

·特邀综述·

微纳光纤及其锁模激光应用

王利镇, 李林军, 童利民*

浙江大学光电科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 微纳光纤是一种直径接近或小于传输光波长的纤维波导, 由于纤芯和包层折射率差较大, 具有强光场约束、强倏逝场、低损耗、反常波导色散、表面均匀性好和机械性能高等特性。近年来, 以纳米材料作为饱和吸收体的被动锁模激光器成为超短脉冲激光技术方向的研究热点。得益于微纳光纤的强光场约束能力及大比例倏逝场, 纳米材料与微纳光纤的复合结构能显著增强光与物质的相互作用, 进而降低该复合结构的饱和吸收阈值, 为超短脉冲产生和非线性动力学等研究提供一个新颖而灵活的平台。同时, 微纳光纤因具有反常波导色散、光谱滤波、饱和吸收和偏振敏感等特性, 在激光器的色散调控、偏振锁模等方面获得应用。介绍了微纳光纤的制备和特性以及在锁模激光方面的典型应用和相关技术的最新进展, 并就未来的发展方向进行了展望。

关键词 微纳光纤; 锁模激光器; 饱和吸收体; 色散调控

中图分类号 O436; O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0126011

Optical Microfibers and Their Applications in Mode-Locked Fiber Lasers

Wang Lizhen, Li Linjun, Tong Limin*

*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China*

Abstract Optical microfibers or nanofibers are waveguides with diameters close to or smaller than the guided wavelength. Because of the high contrast of the refractive index between the core and cladding material, they have the properties like strong light confinement, enhanced evanescent field, ultralow loss, abnormal waveguide dispersion, excellent surface uniformity and mechanical stability. In recent years, passively mode-locked fiber lasers based on nanomaterials saturable absorber have been a hotspot in the research field of ultrashort pulse generation. Benefitting from strong light confinement and large proportion of evanescent fields, the hybrid structure of nanomaterial and microfiber could enhance light-material interaction significantly and reduce the saturable absorption threshold, thus provide a flexible and innovative platform for the research on ultrashort pulse generation and nonlinear dynamics. Meanwhile, it has the properties of abnormal waveguide dispersion, spectral filtering, saturable absorption and polarization sensitivity, thus it could be applied for dispersion management and polarization induced mode-locking. This review article introduces the fabrication and characteristics of microfiber, its typical applications on mode-locked lasers, and related technology developments. The perspectives for future directions are also mentioned.

Key words microfibers; mode-locked lasers; saturable absorber; dispersion management

OCIS codes 060.4005; 140.4050

1 引 言

微纳光纤(光纤拉锥)是一种直径接近或小于传输光波长的纤维波导, 典型光纤材料包括玻璃(例如氧化硅、磷酸盐、碲酸盐、氟化物玻璃)、聚合物和其他氧化物。由于纤芯和包层(通常为空气或水等低折射率媒介)折射率差较大, 其具有强光场约束、强

倏逝场、低损耗、反常波导色散、表面均匀性好和机械性能高等特性, 在微纳尺度导波、近场光学耦合、谐振腔、激光器、调制器、光学传感、非线性光学、量子和原子光学等方面得到广泛的研究^[1], 成为光纤光学及微纳光子学等领域的前沿研究方向之一^[2]。

有源激光器件是微纳光纤的潜在应用方向之一。该方向的早期研究主要集中在微纳光纤环形

收稿日期: 2018-10-08; 修回日期: 2018-11-07; 录用日期: 2018-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(61475140, 11527901, 61635009)

* E-mail: phytong@zju.edu.cn

激光器方面,例如稀土离子掺杂的微纳光纤结型激光器^[3],此时光纤环直径可以小至毫米量级,结构简单、制作方便,而且还可以通过倏逝波耦合增益的方式工作^[4],大大增加激光器的结构灵活度。2007年,Kieu等^[16]成功研制基于微纳光纤表面吸附碳纳米管饱和吸收体(SA)的光纤锁模激光器,提出并验证微纳光纤用于锁模激光器的可行性。得益于微纳光纤的强光场约束能力及大比例倏逝场,纳米材料与微纳光纤的复合结构能显著增强光与物质的相互作用,进而降低该复合结构的饱和吸收阈值,为超短脉冲产生和非线性动力学等研究提供一个新颖而灵活的平台。同时,微纳光纤具有反常波导色散、光谱滤波、饱和吸收、偏振敏感等特性,可在激光器的色散调控、偏振锁模等方面获得应用。

迄今为止,在与微纳光纤复合饱和吸收材料、微纳光纤色散调控等相关的锁模激光应用方向,特别是微纳光纤复合新型二维材料激光锁模方面,国内外已经有大量研究报道,并获得系列重要研究进展。本文从微纳光纤的制备及特性出发,着重介绍和分析微纳光纤在锁模激光技术方面的典型应用和相关技术的最新进展,并就未来的发展方向进行了展望。

2 微纳光纤制备及特性

微纳光纤的制备方法和制备精度对其传输特性影响较大,在介绍微纳光纤锁模激光器之前,首先介绍微纳光纤的典型制备方法及其光传输特性。

2.1 微纳光纤典型制备方法

微纳光纤的制备方法主要分为高温熔融拉伸、溶液拉伸和化学腐蚀^[5-6],其中高温拉伸法最常用,制备的光纤质量和机械强度也明显优于其他方法。根据加热方式和初始材料的不同,高温拉伸法又可以分为火焰、激光或电加热拉伸等方法,其中最典型、最常用的方法是氢氧焰加热拉伸标准玻璃光纤,典型实验装置如图1所示。实验通过使用质量流量计控制加热氢气流速为100 mL/min左右,加热两端固定在电控拉伸平台上的玻璃光纤,使用计算机程序控制拉伸速度及模式,并通过在光纤中传输1550 nm波长的激光来实时监测拉伸状况,反馈控制微纳光纤制备参数^[7]。

采用这种方法可精确调控光纤直径及长度,拉制的微纳光纤具有表面质量好及透过率高(比如,典型透过率高于95%)等优势。拉制好的微纳光纤一

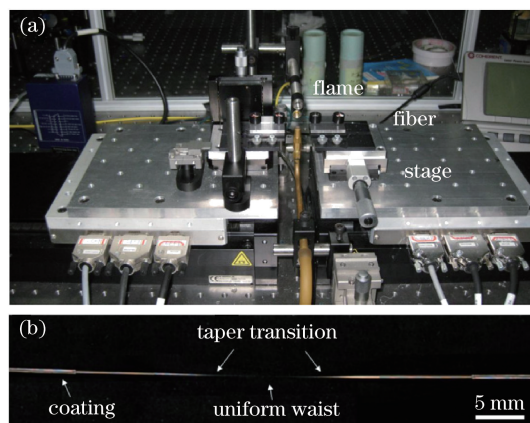


图1 微纳光纤的典型制备方法^[7]。

(a)实验装置;(b)拉制好的微纳光纤

Fig. 1 Typical method of fabricating microfiber^[7].

(a) Experimental setup; (b) microfiber

般需要密封保存,以免吸附环境中的灰尘等污染物,引起额外的光传输损耗。同时,用这种方法拉制好的微纳光纤,其两端是便于熔接的普通单模光纤,有利于全光纤激光器的制作。

目前,用这种方法可控制最小直径约为300 nm,最大长度约为1 m的微纳光纤。当光纤直径在800~1300 nm范围时,直径控制精度可达到5 nm以内^[8]。

2.2 低损耗特性

插入损耗是微纳光纤应用在光纤激光器中必须关注的一个重要参数。采用火焰加热拉伸法制成的双锥形微纳光纤的两端使用光纤熔接机与光纤激光环路连接,可达到很低的插入损耗。比如,在1060 nm波长附近,将一段长度为25 cm、直径为1 μm 的微纳光纤接入光纤环路,插入损耗可低至0.06 dB(如图2所示),几乎可以忽略^[9]。因此,不论是用于吸附饱和吸收体,还是用作色散调控或偏振调控,微纳光纤都不会引入过多额外损耗,是应用

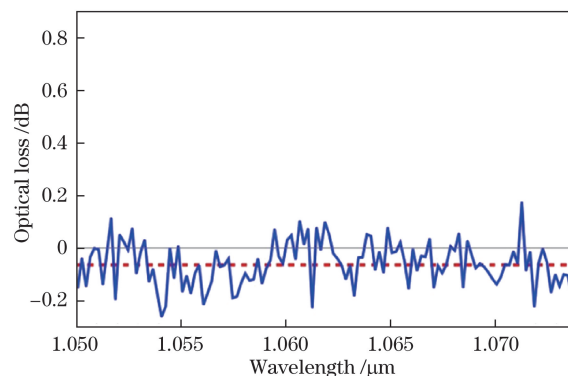


图2 微纳光纤的损耗特性^[9]

Fig. 2 Loss characteristics of microfiber^[9]

在锁模激光器中的良好光学器件。

2.3 强倏逝场特性

计算得知^[10],微纳光纤的直径减小到一定程度后,光在纤芯外传输的倏逝场能量分布比例会随着直径减小而显著增加,有利于在光纤表面增强光与物质的相互作用。因此,在微纳光纤表面吸附或包覆其他纳米材料,是研究光与微量物质相互作用的一种有效方法,以及研究激光锁模新材料的一种常用手段。

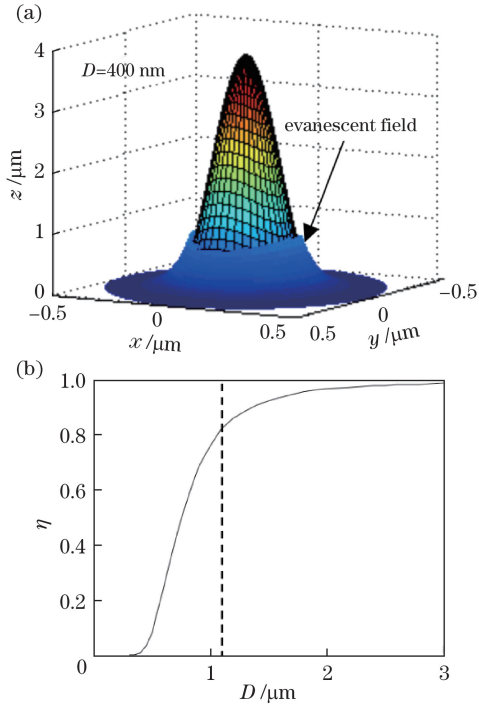


图3 微纳光纤的倏逝场特性^[10]。

(a) Z方向坡印廷矢量分布;(b)芯层中基模的能量比例
Fig. 3 Evanescent fields of microfiber^[10]. (a) Z-direction Poynting vectors of silica wires; (b) fractional power of the fundamental modes inside the core

2.4 色散特性

对于正常直径的光纤,其材料色散往往占主导地位。随着光纤直径的减小,光在光纤外的倏逝场能量分布比例增大,光纤的波导色散逐渐占据主导地位。色散会随直径发生显著改变是微纳光纤的重要光学特性。图4展示了微纳光纤二阶色散随波长的变化情况。在1 μm波段,常见光纤的材料色散为正,但是只要精确控制微纳光纤的直径,则能够表现出负色散的特性;在2 μm波段,常见光纤的材料色散为负,同样能够通过控制微纳光纤的直径来获得正色散。由于具有反常波导色散特性,微纳光纤可以作为色散补偿或啁啾补偿器件应用在锁模激光器中^[9, 11]。

