

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.05.13

# 基于复合式微纳光纤锁模器件的单腔多光频梳技术研究

车韬, 杨建军, 刘至立

(北京航空航天大学 电子与信息工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 光纤滤波器与锁模器件作为实现波长复用式单腔双光频梳光源的核心组件受到了研究者的广泛关注。针对传统滤波器对偏振敏感、制作工艺复杂的问题, 研制了一种基于微纳光纤的复合式器件, 采用熔融拉锥方式进行微纳器件的制作, 利用模间干涉产生滤波效应, 利用热泳效应实现光沉积。将该复合器件应用于环形腔中, 实现了 1532, 1543, 1555 nm 的多波长锁模, 且在不同偏振态下, 波长漂移均不高于 0.2 nm。该复合器件为实现单腔双光频梳、单腔三光频梳提供了新的解决方案, 对于促进多光频梳技术在精密测量等领域的应用具有重要意义。

**关键词:** 多光梳; 复合器件; 光纤激光器; 锁模

**中图分类号:** TB96; TN248

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2022)05-0113-06

## Research on single-cavity multi-comb technology based on composite micro-nano fiber mode-locked device

CHE Tao, YANG Jianjun, LIU Zhili

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** As the core components of wavelength multiplexed single-cavity dual-comb light source, fiber filters and mode-locking devices have attracted extensive attention of researchers. In order to solve the problems that the traditional filter is sensitive to polarization and the fabrication process is complex, a composite device based on micro-nano fiber is developed. The micro-nano device is fabricated by means of fused biconical taper, the filter effect is generated by the inter mode interference, and the photo-deposition is realized by the thermophoretic effect. The composite device is applied to a ring cavity, the multi-wavelength mode-locking at 1532, 1543, 1555 nm is achieved, and the wavelength shift is not higher than 0.2 nm at different polarization states. The composite device provides a new solution for the realization of single-cavity dual-comb and single-cavity tri-comb, which is of great significance for promoting the application of multi-comb technology in precision measurement and other fields.

**Key words:** multi-comb; composite device; fiber laser; mode locking

## 0 引言

近年来, 双光频梳测量技术由于其精度高、测量速度快等优势在光谱学测量<sup>[1-2]</sup>、绝对频率测

量<sup>[3]</sup>、距离测量<sup>[4-5]</sup>、泵浦探测<sup>[6]</sup>等领域受到了研究者的广泛关注。单腔双光频梳光源相较传统稳频双光频梳光源复杂度更低, 进一步推动了双光频梳测量技术的发展。研究者们将复用概念

收稿日期: 2022-08-30; 修回日期: 2022-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(62127814)

引用格式: 车韬, 杨建军, 刘至立. 基于复合式微纳光纤锁模器件的单腔多光频梳技术研究 [J]. 计测技术, 2022, 42 (5): 113-118.

**Citation:** CHE T, YANG J J, LIU Z L. Research on single-cavity multi-comb technology based on composite micro-nano fiber mode-locked device [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (5): 113-118.



引入激光器的设计中,形成了以波长复用<sup>[7-8]</sup>、方向复用<sup>[9]</sup>、偏振复用<sup>[10-11]</sup>、波形复用<sup>[12]</sup>为代表的单腔双光频梳光源技术。其中,波长复用技术通过一定的光谱滤波技术对激光器的增益谱进行调控,然后结合相应的锁模技术,最终实现多波长锁模。随着光谱滤波技术与锁模技术的多样化发展,波长复用式单腔双光频梳已成为了热点研究方向。

