laser

4 实验结果和分析

当抽运功率为 454 mW 时, 通过调节腔内偏振控制器来改变腔内偏振态, 从而达到稳定的锁模状态。输出脉冲的时域图如图 6(a)所示, 脉冲间隔为 80.6 ns。图 6(b)记录了分辨率为 0.02 nm 时锁模状态输出脉冲光谱图, 典型的边带表明了输出脉冲为经典孤子, 其中心波长为 1568.8 nm, 3 dB 带宽为

4.5 nm。输出脉冲的时间带宽积(TBP)为 0.713, 表明有一定的啁啾, 这主要是由增益光纤的正色散导致的。图 6(c)描述了在带宽为 1 MHz、分辨率为 1 kHz 条件下的射频谱, 可以看出基频为 12.408 MHz, 与 16 m 的腔长相匹配, 此外输出脉冲信噪比(SNR)达到 40 dB, 证明了锁模状态的稳定性。此时输出功率为 2.31 mW, 脉冲能量为 186.17 pJ, 峰值功率为 143.2 W。图 6(b)对应的脉冲形状和宽度如图 6(d)所示, 输出脉冲形状可与双曲正割曲线较好的拟合, 脉冲宽度为 1.30 ps。

保持锁模状态不变, 精细调节一端一维水平光学调整架, 使锥型光纤产生细小弯曲, 从而增加腔内损耗, 因而可将锥型光纤作为可调节衰减器。掺铒光纤的增益谱曲线在 1550~1570 nm 之间, 短波具有更大的增益, 为使激光器正常工作, 补偿腔内额外损耗, 输出脉冲的中心波长向短波方向漂移^[28,31]。如图 7(a)所示, 输出光谱的中心波长从 1568.8 nm 向 1560.24 nm 连续漂移, 其对应的一维水平光学调整架的位移分别为 0, 105, 175, 205, 225, 240, 250, 267, 290 μm 。图 7(b)中, 当增加或减小位移至相同时, 输出脉冲中心波长基本重合, 说明锥型光纤作为可调节衰减器调谐波长时具有可逆性、可重复性和精细调节性。由文献[29]可知, 锥型光纤的损耗随着曲率的增大呈指数型增大, 该结果与图 7(c)相吻合, 所以输出功率和输出脉冲的中心波长随着位移的增加呈指数趋势减小, 脉冲中心波长蓝移, 如图 7(b)、(c)所示。

从图 8(a)可以看出, 随着锥型光纤弯曲度的增加, 相应的插入损耗增大, 所对应的脉冲中心波长出现蓝移, 如图 8(b)所示。

为了进一步分析波长漂移对脉冲的影响, 图 9 记载了不同中心波长下输出脉冲特性的变化。

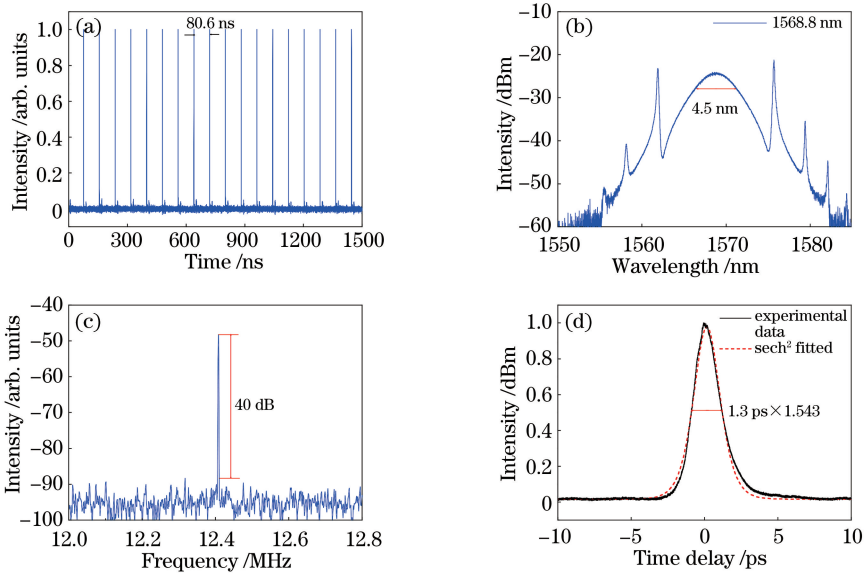


图 6 输出脉冲特性图。(a)时域图;(b)光谱图;(c)频谱图;(d)自相关曲线
Fig. 6 Performances of output pulse. (a) Oscillogram; (b) optical spectrum;
(c) frequency spectrum; (d) autocorrelation curve