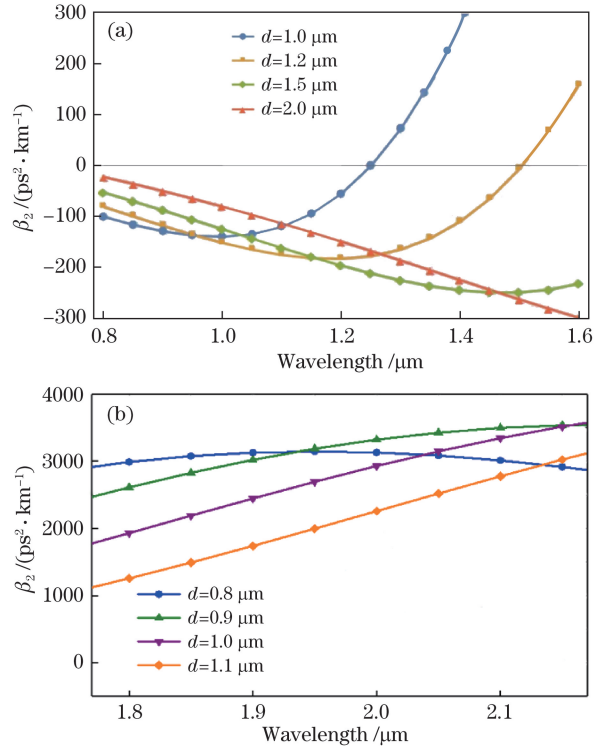


图4 微纳光纤的色散特性^[9,11]。(a)计算得到的1 μm波段二阶色散随波长的变化;(b)2 μm波段二阶色散随波长的变化

Fig. 4 Dispersion characteristics of microfiber^[9,11]. (a) Calculated β_2 at 1 μm versus wavelength; (b) calculated β_2 at 2 μm versus wavelength

3 微纳光纤复合耦合饱和吸收体锁模激光器

基于微纳光纤的大比例倏逝场及强表面场特性,近年来,研究者们通过将碳纳米管、石墨烯或其他纳米材料沉积在微纳光纤表面作为饱和吸收体,以稀土掺杂的商用标准光纤作为增益介质,在环形光纤激光腔中实现超短脉冲输出。微纳光纤复合饱和吸收体结构,能增强光与材料的非线性相互作用,降低材料的饱和吸收阈值,在光纤锁模激光器研究领域获得较多的关注。

3.1 碳纳米管复合微纳光纤锁模激光器

单壁碳纳米管是直接带隙半导体材料,其带隙宽度取决于管径的大小。在共振波长处,单壁碳纳米管表现出很强的非线性吸收特性,而且结构稳定,是作为饱和吸收体的理想材料^[12-15]。2007年,Kieu等^[16]报道了基于光纤拉锥(微纳光纤)复合饱和吸收体的光纤锁模激光器。如图5所示,将长度为30~50 mm,直径为3~7 μm的微纳光纤嵌入碳纳

米管和聚合物的混合物中,得到不易损坏、高效、全光纤饱和和吸收体。随后将其接入环形光纤激光器,

得到中心波长为 1530 nm,平均功率为 23 mW,单脉冲能量为 1.73 nJ,脉宽为 594 fs 的锁模脉冲输出。

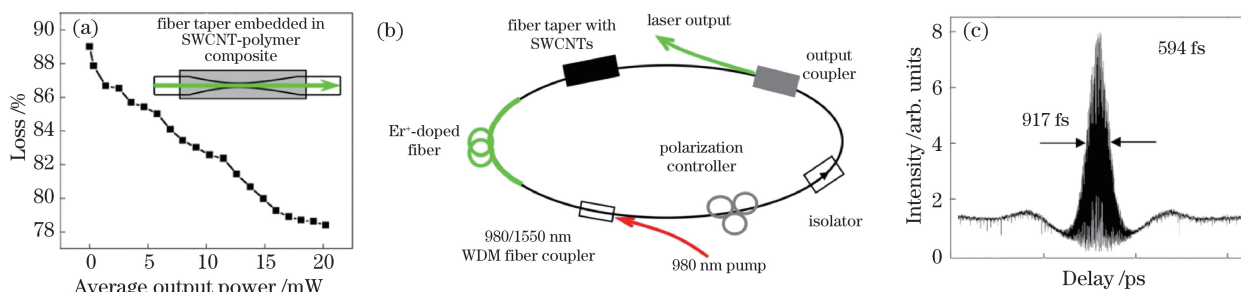


图 5 碳纳米管复合微纳光纤锁模激光器实验结果^[16]。(a)微纳光纤的吸收特性;(b)实验装置;(c)自相关曲线
Fig. 5 Experimental results of mode-locked fiber laser using microfiber-based carbon nanotube saturable absorber^[16].

(a) Absorption of a typical fiber taper; (b) experimental setup; (c) autocorrelation trace

2008 年,该研究组进一步优化结构,研制了全光纤双向被动锁模激光器。如图 6 所示,激光器能够输出两个相反方向的飞秒脉冲,其中心波长为 1560 nm,重复频率约为 15 MHz。顺时针方向

(CW) 的脉冲平均功率为 1.3 mW,光谱宽度为 7 nm,脉冲宽度为 640 fs;逆时针方向 (CCW) 的脉冲平均功率为 1 mW,光谱宽度为 7.7 nm,脉冲宽度为 597 fs^[13]。

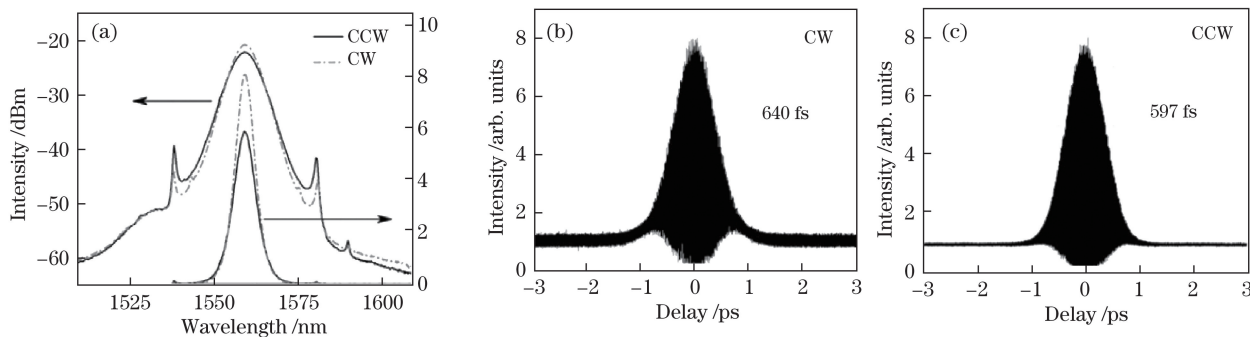


图 6 碳纳米管复合微纳光纤双向锁模激光器实验结果^[13]。(a)光谱;(b)顺时针方向和(c)逆时针方向脉冲的自相关曲线
Fig. 6 Experimental results of bidirectional mode-locked fiber laser using microfiber-based carbon nanotube saturable absorber^[13]. (a) Optical spectra; autocorrelation traces obtained for (b) clockwise pulse and (c) counterclockwise pulse

2009 年,Kashiwagi 等^[17]提出一种通过微纳光纤表面倏逝场产生的光梯度力,将碳纳米管沉积到微纳光纤表面的方法,实验装置如图 7(a)所示。通过控制沉积时间及实时监测透过率,可以在特定目标区域沉积特定量的碳纳米管,并且实验方法简单。

如图 7(c)所示,基于此种饱和吸收体的锁模激光器输出中心波长为 1565 nm,光谱宽度为 3.7 nm,脉冲时间为 1.14 ps,重复频率为 1.54 MHz 的激光脉冲。此后,这种方法被广泛应用于基于微纳光纤复合饱和和吸收体的锁模激光器中。

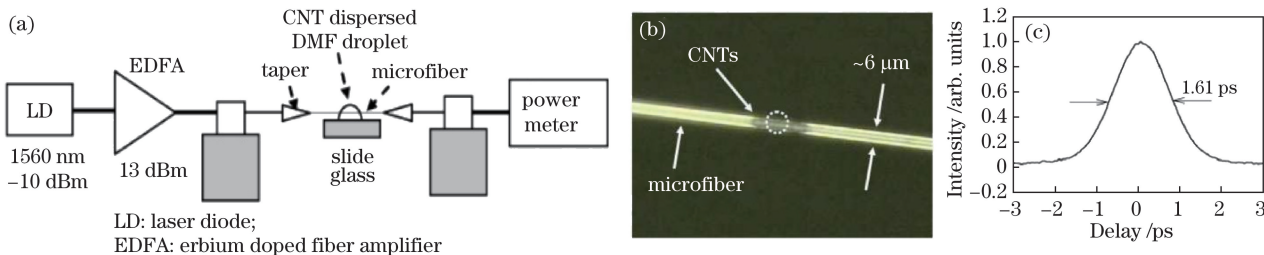


图 7 光沉积碳纳米管复合微纳光纤锁模激光器实验结果^[17]。(a)光沉积实验装置;
(b)沉积碳纳米管的微纳光纤;(c)自相关曲线

Fig. 7 Experimental results of mode-locked fiber laser based on CNT-deposited microfiber^[17]. (a) Experimental setup of optical deposition; (b) CNT-deposited microfiber; (c) autocorrelation trace

2013年, Yu等^[18]将单壁碳纳米管-聚乙烯醇(PVA)溶液沉积到使用氢氟酸腐蚀制备的长度为4 cm、直径为45 μm 的微纳光纤上,如图8(a)所示,得到了中心波长为1556 nm,平均功率为21 mW,带宽为26 nm,重复频率为111.6 MHz,脉冲宽度为114 fs的锁模脉冲输出。2014年,该研究组进一步优化结构,如图8(b)所示,得到了中心波长为1555 nm,平均功率为26 mW,带宽为54 nm,重复频率为146 MHz,脉冲宽度为66 fs的锁模脉冲输出,这是迄今为止在基于碳纳米管饱和吸收体的锁模激光器中脉冲宽度最窄的实验结果^[15]。

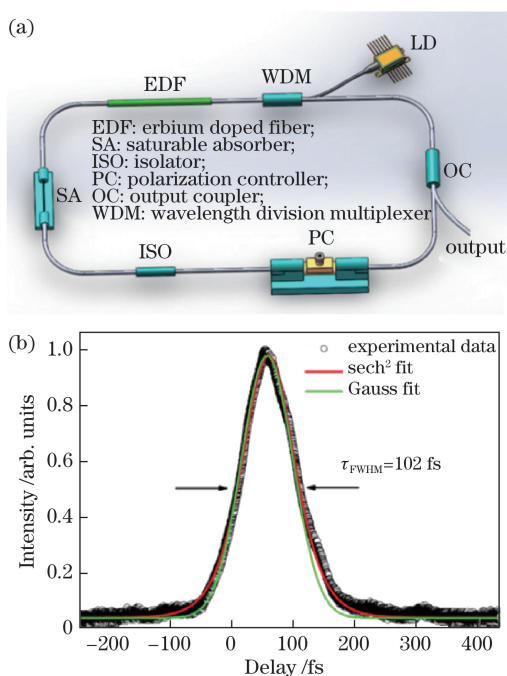


图8 单壁碳纳米管-PVA复合微纳光纤锁模激光器实验结果^[15]。(a)实验装置;(b)自相关曲线

Fig. 8 Experimental results of mode-locked fiber laser using microfiber-based carbon nanotube/PVA saturable absorber^[15]. (a) Experimental setup; (b) autocorrelation trace

总的来说,碳纳米管饱和吸收体具有恢复时间短、调制深度大、损伤阈值高、损耗低和易于集成等优点,已经用于小型商用锁模光纤激光器中。基于碳纳米管复合微纳光纤饱和吸收体的锁模激光器也在不断优化和改进中。

3.2 石墨烯复合微纳光纤锁模激光器

3.2.1 石墨烯-微纳光纤复合结构

2004年, Geim和Novoselov^[19]报道了通过撕胶带法制备的石墨烯及其相关特性后,引发微纳电子学和光子学领域广泛的研究兴趣。在光学方面,得益于其零带隙的线性能带结构,石墨烯在超宽光

谱范围内(从深紫外到中红外)都具有能带填充效应,可用来作为超宽带的光吸收体,而且三阶非线性系数高。然而,作为原子层厚度的二维材料,单层石墨烯只能吸收2.3%的垂直入射光,相应的饱和和吸收效应不够明显。

增强光与石墨烯相互作用最有效的方法是将石墨烯与微纳光波导复合,从而降低该复合结构的饱和和吸收阈值,而微纳光纤是典型的该类波导结构。

常见的石墨烯复合微纳光纤结构如图9所示^[20-21],石墨烯既可以部分贴附在衬底支撑的微纳光纤表面(图9(c)),也可以完全包覆在悬空的微纳光纤表面(图9(b))。通过光学显微镜下的精确微纳操作,石墨烯包覆层的尺寸可以控制在微米量级^[22]。

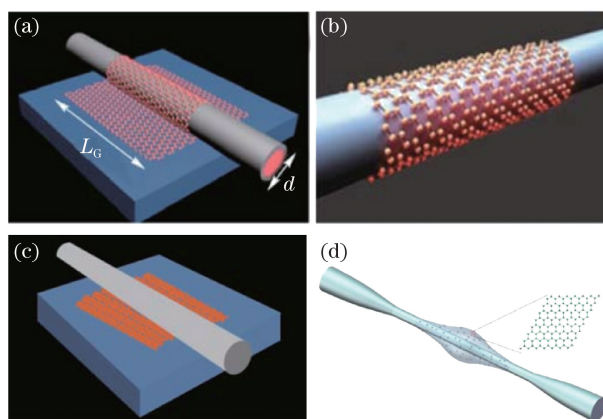


图9 石墨烯与微纳光纤常见的结合方式^[21]。(a)石墨烯贴在微纳光纤上表面;(b)石墨烯包覆微纳光纤;(c)微纳光纤放置在石墨烯上;(d)石墨烯与聚合物混合涂覆在微纳光纤表面^[20]

Fig. 9 Schematics of graphene-microfiber waveguide^[21].