2011年,赵欣<sup>[7]</sup>等人提出在环形掺铒锁模光纤激光器中引入可调衰减器实现对激光器增益谱调控的方案,该方案通过对损耗的调控,增加了增益谱的利用效率,从而实现了在1530 nm与1560 nm两个区域的同时锁模,两个锁模脉冲的宽度均为亚ps级。为了实现增益谱的进一步调控,2016年赵欣<sup>[13]</sup>等人在环形掺铒锁模光纤激光器中插入带有约0.25 m长的保偏光纤(PMF)尾纤的偏振分束器(PBS),结合腔内偏振控制器的调节,形成具有偏振干涉效应的Lyout滤波器,实现了1533 nm与1544 nm的锁模。2018年,天津大学的胡明列<sup>[14]</sup>等人搭建了“9字”型掺铒锁模光纤激光器,由于腔的不对称性,使得顺时针和逆时针运行的光在耦合器处产生干涉,从而形成Sagnac滤波器,分别在1917 nm和1981 nm处实现了稳定锁模。除了上述传统的光纤滤波形式,以多模干涉原理为基础,采用熔融拉锥技术对光纤进行二次加工从而实现多模干涉滤波器的方案也受到了研究者的关注。2016年,陈杰<sup>[15]</sup>等人使用绝热的微纳光纤滤波器和基于SWCNT-PDMS(单壁碳纳米管-聚二甲硅氧烷)混合物的可饱和吸收体(SA)实现了双波长锁模,其滤波器光谱周期约为5 nm,调制深度约为3%,当泵浦功率达到16.7 mW时,实现了中心波长分别为1559.6, 1564.9 nm的锁模(间隔为5.33 nm),其中1559.6 nm处3 dB光谱带宽为1.0 nm,1564.9 nm处3 dB光谱带宽为1.2 nm。同年,王亚洲<sup>[16]</sup>等人以10 mm/s的拉锥速度制作了微纳光纤滤波器,该器件的插入损耗为2.9 dB,调制深度为3.61 dB,调制周期为7.3 nm,锥腰的直径为7 μm,在890 mW的泵浦功率下,实现了1956.8, 1979.2 nm的锁模,其中1956.8 nm处3 dB带宽为2.32 nm,1979.2 nm处3

dB带宽为2.04 nm。双波长周期是滤波器调制周期的三倍,这是由于掺Tm<sup>3+</sup>光纤的增益带分布不均匀造成的。

另一方面,利用石墨烯、碳纳米管等材料对微纳光纤进行沉积,可以实现损伤阈值更高,可更稳定锁模的光频梳。2019年,杨慧冉<sup>[17]</sup>等人将碳纳米管(CNT)和聚乙烯醇(PVA)细丝缠绕在微纳光纤表面制作SA,该SA具有高损伤阈值,在腔内平均功率高于100 mW的条件下连续运行几个小时,光纤激光器的输出特性没有明显变化。

针对传统波长复用技术需要高性能滤波、锁模器件的问题,基于模间干涉和光沉积原理,研制了一种基于微纳光纤的复合式器件,通过熔融拉锥进行滤波器的制作,并在此基础上利用滴涂CNT的方式实现SA的制作。将该复合器件应用于环形腔中并开展双梳锁模实验,对其滤波及锁模效果进行验证。

## 1 实验原理

根据微纳光纤锥腰半径随长度变化快慢不同而导致基模传输特性的不同,光纤锥可分为两种类型:绝热型和非绝热型。绝热型光纤锥的过渡区域的锥角足够小且变化非常缓慢,整个区域的变化坡度平缓。绝热型的锥型光纤几乎不会产生多模干涉效应,只要拉制过程足够缓慢,就可以满足绝热条件。非绝热型光纤锥的过渡区域的锥角非常大且快速变化,整个区域的变化坡度相对陡峭。光信号在未到达锥区时,以基模(HE<sub>11</sub>)形式在纤芯中传播;拉锥过程会使光纤的半径 $a$ 逐渐变细,使得纤芯外部介质由包层变为空气,包层的折射率 $n_{cl}$ 变小,归一化频率 $V$ 逐渐增大。 $V$ 的计算公式为