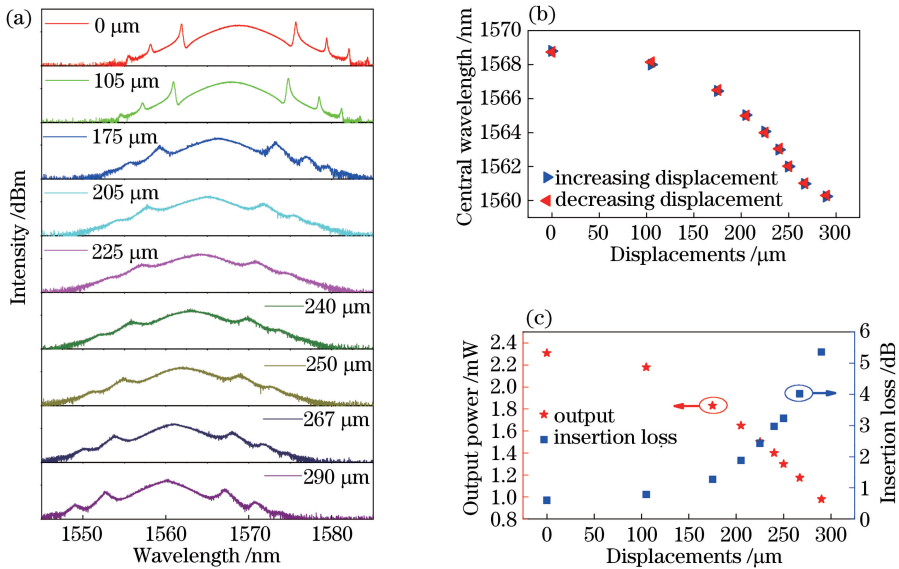


图 7 输出特性随位移的变化图。(a)不同位移下的脉冲光谱;(b)中心波长随位移的变化;
(c)不同位移下的输出功率和插入损耗

Fig. 7 Output characteristics versus displacements. (a) Pulse spectra under different displacements;
(b) central wavelength versus displacement; (c) output power and insertion loss versus displacement

图 9(a)表明峰值功率和脉冲能量均随着中心波长的蓝移而减小,因为弯曲锥型光纤时,锥腰区很短,色散和非线性基本不变,所以脉宽变化很小;且锥型光纤弯曲程度小,谐振腔基频可保持不变;而损耗增加时,输出功率减小,所以峰值功率和脉冲能量都相应地减小,同时峰值功率和平均输出功率有着相似的变化特性。此外,光谱带宽和脉冲宽度随着中心波长的变化呈现出相反的变化趋势。在经典孤子范

围内,光谱的带宽和形状取决于谐振腔内的色散和非线性效应,因而光谱带宽和脉冲宽度不随中心波长呈特征性变化,如图 9(b)所示。

当进一步弯曲锥型光纤时,锁模状态消失,这主要是由锥型光纤弯曲引入的损耗过大引起的。若将锥型光纤弯曲程度复位到之前位置,锁模可以被再次启动。实验表明,这种波长可调谐方式具有良好的可重复性。

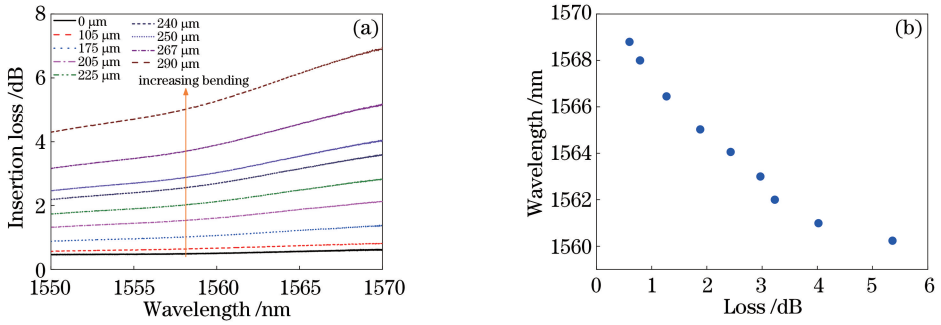


图 8 锥型光纤特性和输出特性随位移的变化。(a)不同位移下的锥型光纤插入损耗；
(b)不同锥型光纤插入损耗下中心波长的变化图

Fig. 8 Characteristics of tapered fiber and output versus displacement. (a) Insertion losses of tapered fiber under different displacements; (b) central wavelength versus insertion loss of tapered fiber