(a) A graphene film coating on the microfiber; (b) graphene film surrounding microfiber; (c) microfiber on the graphene film; (d) graphene/polymer composite embedded on the microfiber^[20]

3.2.2 石墨烯复合微纳光纤锁模激光器

2012年, He等^[23]报道了基于还原氧化石墨烯复合微纳光纤饱和吸收体的锁模激光器(如图10所示)。通过旋涂的方法,将氧化石墨烯沉积在直径为6 μm 的微纳光纤表面,并在惰性气氛下热退火还原氧化石墨烯。此饱和吸收体的调制深度为5.75%,在抽运功率为166 mW时,激光器可输出中心波长为1530 nm,重复频率为7.47 MHz,脉冲宽度为18 ps的超宽带激光双脉冲。

2012年, Luo等^[24]使用光沉积的方法,将还原氧化石墨烯沉积在直径为3.5 μm 的微纳光纤表面,

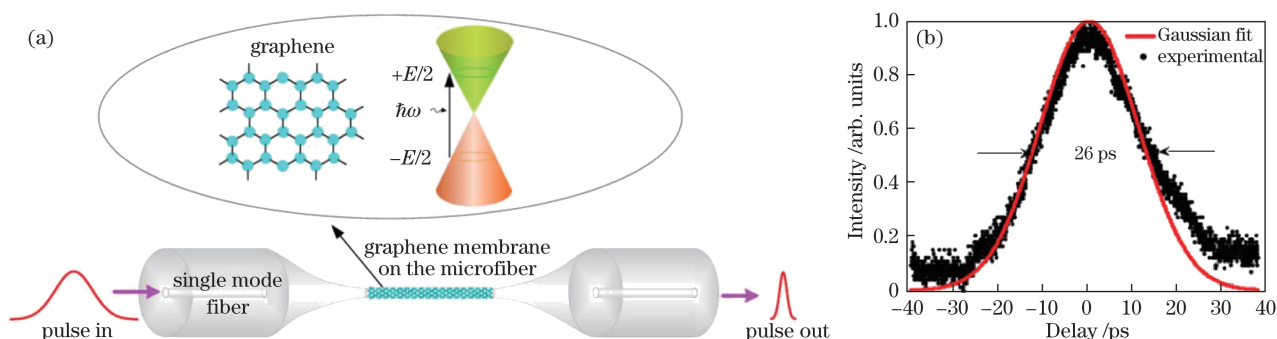


图 10 还原氧化石墨烯复合微纳光纤锁模激光器实验结果^[23]。(a)饱和吸收体示意图;(b)自相关曲线

Fig. 10 Experimental results of mode-locked fiber laser based on a graphene-deposited tapered fiber^[23].

(a) Schematic model; (b) autocorrelation trace

研制出基于此饱和吸收体的多波长耗散孤子锁模激光器。激光器输出的耗散孤子脉冲的中心波长为 1035 nm, 重复频率为 551.5 kHz, 单脉冲能量为 6.4 nJ, 脉冲宽度为 74.6 ps。多波长耗散孤子的形成是腔内色散、光纤 Kerr 非线性、饱和吸收体的光谱滤波效应及非线性偏振旋转效应之间的相互作用导致的。

3.2.3 石墨烯复合微纳光纤锁模激光器

2013 年, Zhu 等^[25]使用光沉积的方法, 研制了基于石墨烯复合微纳光纤饱和吸收体的被动谐波锁模激光器。复合结构可以增强激光腔的非线性效应, 实现高次谐波锁模。激光器能输出中心波长为 1558.5 nm, 谐波阶次 101 次, 重复频率为 555 MHz, 脉冲宽度为 10.45 ps 的锁模脉冲。

2016 年, 伍晓芹等^[22]提出一种将微米尺度的化学气相沉积(CVD)生长的石墨烯转移到亚波长直

径的微纳光纤上的方法, 可将长度在 10 μm 至 10 mm 之间的石墨烯转移到微纳光纤上, 对转移位置和覆盖的长度均可调控, 而且使用该方法转移好的石墨烯与微纳光纤表面的粘力非常强。如图 11 所示, 将 CVD 生长的石墨烯转移到直径为 1 μm 的微纳光纤表面, 石墨烯覆盖长度为 20 μm, 实现低阈值的复合饱和吸收体。得益于其清洁、低损的转移过程以及 CVD 生长的石墨烯的高光学质量, 复合结构的透过率为 73% (不加石墨烯的微纳光纤的透过率为 90% 左右), 饱和吸收阈值功率相比之前的 5 μm 以上直径的微纳光纤石墨烯复合结构显著降低。将该复合饱和吸收体, 接入到掺铒光纤环中, 在抽运功率为 23 mW 时, 获得了中心波长为 1556 nm, 重复频率为 8.6 MHz, 光谱宽度为 5.04 nm, 脉冲宽度为 970 fs 的锁模脉冲输出。

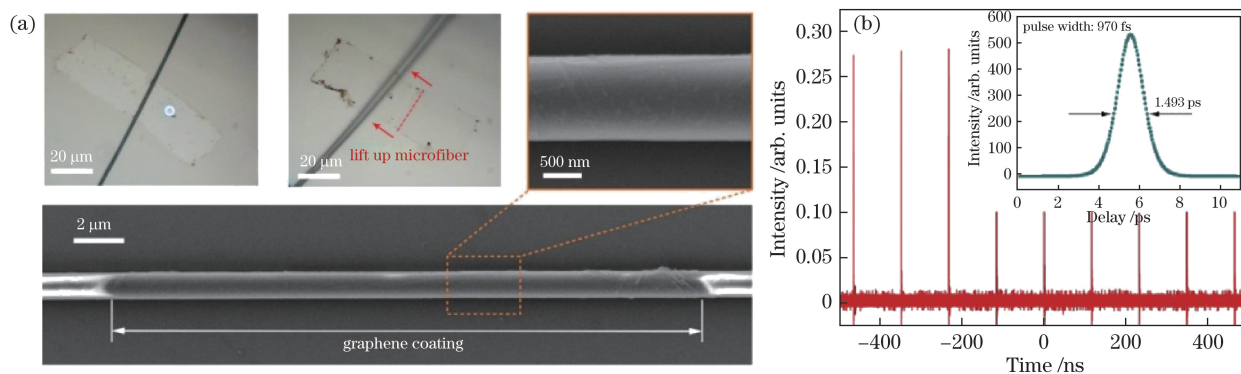


图 11 CVD 生长的石墨烯复合微纳光纤锁模激光器实验结果^[22]。(a)转移过程;(b)脉冲序列时域图及自相关曲线

Fig. 11 Experimental results of mode-locked fiber laser based on graphene-coated microfibers generated by CVD^[22].

(a) Transferring process; (b) laser output pulse train and autocorrelation trace

2015 年, Qi 等^[26]通过研制石墨烯包覆微纳光纤直波导结构和微环谐振器结构的光子器件, 利用耗散四波混频锁模技术, 在 1.5 μm 波段的超快光纤激光器中获得了百 GHz 量级重复频率的脉冲输出。

实验结果表明, 作为高非线性光学器件, 石墨烯微纳光纤复合结构应用在锁模激光领域获得了高重复频率脉冲, 同时为探索相关领域丰富的非线性效应提供了可能。

2016年, Yang等^[27]报道了基于微纳光纤复合石墨烯饱和吸收体的宽带波长可调锁模激光器。如图12所示, 他们将CVD生长的石墨烯覆盖在直径为 $8\ \mu\text{m}$, 长度为2 cm, 插入损耗为0.6 dB的微纳光纤的表面, 并测量其偏振相关损耗。复合结构不仅能够作为优质的饱和吸收体完成锁模, 还可以引起

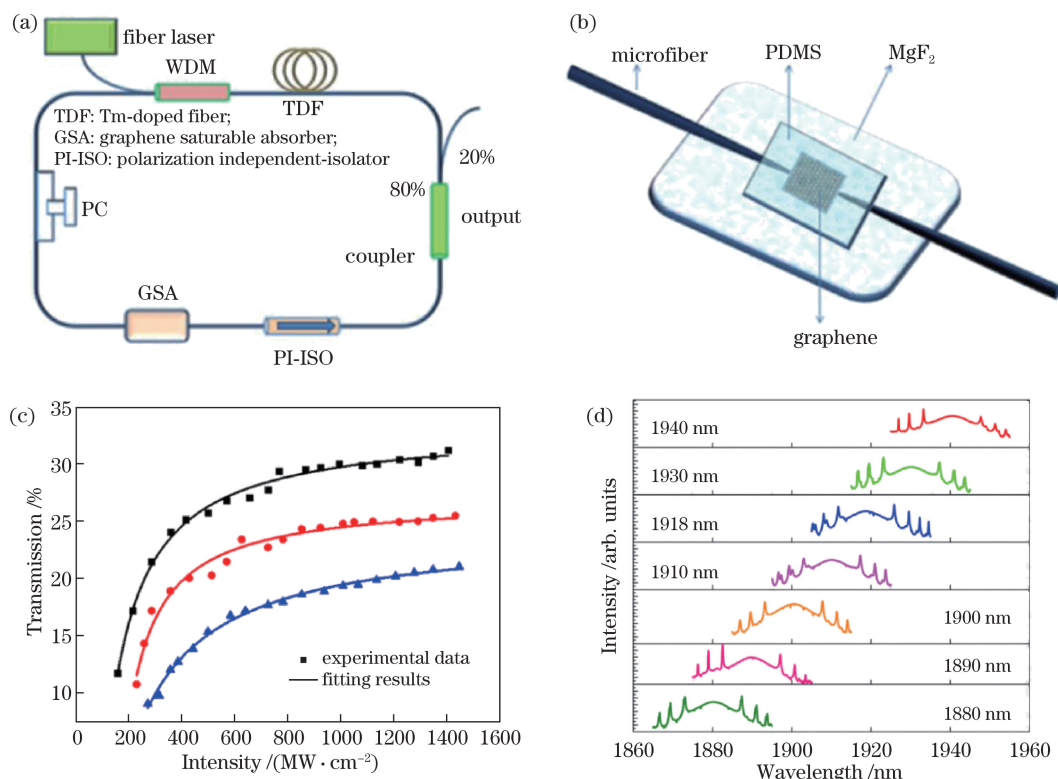


图12 石墨烯复合微纳光纤波长可调锁模激光器实验结果^[27]。(a)实验装置;(b)饱和吸收体示意图;(c)饱和吸收特性测试;(d)光谱

Fig. 12 Experimental results of wavelength tunable mode-locked fiber laser using graphene-based microfiber^[27]. (a) Experimental setup; (b) schematic of the microfiber-based graphene saturable absorber; (c) measured saturable absorption; (d) optical spectra