$$V = k_0 a (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2} \quad (1)$$

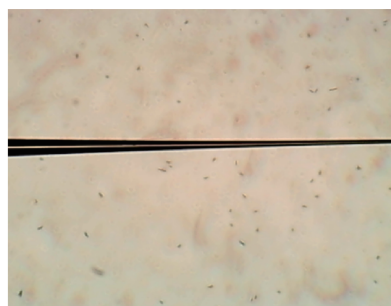
式中: $k_0 = 2\pi/\lambda$ , $\lambda$ 为入射光的波长; $n_{co}$ 为光纤纤芯的折射率。当纤芯的归一化频率大于2.405时,激发了许多高阶模。信号光在通过锥区后,纤芯传播的基模会与高阶模发生耦合,由于基模与高阶模所处的环境不同,所以走过的光程也不同,在耦合处会产生光程差,产生干涉滤波现象<sup>[18]</sup>。一般采用绝热型光纤锥制作锁模器件,采用非绝

热型光纤锥制作滤波器。

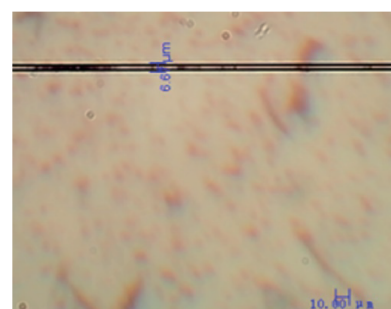
实现双波长锁模除了依靠滤波器，还需要依靠SA作为锁模器件。SA在紧凑性、简单性、灵活性和更短的脉冲持续时间方面具有独特优势。迄今为止，已经报道了多种具有饱和吸收特性的材料，包括石墨烯<sup>[19]</sup>、黑磷(BP)<sup>[20]</sup>、过渡金属二硫属化物(TMDs)<sup>[21]</sup>、拓扑绝缘体(TIs)<sup>[22]</sup>、二维过渡金属碳化物或氮化物(MXenes)<sup>[23]</sup>、碳纳米管(CNT)<sup>[24-25]</sup>等。CNT具有高非线性、低饱和强度和亚皮秒弛豫时间、宽工作带宽和1567 nm处的吸收峰与掺铒光纤激光器(EDFL)的光谱相匹配等优势。2007年，Kieu<sup>[24]</sup>在绝热微纳光纤的表面涂了一层低折射率SWCNT-PDMS混合物，利用这种方式制作的饱和吸收体实现了1530 nm锁模。本课题组也使用该结构实现了非常优秀的锁模效果。与绝热微纳光纤结构相比，使用非绝热结构进行光学沉积，不仅可以有效利用其产生的滤波特性，同时还可以利用沉积CNT之后的饱和和吸收特性。

## 2 复合器件制作

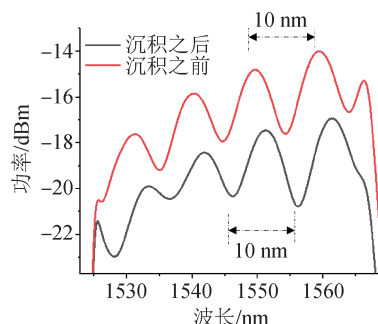
微纳光纤的腰部直径对滤波器的性能有至关重要的影响。为实现更好的波长选择功能，首选调制深度大、插入损耗低的滤波器。为了制作非绝热型微纳光纤，要求拉锥速度相对较大，使得锥形光纤从过渡区至锥腰区的斜率变大，从而增大模式间的干涉，使得滤波效应更加明显。对0.5~1 mm/s拉锥速度进行优化(低于0.5 mm/s为绝热型)，随着拉锥速度的增大，相同拉伸长度下的锥区直径逐渐变小，损耗逐渐增大，当拉锥速度超过1 mm/s时容易发生断裂，当拉锥速度小于0.6 mm/s时会产生较大的锥区直径，不利于光沉积。最终选取0.8 mm/s作为最佳拉锥速度，在此拉锥速度下对2~5 mm的拉伸长度进行优化(当拉伸长度超过5 mm时容易发生断裂，拉伸长度过短则不利于倏逝场的溢出)。随着拉伸长度的增加，锥区直径逐渐变小，损耗逐渐增大，且自由光谱程(FSR)与长度成反比<sup>[16]</sup>，为了获得低损耗、大FSR的双波长锁模器件，最终以0.8 mm/s的拉伸速度，4 mm的拉伸长度进行熔融拉锥，图1(a)为使用光学显微镜拍摄到的微纳光纤图像(放大5