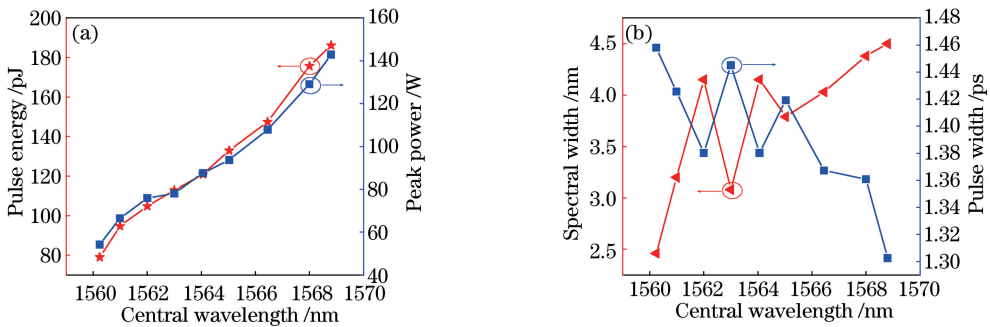


图 9 不同中心波长下的输出脉冲特性。(a)脉冲能量和峰值功率随输出波长的变化；
(b)光谱宽度和脉冲宽度随输出波长的变化

Fig. 9 Characteristics of output pulses with different central wavelengths. (a) Pulse energy and peak power versus output wavelength; (b) spectral width and pulse duration versus output wavelength

5 结 论

通过实验验证了一台基于 45° 倾斜光纤光栅和锥型光纤的波长可调谐被动锁模掺铒光纤激光器。该激光器通过 45° TFG 实现全光纤锁模输出,并通过调节锥型光纤弯曲程度实现了波长范围为 1568.8~1560.24 nm 的可逆连续可调谐,信噪比达到 40 dB。这种全光纤波长可调谐激光器具有重复性高、可精细控制的优点,可作为有效、简易的光源应用在光通信、传感等领域。

参 考 文 献

[1] Zhang A L, Liu H L, Demokan M S, *et al.* Stable and broad bandwidth multiwavelength fiber ring laser incorporating a highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17 (12): 2535-2537.
[2] Perez-Herrera R A, Fernandez-Vallejo M, Diaz S, *et al.* Stability comparison of two quadruple-wavelength switchable erbium-doped fiber lasers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2010, 16(4): 205-211.

[3] Letokhov V S. Laser biology and medicine [J]. *Nature*, 1985, 316(6026): 325-330.
[4] Okhotnikov O, Grudinin A, Pessa M. Ultra-fast fibre laser systems based on SESAM technology: new horizons and applications[J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6(1): 177.
[5] Okhotnikov O G, Gomes L, Xiang N, *et al.* Mode-locked ytterbium fiber laser tunable in the 980-1070-nm spectral range[J]. *Optics Letters*, 2003, 28 (17): 1522-1524.
[6] Ling W J, Xia T, Dong Z, *et al.* Low threshold 1895 nm mode-locked laser based on double wall carbon nanotubes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38 (6): 0614001.
令维军, 夏涛, 董忠, 等. 基于双壁碳纳米管低阈值 1895 nm 锁模激光器[J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0614001.
[7] Rozhin A G, Sakakibara Y, Namiki S, *et al.* Sub-200-fs pulsed erbium-doped fiber laser using a carbon nanotube-polyvinylalcohol mode locker [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(5): 051118.
[8] Zhang H, Tang D Y, Zhao L M, *et al.* Large energy mode locking of an erbium-doped fiber laser with