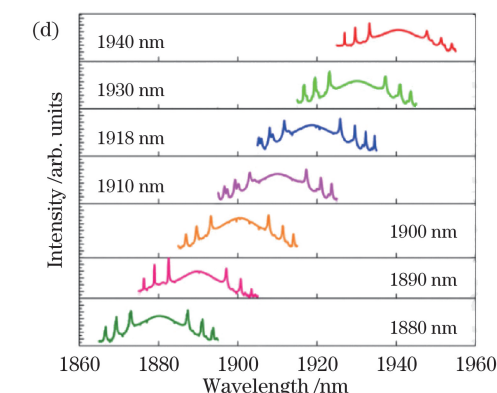
总的来说, 石墨烯作为超宽带吸收的饱和吸收体具有与波长无关的饱和吸收特性、低饱和吸收阈值及较大的调制深度的优势。同时, 与碳纳米管相比, 石墨烯不需要能带调控或直径控制就可以完成宽带吸收。而石墨烯本身的零带隙和较弱的吸收系数, 以及制备石墨烯过程中引入的缺陷将导致性能降低则是制约基于石墨烯饱和吸收体的锁模激光器性能优化的因素。

3.3 类石墨烯二维材料复合微纳光纤锁模激光器

近年来, 受到碳纳米管、石墨烯研究的启发, 具有类石墨烯结构的材料受到广泛关注和研究。大多数单层过渡金属硫化物具有与块体材料不同的特性, 其单层材料为直接带隙半导体。由于过渡金属硫化物带隙不为零并且非线性效应与层数相

关, 通过控制其厚度和缺陷, 过渡金属硫簇化合物在光电子学和电子学等领域将具有重要的应用前景。

偏振效应, 形成具有波长选择性的双折射滤波器。在抽运功率为400 mW时, 通过调整光纤腔内的偏振状态, 锁模波长可以从1880 nm调节到1940 nm。激光器可以输出中心波长为1900 nm, 光谱带宽为4 nm, 重复频率为19.7 MHz, 脉冲宽度为1.9 ps的锁模脉冲。



关, 通过控制其厚度和缺陷, 过渡金属硫簇化合物在光电子学和电子学等领域将具有重要的应用前景。

3.3.1 二硫化钼复合微纳光纤锁模激光器

二硫化钼是目前研究最为广泛的一种过渡金属硫簇化合物。与石墨烯相比, 它具有更强的三阶非线性响应, 已经在宽波长范围内被用作锁模器件^[28-29]。由于二硫化钼的热导率和机械性能不佳, 其热损伤阈值比石墨烯小很多, 这限制了其在激光强度较高时的应用。为克服光致热损伤, 可以采用与倏逝场相互作用的方式来提高其损伤阈值。

2015年, Du等^[30]通过光沉积的方式, 将少数寡层二硫化钼沉积在微纳光纤表面。由于为避免光直接横向照射在二硫化钼上而利用二硫化钼纵向吸收倏逝波的方式, 该复合结构在增强光与物质的相互

作用的同时,大幅提高损伤阈值,激发光功率接近 1 W。同时该结构会对不同偏振状态的光有不同的非线性响应,具有偏振相关的光调制作用。其作为饱和吸收体被应用在全正色散被动锁模激光器中,如图 13 所示,在抽运功率为 210 mW 时,得到了中心波长为 1042.6 nm,重复频率为 6.74 MHz,脉冲宽度为 656 ps 的耗散孤子锁模脉冲输出。

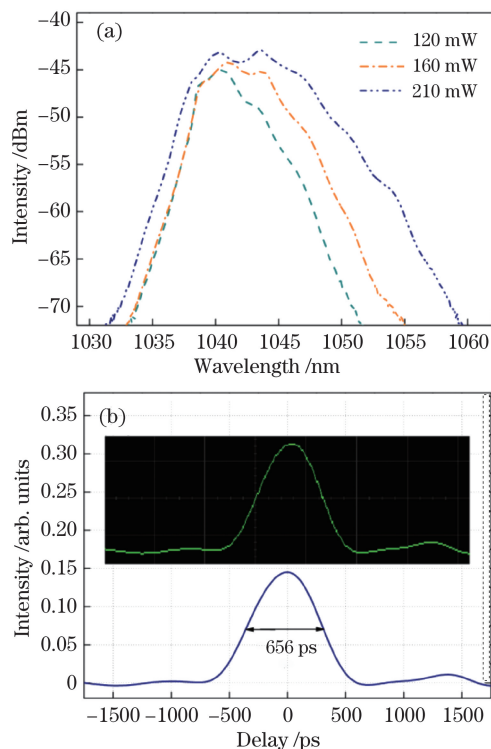


图 13 二硫化钼复合微纳光纤锁模激光器实验结果^[30]。(a) 光谱;(b) 自相关曲线

Fig. 13 Experimental results of mode-locked fiber laser based on MoS₂-taper-fiber device^[30]. (a) Optical spectra; (b) autocorrelation trace

2014 年,Liu 等^[31]将二硫化钼复合微纳光纤饱和吸收体接入掺铒光纤激光器。在抽运功率为

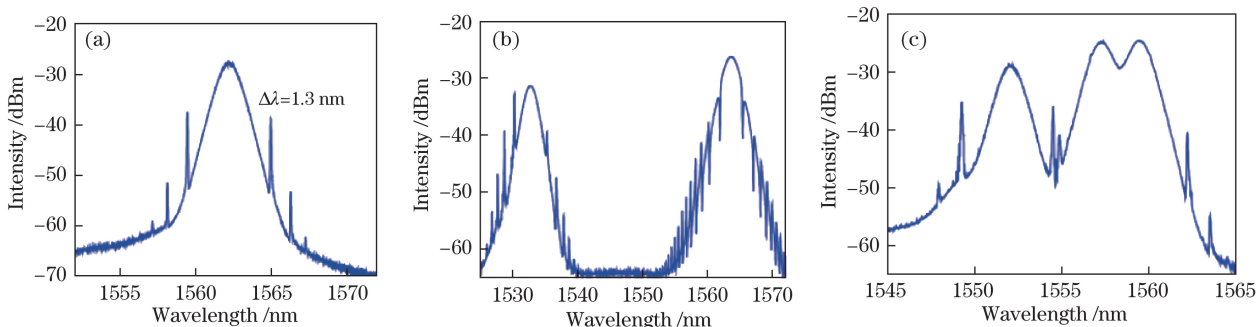


图 14 二硫化钼复合微纳光纤多波长锁模激光器实验结果^[32]。(a) 单波长锁模;(b) 双波长锁模;(c) 三波长锁模

Fig. 14 Experimental results of MoS₂ multi-wavelength mode-locked fiber laser based on MoS₂-wrapped microfiber^[32]. Optical spectra of (a) single-wavelength operation (b) dual-wavelength operation, and (c) triple-wavelength operation

181 mW 时,得到了中心波长为 1556.86 nm,谐波阶次为 369 次,重复频率为 2.5 GHz,脉冲宽度为 3 ps 的锁模脉冲输出。

2017 年,Lu 等^[32]人将 CVD 生长的二硫化钼转移到微纳光纤上,在恰当的偏振控制下,得到单波长、双波长、三波长锁模脉冲输出。如图 14 所示,激光器可以输出中心波长为 1063 nm,重复频率为 1.89 MHz,脉冲宽度为 2.04 ps 的单波长锁模脉冲。

3.3.2 二硫化钼复合微纳光纤锁模激光器

类似地,人们尝试将二硫化钼与微纳光纤结合,用于锁模激光器的研制^[33]。2015 年,Yan 等^[34]将二硫化钼通过光沉积的方式与微纳光纤结合,在抽运功率为 54 mW 时,得到了中心波长为 1558.5 nm,重复频率为 19.58 MHz,脉冲宽度为 675 fs 的锁模脉冲输出;在抽运功率为 395 mW 时,得到了中心波长为 1559.7 nm,重复频率为 1 GHz、脉冲宽度为 452 fs 的谐波锁模脉冲输出。

2017 年,Liu 等^[35]使用光沉积的方式,将二硫化钼沉积在直径为 13 μm、有效长度为 4 mm 的微纳光纤表面;在复合结构的表面镀上金膜,用以保护微纳光纤并避免二硫化钼材料氧化、腐蚀。如图 15 所示,该饱和吸收体的调制深度为 17.2%,阈值功率密度为 34.02 MW/cm²,非饱和吸收率为 59.5%。在抽运功率为 680 mW 时,得到平均功率为 18 mW,中心波长为 1561 nm,光谱宽度为 57 nm,重复频率为 101.4 MHz,脉冲宽度为 246 fs 的锁模脉冲输出。这是迄今为止在基于过渡金属硫化物饱和吸收体的锁模激光器中脉宽脉冲最窄的实验结果。

同年,该研究组将上述方法制备的饱和吸收体接入到基于非线性偏振旋转技术的光纤激光器中^[36]。如图 16 所示,二硫化钼复合微纳光纤饱和吸收体在这种混合锁模激光器中起到了压缩脉冲和

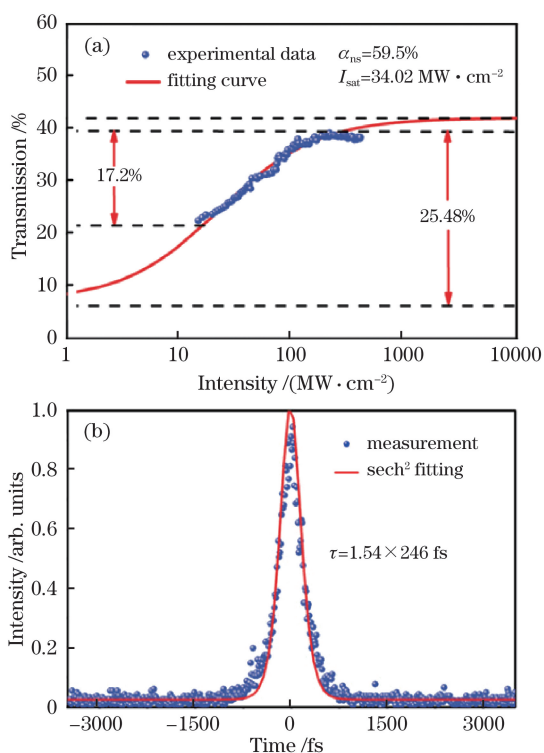


图 15 二硫化钨复合微纳光纤锁模激光器实验结果^[35]。

(a)非线性饱和吸收特性;(b)自相关曲线

Fig. 15 Experimental results of mode-locked fiber laser based on fiber-taper WS₂ saturable absorber^[35].

(a) Non-linear saturable absorption characteristics;
(b) autocorrelation trace

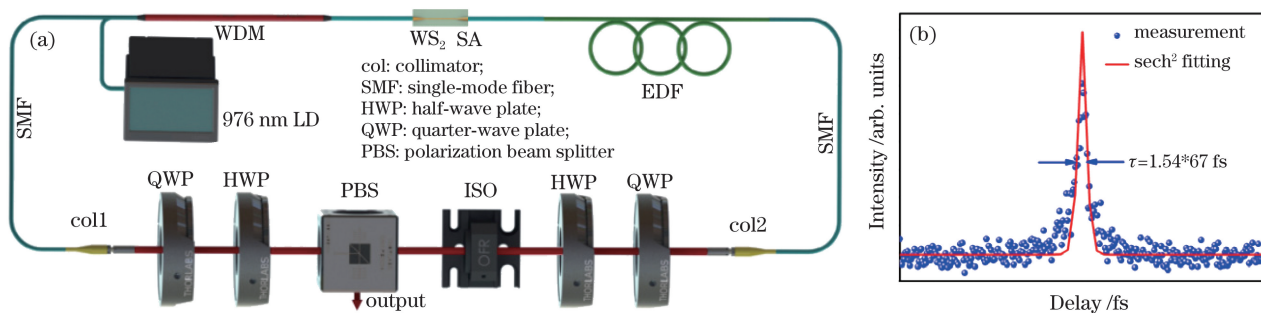


图 16 二硫化钨复合微纳光纤饱和吸收体混合锁模激光器实验结果^[36]。(a)实验装置;(b)自相关曲线

Fig. 16 Experimental results of hybrid mode-locked fiber laser based on fiber-tapered WS₂ saturable absorber^[36].