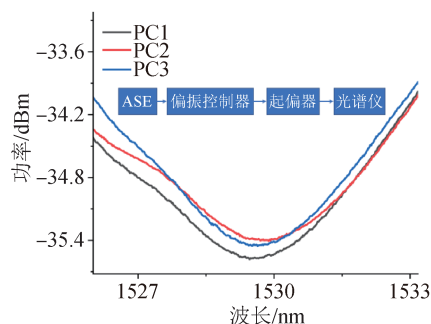
(a) Image of micro/nano fiber waist with a magnification of 5



(b) Image of micro/nano fiber waist with a magnification of 10



(c) Transmission spectrum of micro/nano fiber



(d) Polarization test of micro/nano fiber

图1 微纳光纤腰部显微图像、透射谱及偏振不敏感测试  
Fig.1 Waist micrograph, transmission spectrum and polarization insensitivity test of micro/nano fiber

倍)，可以看到该器件非常明显的过渡区(非绝热)，其中腰部直径为6.66 nm。使用放大自发辐



射 (ASE) 光源测量微纳光纤在 1525~1575 nm 范围内的光谱响应, 如图 1 (c), 可以看到微纳光纤器件的滤波周期为 10 nm, 插入损耗为 3 dB, 调制深度为 4 dB。插入损耗的大小与微纳光纤的直径相关, 随着微纳光纤的腰部直径减小, 调制深度将增大, 插入损耗也将增加<sup>[16]</sup>。将拉好的锥使用光沉积法 (沉积功率为 10 mW, 沉积时间为 5 s, CNT 浓度为 0.1%) 制作可饱和吸收体, 沉积之后的显微图像 (放大 10 倍) 如图 1 (b) 所示, 可以看到光纤表面吸附的 CNT。沉积之后使用 ASE 测得其透射谱如图 1 (c) 所示, 可以看到沉积之后微纳光纤器件的滤波周期仍为 10 nm, 只是调制深度相较于沉积之前有所减小, 这是由于 CNT 沉积到微纳光纤表面之后折射率发生了变化。之后测试复合器件的偏振敏感性, 结果如图 1 (d) 所示, 可以看到 PC1 状态下对应波谷为 1529.6 nm, PC2 状态下对应波谷为 1529.8 nm, PC3 状态下对应波谷为 1529.6 nm, 在不同偏振状态下光谱漂移均小于 0.2 nm, 证明该复合器件对偏振不敏感。

### 3 基于复合器件的双梳实验装置

为了测试该复合器件的多波长锁模能力, 搭建了如图 2 所示的环形激光器结构 (激光器总长度

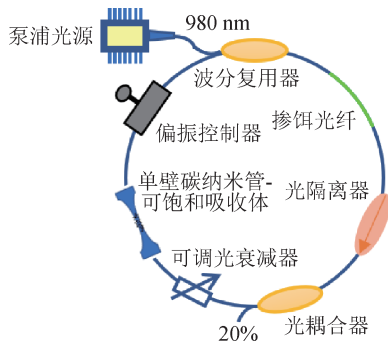


图2 双梳激光装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of dual-comb laser setup

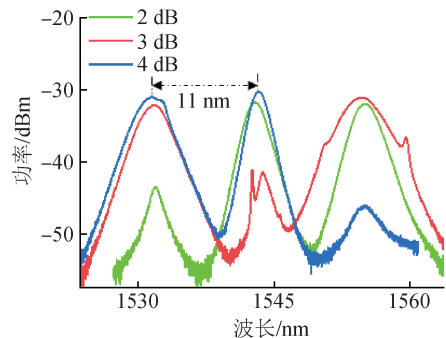
约为 8.54 m)。以 980 nm 半导体激光器作为泵浦光源, 产生的泵浦光通过 980/1550 波分复用器 (WDM) 耦合到 2.3 m 长的掺铒光纤 (EDF) (型号为 Er1022) 内。在 EDF 之后放置一个光隔离器 (ISO) 以确保光在腔内的单向传播。经过 80/20 光耦合器 (OC) 后, 80% 的光返回腔内, 20% 的激光输出用于观测。可调光衰减器用于调节腔内损