- atomic layer graphene[J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 17630-17635.
- [9] Guo B, Ouyang Q Y, Li S, *et al.* Dual-wavelength soliton laser based on graphene ternary composite[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0703012.
郭波, 欧阳秋云, 李施, 等. 基于石墨烯三元复合材料的双波长孤子激光器[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0703012.
- [10] Chen Y, Jiang G B, Chen S Q, *et al.* Mechanically exfoliated black phosphorus as a new saturable absorber for both Q-switching and mode-locking laser operation[J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 12823-12833.
- [11] Mao D, She X Y, Du B B, *et al.* Erbium-doped fiber laser passively mode locked with few-layer WSe_2 / $MoSe_2$ nanosheets[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23583.
- [12] Feng X H, Tam H Y, Wai P K A. Stable and uniform multiwavelength erbium-doped fiber laser using nonlinear polarization rotation[J]. *Optics Express*, 2006, 14(18): 8205-8210.
- [13] Ilday F Ö, Wise F W, Sosnowski T. High-energy femtosecond stretched-pulse fiber laser with a nonlinear optical loop mirror[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(17): 1531-1533.
- [14] Yang S, Hao Q, Zeng H P. Repetition rate precision lock of nonlinear amplifying loop mirror passively mode-locked fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0801007.
杨松, 郝强, 曾和平. 非线性放大环形镜被动锁模光纤激光器重复频率精确锁定研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0801007.
- [15] Bowen P, Erkintalo M, Broderick N G R. Large normal dispersion Er-doped fibre laser mode-locked with a nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 447-451.
- [16] Mou C, Wang H, Bale B G, *et al.* All-fiber passively mode-locked femtosecond laser using a 45°-tilted fiber grating polarization element[J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 18906-18911.
- [17] Zhang Z X, Mou C B, Yan Z J, *et al.* Sub-100 fs mode-locked erbium-doped fiber laser using a 45°-tilted fiber grating [J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28297-28303.
- [18] Liu X L, Wang H S, Yan Z J, *et al.* All-fiber normal-dispersion single-polarization passively mode-locked laser based on a 45°-tilted fiber grating[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19000-19005.
- [19] Kieu K, Mansuripur M. Femtosecond laser pulse generation with a fiber taper embedded in carbon nanotube/polymer composite [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(15): 2242-2244.
- [20] Birks T A, Wadsworth W J, Russell P S J. Supercontinuum generation in tapered fibers[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(19): 1415-1417.
- [21] Villatoro J, Monzón-Hernández D, Mejía E. Fabrication and modeling of uniform-waist single-mode tapered optical fiber sensors [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(13): 2278-2283.
- [22] Lacroix S, Gonthier F, Bures J. All-fiber wavelength filter from successive biconical tapers [J]. *Optics Letters*, 1986, 11(10): 671-673.
- [23] Milne J S, Dell J M, Keating A J, *et al.* Widely tunable MEMS-based Fabry-Perot filter[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2009, 18(4): 905-913.
- [24] Sun Z P, Popa D, Hasan T, *et al.* A stable, wideband tunable, near transform-limited, graphene-mode-locked, ultrafast laser [J]. *Nano Research*, 2010, 3(9): 653-660.
- [25] Luo Z C, Luo A P, Xu W C, *et al.* Tunable multiwavelength passively mode-locked fiber ring laser using intracavity birefringence-induced comb filter[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, 2(4): 571-577.
- [26] He X Y, Liu Z B, Wang D N. Wavelength-tunable, passively mode-locked fiber laser based on graphene and chirped fiber Bragg grating[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2394-2396.
- [27] Feng Y L, Li X L, Zhang S M, *et al.* Wavelength tunable Q-switched fiber laser using variable attenuator based on tapered fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(24): 2175-2178.
- [28] Ahmad H, Faruki M J, Tiu Z C, *et al.* Sub-nanometer tuning of mode-locked pulse by mechanical strain on tapered fiber[J]. *Optics Communications*, 2017, 387: 84-88.
- [29] Melo M, Frazão O, Teixeira A L J, *et al.* Tunable L-band erbium-doped fibre ring laser by means of induced cavity loss using a fibre taper[J]. *Applied Physics B*, 2003, 77(1): 139-142.
- [30] Mou C B, Zhou K M, Zhang L, *et al.* Characterization of 45°-tilted fiber grating and its polarization function in fiber ring laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(10): 1905-1911.
- [31] Deepa V, Vijaya R. Effect of pump power on the tuning range of a filterless erbium-doped fiber ring laser[J]. *Applied Physics B*, 2007, 89(2/3): 329-332.