(a) Experimental setup; (b) autocorrelation trace

到中心波长为 1898 nm,重复频率为 19.2 MHz,脉冲宽度为 1.58 ps 的锁模脉冲输出。通过调整腔内的偏振状态,可以观察到谐波锁模、孤子束等现象,时域波形如图 18 所示。

黑磷的缺点是很难在普通环境中长期稳定存在。通常,在数小时或数天之内,黑磷会因为光致氧化以及对环境中水分的吸收而退化,最后分子结构崩溃、分解。这给黑磷的实际应用带来巨大的挑战。

减小锁模阈值功率的作用,从而获得中心波长为 1540 nm,光谱宽度为 114 nm,重复频率为 135 MHz,脉冲宽度为 67 fs,信噪比为 93 dB 的锁模脉冲输出,这是迄今为止在二维材料作为饱和吸收体的锁模激光器中脉冲宽度最窄、光谱宽度最宽、信噪比最高的实验结果。

3.3.3 黑磷复合微纳光纤锁模激光器

与过渡金属硫化物不同,黑磷(BP)随着其厚度的改变,带隙始终为直接带隙。作为一种小带隙半导体材料,黑磷可以填补零带隙石墨烯与大带隙过渡金属硫化物之间的空白,是近红外和中红外光电子器件的理想材料。独特的各向异性结构使得黑磷具有光学偏振方面的应用^[37]。2015年,Luo等^[38]使用液相剥离的方式制备了少数层黑磷,并用光沉积的方法将黑磷沉积在微纳光纤表面,制备好的饱和吸收体如图 17 所示。这种方法大大提高了黑磷的光学损伤阈值,黑磷和微纳光纤复合的饱和吸收体的平均饱和功率为 4.5 mW,调制深度为 10.9%。在抽运功率为 70 mW 时,得到了中心波长为 1566.5 nm,光谱宽度为 3.39 nm,重复频率为 4.96 MHz,脉冲宽度为 940 fs 的锁模脉冲输出。

2015年,Yu等^[39]将黑磷纳米片以光沉积的方法与直径为 10 μm,长度为 2 cm 的微纳光纤结合,并作为饱和吸收体接入铽钕共掺光纤激光器中。得

3.3.4 其他二维材料复合微纳光纤锁模激光器

除了上述二维材料,二硫化铌、二硒化钨、二碲化钼和二硒化铂等二维材料也可以与微纳光纤结合,作为饱和吸收体用于锁模激光器中。2017年,Lu等^[40]将 CVD 制备的二硫化铌转移到微纳光纤表面,并将其作为饱和吸收体接入掺铒激光器中,得到平均功率为 12 mW,中心波长为 1564.4 nm,谐波阶次为 168 次,重复频率为 318.5 MHz 的锁模脉冲输出。同年,Yin等^[41]将 CVD 制备出的大面积、高

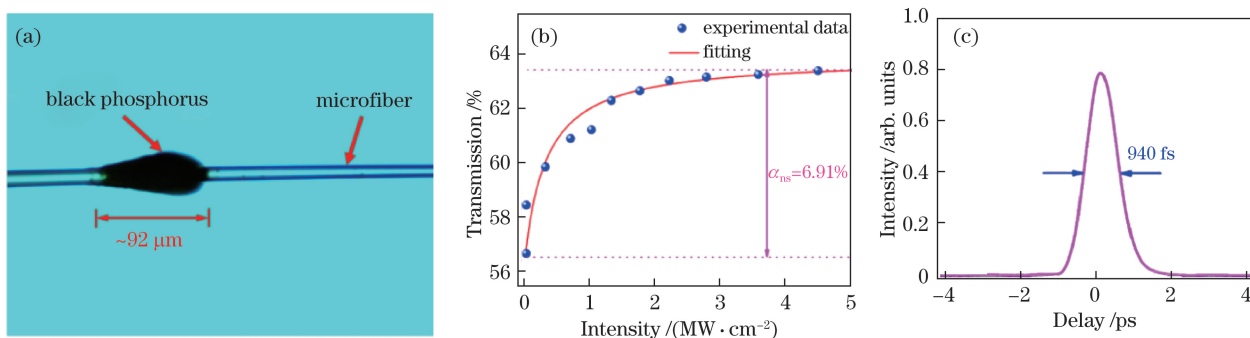


图 17 黑磷复合微纳光纤锁模激光器实验结果^[38]。(a)显微镜下的黑磷复合微纳光纤饱和吸收体；(b)非线性饱和吸收特性；(c)自相关曲线

Fig. 17 Experimental results of mode-locked fiber laser based on BP-deposited microfiber^[38]. (a) Microscopic image of the fabricated microfiber-based BP SA; (b) non-linear saturable absorption characteristics; (c) autocorrelation trace

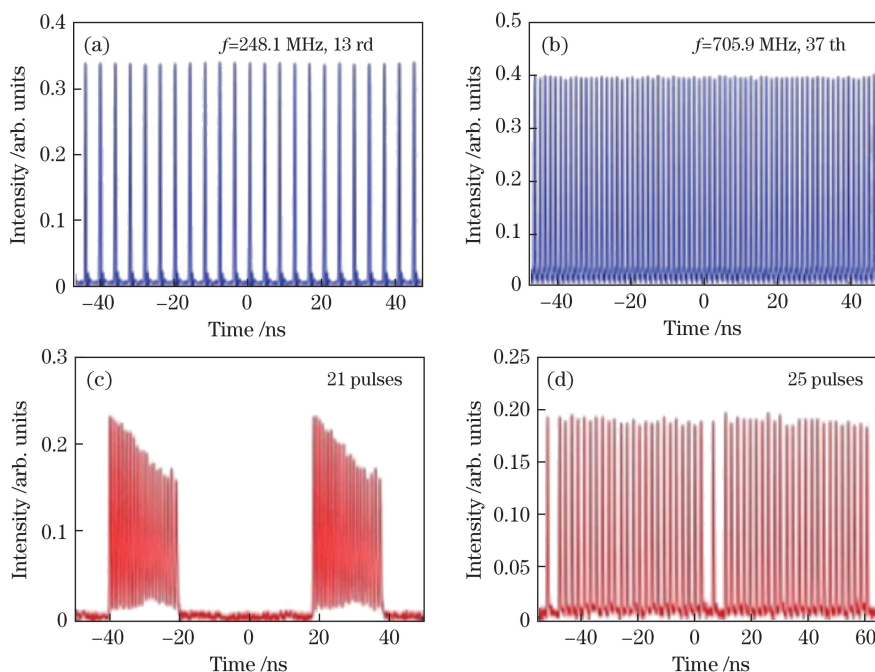


图 18 黑磷复合微纳光纤锁模激光器的谐波锁模、孤子束现象^[39]。(a)谐波阶次为 13 次和(b)37 次时的孤子脉冲；孤子束中孤子数量为(c)21 和(d)25 时的时域输出

Fig. 18 Experimental results of mode-locked fiber laser based on BP-deposited microfiber^[39]. Soliton train for the (a) 13rd and (b) 37th harmonic orders; Temporal characteristics of mode-locked fiber laser with bunched soliton numbers of (c) 21 and (d) 25 in a single bunch

纯度的二硒化钨转移到微纳光纤表面,并将其作为宽带饱和吸收体分别接入掺铒以及掺铊激光器中。在 $1.5 \mu\text{m}$ 波段得到了中心波长为 1556.42 nm , 重复频率为 14.02 MHz , 脉冲宽度为 477 fs 的锁模脉冲输出;在 $2 \mu\text{m}$ 波段得到了中心波长为 1886.22 nm , 重复频率为 11.36 MHz , 脉冲宽度为 1.18 ps 的锁模脉冲输出。2018 年, Wang 等^[42-43] 使用磁控溅射将二硫化钨沉积在微纳光纤表面,并将其作为宽带饱和吸收体分别接入掺铒及掺铊激光器中。在 $1.5 \mu\text{m}$ 波段得到平均功率为 57 mW , 单脉冲能量为 2.14 nJ , 中心波长

为 1559.57 nm , 重复频率为 26.6 MHz , 脉冲宽度为 229 fs 的锁模脉冲输出;在 $2 \mu\text{m}$ 波段得到平均功率为 212 mW 、单脉冲能量为 13.8 nJ , 中心波长为 1934.85 nm , 重复频率为 15.37 MHz , 脉冲宽度为 1.3 ps 的锁模脉冲输出。同年, Zhang 等^[44] 将 CVD 制备的二硒化钨转移到微纳光纤表面,在抽运功率为 80 mW 时,得到中心波长为 1563 nm , 重复频率为 23.3 MHz , 脉冲宽度为 1.02 ps 的锁模脉冲输出。

3.4 其他微纳光纤耦合饱和吸收体锁模激光器
拓扑绝缘体^[45-49]、金纳米棒、Bismuthene 等纳

米材料也可以与微纳光纤结合,作为饱和吸收体用于锁模激光器中。

3.4.1 拓扑绝缘体复合微纳光纤锁模激光器

拓扑绝缘体有非拓扑平庸的窄带隙,具有类似石墨烯的超宽带饱和吸收特性,因此也可被用于激光锁模。2013年,Luo等^[50]使用光沉积的方法将拓扑绝缘体三碲化二铋沉积到微纳光纤表面,制备的饱和吸收体如图19(a)所示。该复合结构作为饱和吸收体和高非线性器件被接入掺铒光纤激光器,在抽运功率为154 mW时,得到中心波长为1558.5 nm,光谱宽度为1.08 nm,谐波阶次为418次,重复频率为2.04 GHz,脉冲宽度为2.49 ps的谐波锁模脉冲。

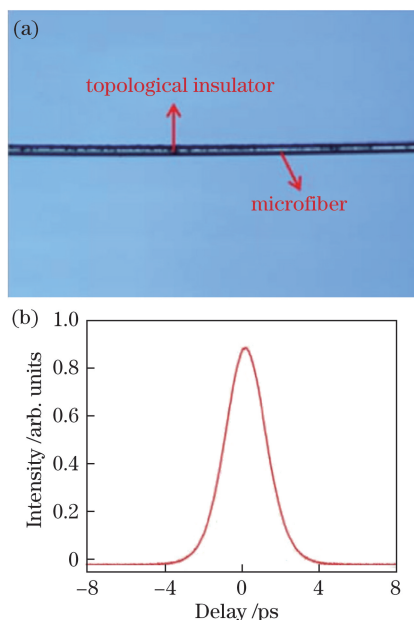


图19 拓扑绝缘体复合微纳光纤锁模激光器实验结果^[50]。(a)显微镜下的拓扑绝缘体复合微纳光纤饱和吸收体;(b)自相关曲线

Fig. 19 Experimental results of mode-locked fiber laser by a microfiber-based topological insulator saturable absorber (TISA)^[50]. (a) Microscopy image of the microfiber-based TISA; (b) autocorrelation trace

2015年,Yan等^[46]使用光沉积的方法将拓扑绝缘体三碲化二铋沉积到微纳光纤表面。如图20所示,复合结构的插入损耗为1.25 dB,饱和强度为26.7 MW/cm²,调制深度为5.7%、非饱和损耗为20.5%。在抽运功率为48 mW时,得到中心波长为1560.8 nm,光谱宽度为9.15 nm,重复频率为18.55 MHz,脉冲宽度为286 fs的锁模脉冲输出。