耗, 其可调范围约为 0~30 dB。偏振控制器 (PC) 用于调整偏振状态。

实验得到腔内净色散约为 0.01 ps/nm, 表明激光器在反常色散状态下运行。激光输出的光谱由光谱分析仪 (型号为 Agilent 86142B) 测量。脉冲序列由实时示波器 (型号为 Infiniium MS07054A, 500 MHz) 通过 1 GHz 光电探测器 (型号为 New Focus 1611) 检测, 其射频频谱由安捷伦 N9320B 频谱分析仪测量。

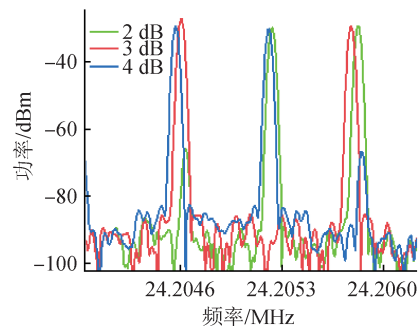
### 4 双波长锁模

将泵浦功率调整至 19 mW, 并使用可调衰减器引入 2 dB 的损耗, 可以实现 1543, 1555 nm 的双波长锁模。在 3 dB 的附加损耗和 20.4 mW 的泵功率下, 可以实现 1532, 1543 nm 的双波长锁模。泵浦功率调整至 21.7 mW, 可调衰减器的损耗增加至 4 dB, 可以实现 1532, 1555 nm 的双波长锁模。它们的光谱及射频 (RF) 谱分别如图 3 (a) 和图 3 (b) 所示, 可以看到滤波周期均为 11 nm, 与沉积完的透射谱滤波周期 (10 nm) 基本一致。



(a) 不同损耗双光频梳的光谱

(a) Optical spectra of the dual-comb with different loss



(b) 不同损耗双光频梳的RF谱

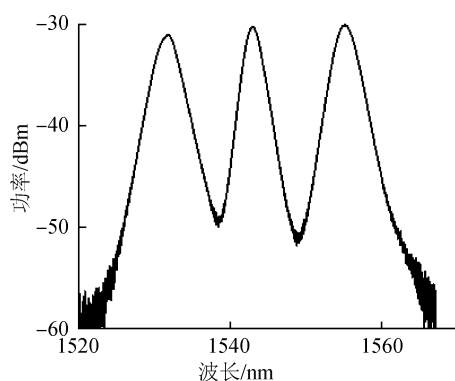
(b) RF spectra of the dual-comb with different loss

图3 不同损耗双光频梳的频域结果

Fig.3 Frequency domain results of the dual-comb with different loss

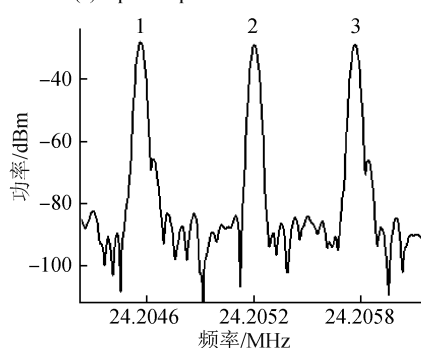
## 5 三波长锁模

通过调节腔内可凋衰减器的损耗 (3.8 dB) 以及泵浦激光的功率, 并配合偏振控制器的调整, 即可轻松实现中心波长分别为 1532, 1543, 1555 nm 的三波长锁模, 如图 4 所示, 其中 1532 nm 处 3 dB 带宽为 3.2 nm, 重复频率  $f_1 = 24.204572$  MHz; 1543 nm 处 3 dB 带宽为 2.3 nm, 重复频率  $f_2 = 24.205203$  MHz; 1555 nm 处 3 dB 带宽为 3 nm, 重复频率  $f_3 = 24.205776$  MHz。图 4 (b) 中, 1 与 2 的重频差  $f_{12} = 631$  Hz, 2 与 3 的重频差  $f_{23} = 573$  Hz。