3.4.2 量子点复合微纳光纤锁模激光器

2017年,Du等^[51]将平均大小为(2.6±0.9) nm的黑磷量子点以光沉积的方式沉积在微纳光纤表

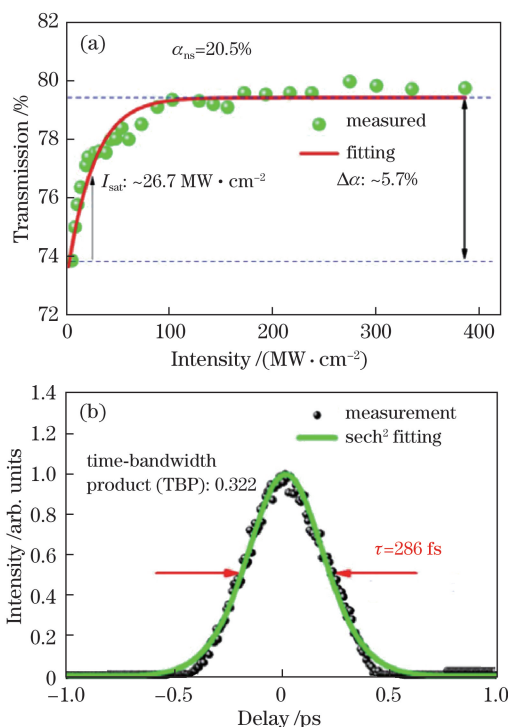


图20 拓扑绝缘体复合微纳光纤锁模激光器实验结果^[46]。

(a)饱和吸收测试;(b)自相关曲线

Fig. 20 Experimental results of mode-locked fiber laser based on microfiber coated with TI film^[46]. (a) Saturable absorption test; (b) autocorrelation trace

面,并将其作为饱和吸收体接入掺铒光纤激光器。得到中心波长为1561.7 nm,光谱宽度为3 nm,重复频率为5.47 MHz,脉冲宽度为0.88 ps的锁模脉冲输出。

同年,Meng等^[52]将基于微纳光纤沉积的黑磷量子点光子器件接入掺铒光纤激光腔内,利用可饱和吸收特性和高非线性效应分别获得了单、双波长脉冲簇现象。在基频锁模状态,激光器输出中心波长为1559.7 nm,光谱宽度为5.4 nm,重复频率为9.45 MHz,脉冲宽度为550 fs的锁模脉冲。

3.4.3 金纳米棒复合微纳光纤锁模激光器

2016年,Wang等^[53]将金纳米棒(GNRs)以光沉积的方式沉积在微纳光纤表面,如图21所示。由于作为非线性材料的金纳米棒与倏逝场有相对较长的作用时间,金纳米棒的非线性效应和光热效应都会得到增强。而且金纳米棒具有很高的三阶非线性系数及良好的饱和吸收特性,在1.5 μm波段,可以观察到随机分布多孤子、孤子簇、孤子分子等现象。

3.4.4 Bismuthene复合微纳光纤锁模激光器

Bismuthene由在碳化硅基底上沉积单层铋原子而得到。2018年,Guo等^[54]使用声化学的方式

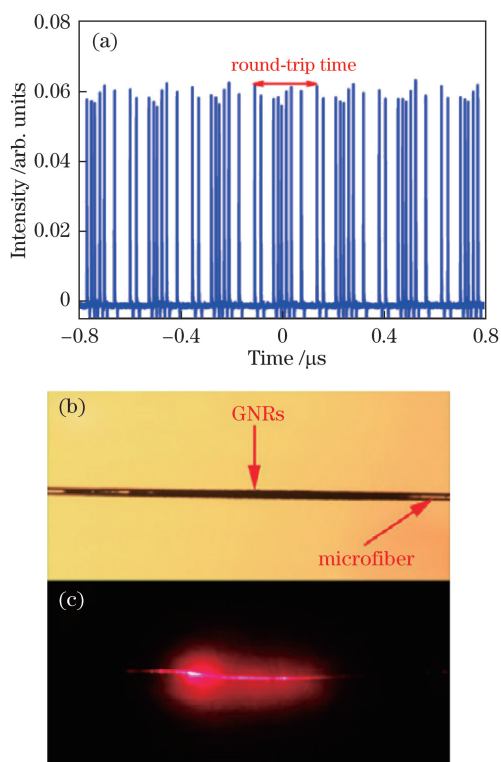


图 21 金纳米棒复合微纳光纤锁模激光器实验结果^[53]。(a)多孤子时域谱;(b)显微镜下的金纳米棒复合微纳光纤饱和吸收体;(c)金纳米棒复合微纳光纤在通入可见光时散射的倏逝场

Fig. 21 Experimental results of mode-locked fiber laser using a microfiber-based gold nanorod saturable absorber (GNRSA)^[53]. (a) Multi-soliton pulse train; (b) microscopy image of the fabricated microfiber-based GNRSAs; (c) scattering evanescent field of the GNR-deposited microfiber by launching visible light

合成 Bismuthene 纳米片,并用光沉积的方式将其与微纳光纤结合,得到中心波长为 1561 nm,光谱带宽为 14.4 nm,重复频率为 8.85 MHz,脉冲宽度为 193 fs 的稳定锁模脉冲。实验表明,除了电学和热学特性,寡层 Bismuthene 在非线性光学领域同样具有光电特性。

3.5 其他锁模现象

微纳光纤耦合饱和吸收体锁模激光器除了可以获得超短脉冲,还可以用于观察丰富、新颖的锁模现象^[26,55-57],是探究光非线性动力学的良好平台。

2014 年,Luo 等^[58]将石墨烯复合微纳光纤接入 1.5 μm 波段的环形激光腔中。由于饱和吸收体具有很强的非线性,可以容易地观察到孤子分子现象。实验结果进一步揭示了孤子分子的物理特性,同时表明石墨烯复合微纳光纤饱和吸收体是探索孤子动

力学及非线性效应良好的光学器件。

2015 年,Liu 等^[59]在 1.5 μm 波段的拓扑绝缘体复合微纳光纤锁模激光器中观察到耗散怪波的现象。由于复合结构具有饱和吸收效应及很强的非线性,激光器可以输出很强的长程非线性相互作用的混沌多脉冲波包,有利于进一步深入研究耗散怪波现象,这也表明拓扑绝缘体复合微纳光纤是探索非线性光学领域的良好结构。

2018 年,Wang 等^[60]在 1.5 μm 波段的二硫化钨复合微纳光纤锁模激光器中,观察到梯形脉冲和孤子雨的现象,这表明二硫化钨复合微纳光纤可以用于高功率脉冲的产生及非线性动力学的研究。

同年,Wang 等^[61]在二硫化钨复合微纳光纤锁模激光器中,观察到类噪声现象。在抽运功率为 334 mW 时,得到平均功率为 16 mW,中心波长为 1564 nm,光谱带宽为 3.2 nm,单脉冲能量为 3.8 nJ 的典型类噪声脉冲,这表明二硫化钨复合微纳光纤器件可以用于探究类噪声等非线性动力学现象。

4 微纳光纤色散调控锁模激光器

根据 2.4 节的介绍,微纳光纤具有反常波导色散的特性。值得注意的是,在 1 μm 波段,大多数光纤的色散值为正;在 2 μm 波段,大多数光纤的色散值为负。因此,可以通过控制微纳光纤的直径及长度,得到与常规光纤相反的色散值,从而进行腔内的色散补偿或腔外的脉冲压缩。微纳光纤作为一种全光纤、低损耗、可调节的色散补偿器件,在锁模激光器领域具有应用价值。以下将介绍微纳光纤色散调控锁模激光器的发展历程。

2006 年,Rusu 等^[62]计算并测量到,在 1 μm 波段,直径为 1.8 μm 的微纳光纤具有负色散的特性,结果如图 22(a)所示。他们将一段长度为 20 cm、过渡区总长度为 7 cm、直径为 1.8 μm 、损耗为 0.3 dB 的微纳光纤作为色散补偿器件,插入到含有半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 的线性腔掺镱锁模激光器中。如图 22(b)所示,输出光的中心波长为 1050 nm,重复频率为 65 MHz,脉冲宽度为 3 ps。

随着微纳光纤可控制备技术的提高,基于微纳光纤的色散调控也获得进一步优化。2018 年,王利镇等^[9]将直径为 1 μm 、长度为 25 cm、损耗为 0.06 dB 的微纳光纤插入到掺镱的非线性偏振旋转锁模激光器中,实验装置如图 23(a)所示。在不接入微纳光纤时,输出的光为方形光谱,腔内的总色散为正;在接入微纳光纤进行色散补偿后,腔内的总色

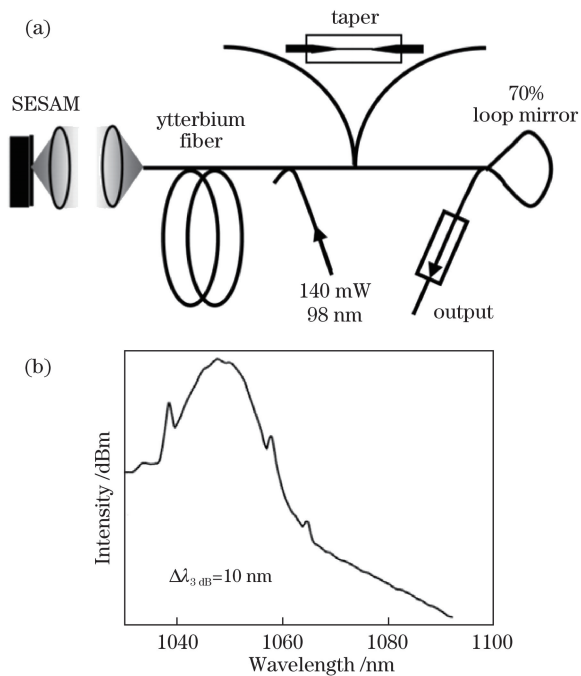


图 22 基于微纳光纤色散补偿的线性腔锁模激光器^[62]。

(a) 实验装置; (b) 光谱

Fig. 22 Experimental results of mode-locked fiber laser using fiber taper for dispersion management^[62].

(a) Experimental setup; (b) optical spectrum

散变为负,输出的光谱具有孤子边带:这表明微纳光纤具有色散补偿功能。同时,通过在光输出端接上另一段微纳光纤,实现腔外的啁啾补偿及光谱展宽。如图 23(c)、(d)所示,在抽运功率为 150 mW 时,得到平均功率为 60 mW,中心波长为 1048 nm,重复频率为 120 MHz,光谱半峰全宽(FWHM)为 20 nm,脉冲宽度为 110 fs 的锁模脉冲输出。

同年, Yang 等^[63]将直径为 2 μm、长度为 18 cm 的微纳光纤接入到掺镱激光器中用来展宽腔内光谱。同时,接到腔外的另一根微纳光纤起到脉冲压缩的作用。在抽运功率为 680 mW 时,得到平均功率为 28 mW,中心波长为 1045 nm,重复频率为 66.1 MHz,光谱带宽为 20 nm,脉冲宽度为 65 fs 的锁模脉冲输出。

微纳光纤不仅可以为 1 μm 波段的锁模激光器提供负色散,还能作为 2 μm 波段的激光器提供正色散,用以实现耗散孤子锁模。2018 年,李宇航、王利镇等^[11]利用微纳光纤在 2 μm 波段的正色散特性(约 2700 ps²/km),研制了基于微纳光纤色散调控的掺铥耗散孤子锁模激光器。如图 24 所示,在抽运功率为 795 mW 时,得到平均功率为 25 mW,中心波长为 1925 nm,重复频率为 49 MHz,光谱 FWHM 为 50 nm,脉冲宽度为 195 fs 的锁模脉冲输出。

由于微纳光纤具有反常波导色散、低损耗、高非线性、易集成等特性,因此可以作为色散调控器件被广泛应用在超快光纤激光器领域。微纳光纤不仅可以提供二阶色散补偿,还可以提供三阶色散补偿,因此可以被用来产生脉宽更窄的脉冲;微纳光纤也可以用于观察锁模激光器的类噪声等非线性动力学现象。此外,微纳光纤表面有倏逝场,因此其在基于倏逝场的超快脉冲光学传感领域有潜在的应用。

5 微纳光纤在锁模激光器中的其他应用

微纳光纤具有光谱滤波、饱和吸收、偏振敏感等特性,可以作为可调光谱滤波器、饱和吸收体、偏振器件等光学器件应用在锁模激光器中,为锁模激光器领域的探究作出独特贡献。

5.1 微纳光纤作为可调光谱滤波器的锁模激光器

2010 年, Fang 等^[64]发现当拉伸微纳光纤时,其周期性的透射谱会发生平移。如图 25 所示,将一段微纳光纤作为光谱滤波器插入到 2 μm 波段的碳纳米管复合微纳光纤锁模激光器中,完成对锁模波长的调控,调节范围为 50 nm。

2016 年, Wang 等^[65]把微纳光纤接入掺铥光纤激光器,观察到 2 μm 波段的双波长锁模现象。如图 26 所示,微纳光纤的直径为 7 μm,作为一个周期性的光谱滤波器,具有 2.9 dB 的插入损耗, 3.61 dB 的调制深度和 7.3 nm 的调制周期。小心拉伸光纤,可以精确地调控锁模波长,调节范围为 7 nm。加入 10 m 的色散补偿光纤,得到 2 μm 波段的稳定双波长耗散孤子锁模脉冲输出。

5.2 微纳光纤作为饱和吸收体的锁模激光器

2018 年, Zhao 等^[66]测量到微纳光纤具有饱和吸收特性,并且非饱和损耗、调制深度会随着直径的增大而减小。如图 27 所示,将一段直径为 25 μm 的微纳光纤作为饱和吸收体接入掺铥光纤激光器,得到平均功率为 19 mW,重复频率为 16.59 MHz,中心波长为 1593.9 nm 及 1595.3 nm,脉冲宽度为 4.18 ps 及 3.72 ps 的锁模双脉冲输出。

5.3 微纳光纤作为偏振器件的锁模激光器

2015 年, Zhang 等^[67]报道一种基于微纳光纤偏振器的全光纤锁模激光器。如图 28(a)所示,微纳光纤偏振器由两根重叠的微纳光纤组成。由于非对称性,该器件拥有较强的双折射效应因此具有偏振选择特性,偏振消光比为 26 dB。与其他偏振器相比,该器件具有制作简单、花费较小、带宽大、尺寸小等优势。如图 28(b)、(c)所示,将其接入掺铥光纤

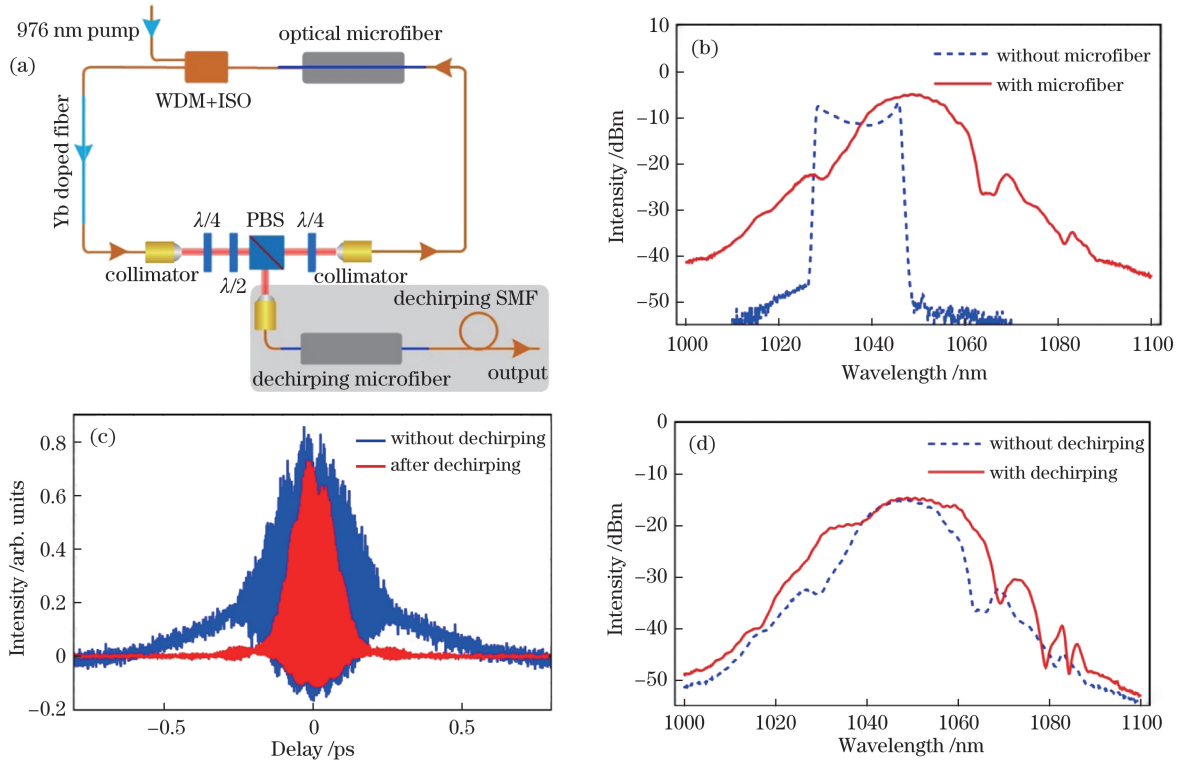


图 23 1 μm 波段基于微纳光纤色散补偿的锁模激光器实验结果^[9]。(a)实验装置;(b)腔内有微纳光纤的光谱对比图;(c)自相关曲线;(d)腔外有无微纳光纤啾啾补偿的对比图

Fig. 23 Experimental results of Yb-doped mode-locked fiber laser via optical microfiber dispersion management at 1 μm ^[9]. (a) Experimental setup; (b) typical output optical spectra for the laser cavity incorporated with and without optical microfiber; (c) autocorrelation trace; (d) optical spectra for lasers with and without the chirp compensation by the optical microfiber

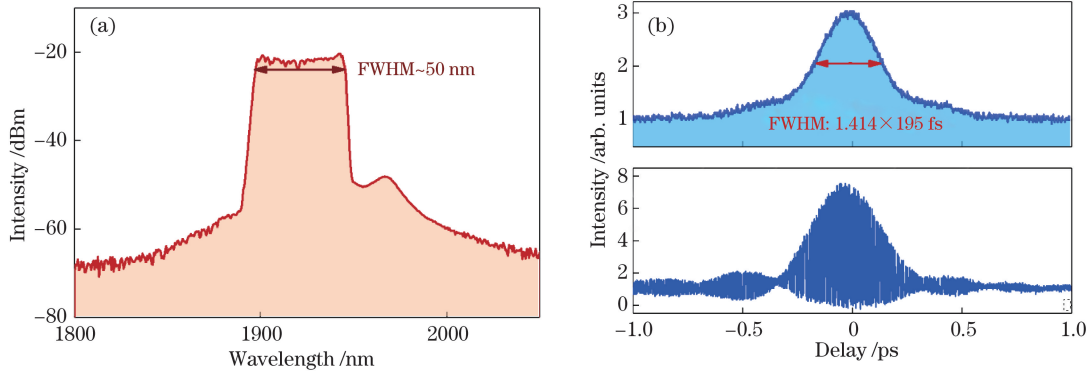


图 24 2 μm 波段基于微纳光纤的耗散孤子锁模激光器的实验结果^[11]。(a)光谱图;(b)强度和干涉自相关曲线
Fig. 24 Experimental results of microfiber-enabled dissipative soliton fiber laser at 2 μm ^[11]. (a) Optical spectrum; (b) intensity autocorrelation and interferometric autocorrelation traces

激光器,得到单脉冲能量为 135 pJ,中心波长为 1550 nm,重复频率为 14.8 MHz,脉冲宽度为 2.9 ps 的锁模脉冲输出。

6 总结和展望

总的来说,微纳光纤具有强光场约束、强倏逝场、低损耗、反常波导色散、表面均匀性好、机械性能

高等特性,并且结构紧凑、设计灵活、易于集成,可为锁模激光器研究提供高效而灵活的平台。目前,微纳光纤用于光纤激光锁模应用主要分为两种方式:

1) 与纳米材料复合作为饱和吸收体。迄今为止,已经有数十种纳米材料与微纳光纤复合成功实现激光锁模的相关报道,包括碳纳米管、各种二维材料(比如石墨烯、二硫化钼、二硫化钨、黑磷、二硫化

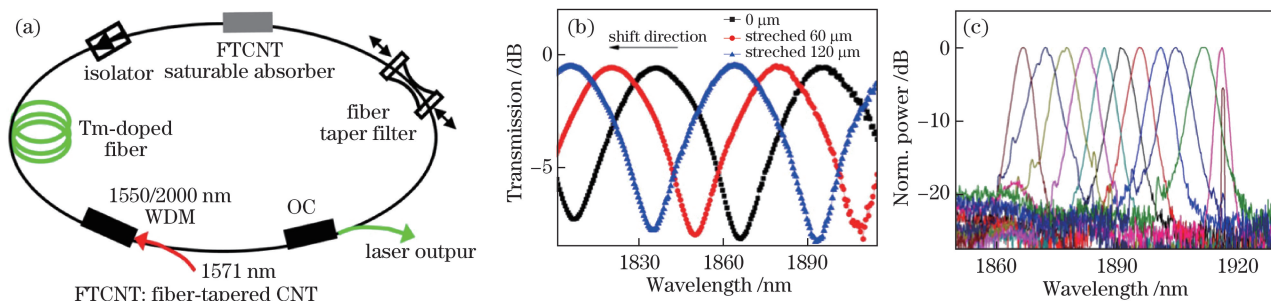


图 25 2 μm 波段波长可调锁模激光器的实验结果^[64]。(a)实验装置示意图;(b)微纳光纤透射谱随拉伸的变化;(c)光谱;
Fig. 25 Experimental results of wavelength tunable mode-locked fiber lasers at 2 μm^[64]. (a) Schematic of experimental setup;
(b) spectral response of the fiber taper filter and its shift upon stretching; (c) spectra

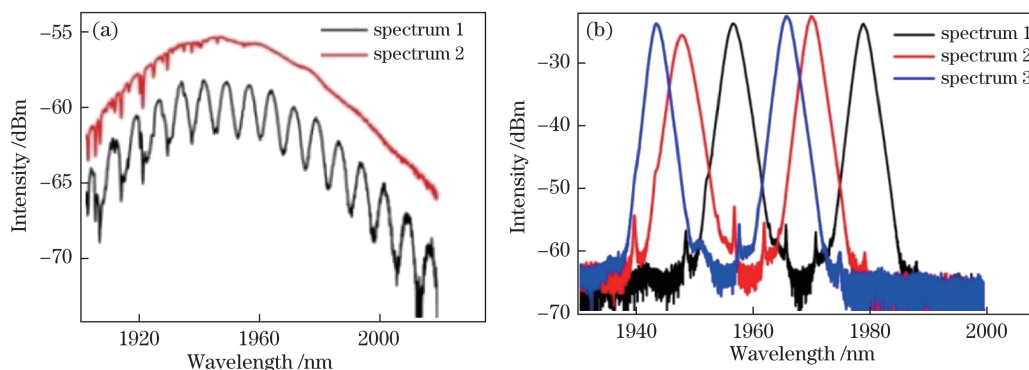


图 26 2 μm 波段波长可调的双波长锁模激光器的实验结果^[65]。(a)插入微纳光纤之前和之后的超连续光光谱;
(b)拉伸微纳光纤导致的不同锁模波长

Fig. 26 Experimental results of wavelength tunable mode-locked fiber lasers at 2 μm^[65]. (a) Spectra of the ASE light with/without a fiber taper; (b) tuning characteristic by stretching the fiber taper