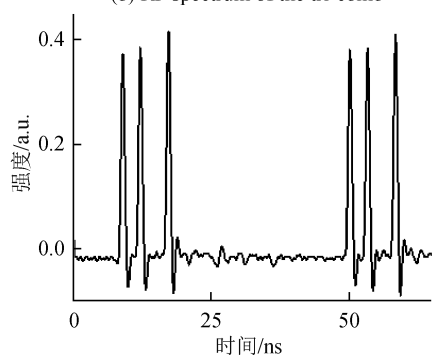
(a) 三光频梳的光谱

(a) Optical spectrum of the tri-comb



(b) 三光频梳的RF谱

(b) RF spectrum of the tri-comb



(c) 三光频梳的时域脉冲序列

(c) Time domain pulse trains of the tri-comb

图4 三光频梳的时域及频域结果

Fig.4 Time domain and frequency domain results of the tri-comb

## 6 结论

针对波长复用式单腔多光频梳传统滤波器对偏振敏感、制作工艺复杂的问题, 研制了一种基于微纳光纤的复合式器件, 该器件同时具有滤波与锁模的功能, 且对偏振不敏感, 可用于实现可切换的双波长锁模以及三波长锁模。该器件为光纤激光器中的多波长和可调谐模式锁定提供了一种简单而紧凑的解决方案, 并为推动多光梳技术的进一步发展提供了有力支撑, 具有技术应用与借鉴价值。

### 参考文献

- [1] CODDINGTON I, SWANN W C, NEWBURY N R. Coherent multiheterodyne spectroscopy using stabilized optical frequency combs [J]. Physical review letters, 2008, 100(1): 13902.
- [2] XU K, MA L H, CHEN J, et al. Dual-comb spectroscopy for laminar premixed flames with a free-running fiber laser [J]. Combustion science and technology, 2021, 194(12): 2523-2538.
- [3] YASUI T, HAYASHI K, ICHIKAWA R, et al. Real-time absolute frequency measurement of continuous-wave terahertz radiation based on dual terahertz combs of photo-carriers with different frequency spacings [J]. Optics express, 2015, 23(9): 11367-11377.
- [4] CODDINGTON I, SWANN W C, NENADOVIC L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range [J]. Nature photonics, 2009, 3(6): 351-356.
- [5] 武腾飞, 韩继博, 白毓, 等. 双光梳绝对距离测量实验研究 [J]. 计测技术, 2022, 42(3): 50-55. WU T F, HAN J B, BAI Y, et al. Research on absolute distance measurement experiment of double optical comb [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(3): 50-55. (in Chinese)
- [6] BARTELS A, HUDERT F, JANKE C, et al. Femtosecond time-resolved optical pump-probe spectroscopy at kilohertz-scan-rates over nanosecond-time-delays without mechanical delay line [J]. Applied physics letters, 2006, 88(4): 41117.
- [7] ZHAO X, ZHENG Z, LIU L, et al. Switchable, dual-wavelength passively mode-locked ultrafast fiber laser based on a single-wall carbon nanotube modelocker and intracavity loss tuning [J]. Optics express, 2011, 19(2): 1168-1173.

- [8] TAO J, FANG Y, SONG Y, et al. Sideband-free tunable and switchable dual-wavelength mode-locked fiber laser based on the Lyot filter and spontaneous radiation peaks [J]. *Optics express*, 2022, 30(10): 17465.
- [9] CHERNYSHEVA M, ARAIMI M A, KBASHI H, et al. Isolator-free switchable uni-and bidirectional hybrid mode-locked erbium-doped fiber laser [J]. *Optics express*, 2016, 24(14): 15721–15729.
- [10] ZHAO X, LI T, LIU Y, et al. Polarization-multiplexed, dual-comb all-fiber mode-locked laser [J]. *Photonics research*, 2018, 6(9): 853–857.
- [11] CUEVAS A R, KBASHI H J, STOLIAROV D, et al. Polarization dynamics, stability and tunability of a dual-comb polarization-multiplexing ring-cavity fiber laser [J]. *Arxiv preprint*, 2022: 04385.
- [12] LIU Y, ZHAO X, HU G Q, et al. Unidirectional, dual-comb lasing under multiple pulse formation mechanisms in a passively mode-locked fiber ring laser [J]. *Optics express*, 2016, 24(19): 21392–21398.
- [13] ZHAO X, TAKESHI Y, ZHENG Z. Dual frequency comb metrology with one fiber laser [C]//*Proceedings of the Real-time Photonic Measurements, Data Management, and Processing II*, F, 2016. Spie.
- [14] LIAO R, SONG Y, LIU W, et al. Dual-comb spectroscopy with a single free-running thulium-doped fiber laser [J]. *Optics express*, 2018, 26(8): 11046–11054.
- [15] CHEN J, ZHANG T, WANG R, et al. Dual-wavelength, dual-comb fiber laser based on a nearly-adiabatic fiber-taper filter [C]//*Proceedings of the Frontiers in Optics*, F, 2016. Optical Society of America.
- [16] WANG Y, LI J, ZHAI B, et al. Tunable and switchable dual-wavelength mode-locked  $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber laser based on a fiber taper [J]. *Optics express*, 2016, 24(14): 15299–15306.
- [17] YANG H, WANG G, LI W, et al. Optical characteristics and application of carbon-nanotube-based saturable absorber with a spiral scheme [J]. *Applied physics express*, 2019, 12(12): 1220131.
- [18] MUSA B, MUSTAPHA K Y, ABUBAKAR M H, et al. Effects of taper parameters on free spectral range of non-adiabatic tapered optical fibers for sensing applications [J]. *Microwave and optical technology letters*, 2016, 58(4): 798–803.
- [19] LAU K Y, ZULKIFLI M Z. 1.56  $\mu\text{m}$  and 1.93  $\mu\text{m}$  synchronized mode-locked fiber laser with graphene saturable absorber [J]. *Infrared physics and technology*, 2021, 112: 103606.
- [20] AHMAD A, RAHMAN M, JOHARI M, et al. Hafnium bismuth erbium co-doped fiber based dark pulses generation with black phosphorus as saturable absorber [C]//*Proceedings of the Journal of Physics: Conference Series*, F, 2021. IOP Publishing.
- [21] WEN S, SU X, WANG Y, et al. Dual-wavelength controllable Q-switched Nd:GSAG laser with molybdenum disulfide saturable absorber [J]. *Infrared physics and technology*, 2022, 120: 103970.
- [22] HARIS H, BATUMALAY M, TAN S J, et al. Mode-locked YDFL using topological Insulator bismuth selenide nanosheets as the saturable absorber [J]. *Crystals*, 2022, 12(4): 489.
- [23] GAO B, LI Y Y, MA C Y, et al.  $\text{Ta}_4\text{C}_3$  MXene as a saturable absorber for femtosecond mode-locked fiber lasers [J]. *Journal of alloys and compounds: an interdisciplinary journal of materials science and solid-state chemistry and physics*, 2022, 900: 163529.
- [24] 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.
- [25] WEI J, LI P, YU L, et al. Mode-locked fiber laser of 3.5  $\mu\text{m}$  using a single-walled carbon nanotube saturable absorber mirror [J]. *Chinese optics letters*, 2022, 20(1): 79–84.

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 车韬 (1992—), 男, 博士, 主要从事单腔双梳锁模激光器研究。