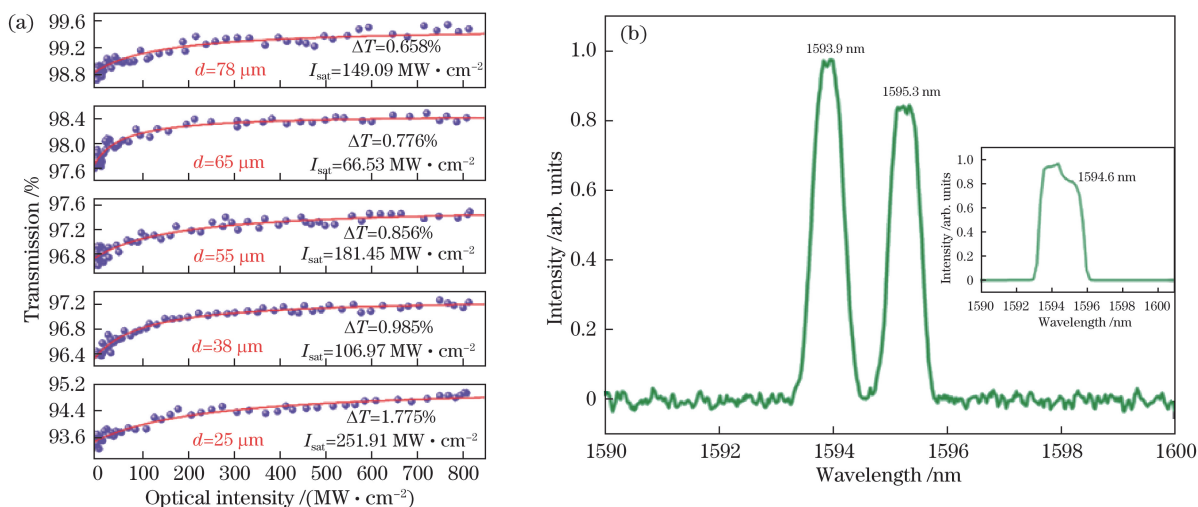


图 27 微纳光纤作为饱和吸收体的锁模激光器实验结果^[66]。(a)不同直径微纳光纤透射率随输入功率的变化
(点为实验数据,线为拟合结果);(b)光谱,插图是不用微纳光纤时的光谱

Fig. 27 Experimental results of mode-locked fiber laser using microfiber as SA^[66]. (a) Transmittance of microfibers as a function of pulse intensity with different waist diameters (dots are experimental data and lines are fitting results);
(b) spectrum, inset is laser spectrum without microfiber

铼、二硒化钨、二碲化钼、二硒化铂、Bismuthene)、拓扑绝缘体、黑磷量子点及金属纳米棒。其中单壁碳纳米管-PVA 复合微纳光纤锁模激光器可以产生脉

冲宽度为 66 fs 的锁模脉冲^[15],二硫化钨复合微纳光纤混合锁模激光器可以产生脉冲宽度为 67 fs 的锁模脉冲^[36],是微纳光纤复合耦合饱和吸收体锁模

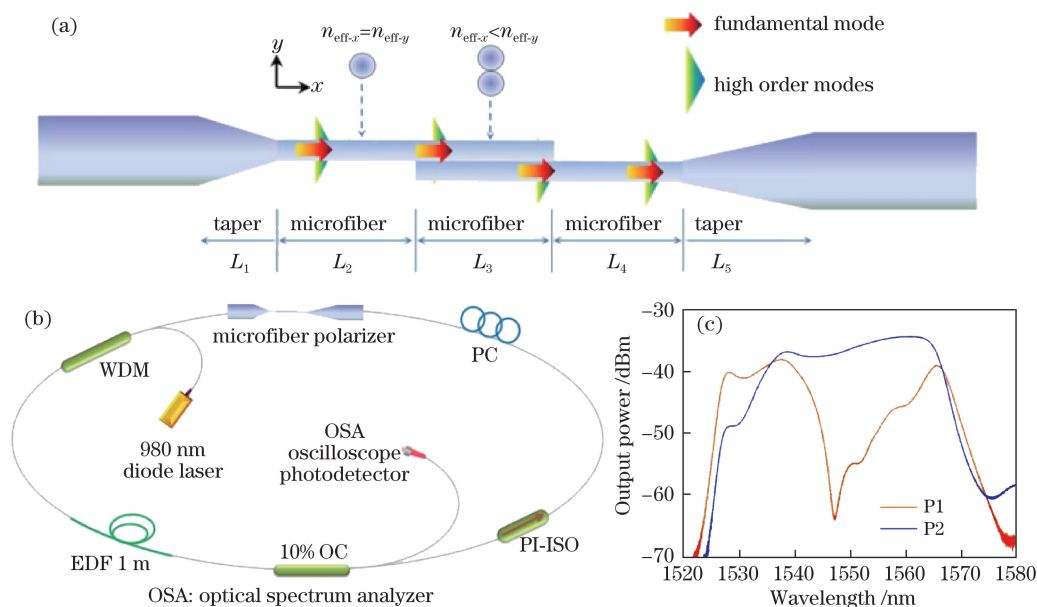


图 28 基于微纳光纤偏振器的锁模激光器实验结果^[67]。(a)微纳光纤偏振器示意图；
(b)实验装置示意图；(c)偏振器对于不同的线偏振光的透射谱

Fig. 28 Experimental results of mode-locked fiber laser based on microfiber polarizer^[67]. (a) Schematic of the microfiber polarizer; (b) schematic of experimental setup; (c) transmission spectra of the microfiber polarizer for two different linearly polarized light

激光器中得到的较短脉冲。

2) 直接作为光纤兼容的高效色散调控器件。目前已经在 $1\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m}$ 波段实现色散补偿与脉冲压缩,并获得较好的实验结果。其中在 $1\ \mu\text{m}$ 波段掺镱光纤激光腔中引入色散补偿微纳光纤,获得脉冲宽度为 65 fs 的锁模脉冲^[63],是微纳光纤色散调控锁模激光器中得到的最短脉冲。

基于微纳光纤在光纤锁模激光器应用中的潜在优势,未来可进一步开展的工作包括:

1) 降低复合结构的饱和吸收阈值。由于微纳光纤具有强光场约束能力及大比例倏逝场传输特性,通过优化微纳光纤与纳米材料的复合方式及结构参数,可以进一步增强光与物质的相互作用,大大降低复合结构的饱和吸收阈值。

2) 用于实现全光纤锁模激光器。微纳光纤的两端是普通单模光纤,采用光纤熔接机与光纤激光环路连接,可达到很低的插入损耗,并且结构稳定、成本较低。与空间光学器件相比,不需要额外的对准调节,具有免维护的优势,未来可进一步改善微纳光纤制备条件及封装方法,发展结构更加紧凑的光纤锁模激光器。

3) 用于实现高重复频率锁模激光器。由于微纳光纤的波导色散占主导地位且远高于材料色散,因此可以使用较短的微纳光纤完成色散补偿,进而

减小腔长,实现高重复频率的锁模激光器。

4) 用于实现锁模激光器传感。微纳光纤在传感应用中具有灵敏度高、灵活性好、响应快等突出优势^[68-69],结合已有的锁模激光器传感技术^[70-76],有可能发展新型的微纳光纤锁模激光器传感技术。

5) 在探究锁模激光器中的非线性动力学时,微纳光纤与纳米材料的复合结构可以用于研究类噪声、孤子分子、耗散怪波等丰富新颖的锁模现象。

参 考 文 献

- [1] Wu X Q, Wang Y, Tong L. Optical microfibers and their applications[J]. *Physics*, 2015, 44(6): 356-365.
- [2] Tong L M, Gattass R R, Ashcom J B, *et al.* Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. *Nature*, 2003, 426(6968): 816-819.
- [3] Jiang X S, Yang Q, Vienne G, *et al.* Demonstration of microfiber knot laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(14): 143513.
- [4] Jiang X S, Song Q H, Xu L, *et al.* Microfiber knot dye laser based on the evanescent-wave-coupled gain[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(23): 233501.
- [5] Brambilla G, Xu F, Horak P, *et al.* Optical fiber nanowires and microwires: fabrication and applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(1): 107-161.
- [6] Wu X Q, Tong L M. Optical microfibers and

- nanofibers[J]. *Nanophotonics*, 2013, 2(5/6): 407-428.
- [7] Li W, Chen B G, Meng C, *et al.* Ultrafast all-optical graphene modulator[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(2): 955-959.
- [8] Xu Y X, Fang W, Tong L M. Real-time control of micro/nanofiber waist diameter with ultrahigh accuracy and precision[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10434-10440.
- [9] Wang L Z, Xu P Z, Li Y H, *et al.* Femtosecond mode-locked fiber laser at 1 μm via optical microfiber dispersion management[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 4732.
- [10] Tong L M, Lou J Y, Mazur E. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides[J]. *Optics Express*, 2004, 12(6): 1025-1035.
- [11] Li Y, Wang L, Kang Y, *et al.* Microfiber-enabled dissipative soliton fiber laser at 2 μm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 6105-6108.
- [12] Zeng C, Cui Y D, Guo J. Observation of dual-wavelength solitons and bound states in a nanotube/microfiber mode-locking fiber laser[J]. *Optics Communications*, 2015, 347: 44-49.
- [13] Wang Q, Khanh K, Honkanen S, *et al.* Mode-locked fiber/waveguide lasers based on a fiber taper embedded in carbon nanotubes/polymer composite[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6996: 69961A.
- [14] Lau K Y, Ng E K, Abu Bakar M H, *et al.* Low threshold linear cavity mode-locked fiber laser using microfiber-based carbon nanotube saturable absorber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 102: 240-246.
- [15] Yu Z H, Wang Y G, Zhang X, *et al.* A 66 fs highly stable single wall carbon nanotube mode locked fiber laser[J]. *Laser Physics*, 2014, 24(1): 015105.
- [16] 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.
- [17] Kashiwagi K, Yamashita S. Deposition of carbon nanotubes around microfiber via evanescent light[J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 18364-18370.
- [18] Yu Z H, Wang Y G, Song Y R. The application of carbon nanotubes in mode locked fiber laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8923: 89231F.
- [19] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
- [20] Liu X M, Yang H R, Cui Y D, *et al.* Graphene-clad microfiber saturable absorber for ultrafast fibre lasers[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26024.
- [21] He X Y, Xu M, Zhang X C, *et al.* A tutorial introduction to graphene-microfiber waveguide and its applications[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2016, 9(4): 535-543.
- [22] Wu X Q, Yu S L, Yang H R, *et al.* Effective transfer of micron-size graphene to microfibers for photonic applications[J]. *Carbon*, 2016, 96: 1114-1119.
- [23] He X Y, Liu Z B, Wang D N, *et al.* Passively mode-locked fiber laser based on reduced graphene oxide on microfiber for ultra-wide-band doublet pulse generation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(7): 984-989.
- [24] Luo Z Q, Huang Y Z, Wang J Z, *et al.* Multiwavelength dissipative-soliton generation in Yb-fiber laser using graphene-deposited fiber-taper [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(17): 1539-1542.
- [25] Zhu P F, Lin Z B, Ning Q Y, *et al.* Passive harmonic mode-locking in a fiber laser by using a microfiber-based graphene saturable absorber[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(10): 105107.
- [26] Qi Y L, Liu H, Cui H, *et al.* Graphene-deposited microfiber photonic device for ultrahigh-repetition rate pulse generation in a fiber laser[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 17720-17726.
- [27] Yang G, Liu Y G, Wang Z, *et al.* Broadband wavelength tunable mode-locked thulium-doped fiber laser operating in the 2 μm region by using a graphene saturable absorber on microfiber[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(6): 065105.
- [28] Luo A P, Liu M, Wang X D, *et al.* Few-layer MoS₂-deposited microfiber as highly nonlinear photonic device for pulse shaping in a fiber laser [Invited] [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(2): A69-A78.
- [29] Cui Y D, Lu F F, Liu X M. MoS₂-clad microfiber laser delivering conventional, dispersion-managed and dissipative solitons[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30524.
- [30] Du J, Wang Q K, Jiang G B, *et al.* Ytterbium-doped fiber laser passively mode locked by few-layer Molybdenum Disulfide (MoS₂) saturable absorber functioned with evanescent field interaction[J]. *Scientific Reports*, 2015, 4: 6346.
- [31] Liu M, Zheng X W, Qi Y L, *et al.* Microfiber-based few-layer MoS₂ saturable absorber for 25 GHz passively harmonic mode-locked fiber laser[J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 22841-22846.
- [32] Lu F F. MoS₂-wrapped microfiber-based multi-wavelength soliton fiber laser[J]. *Modern Physics*

- Letters B, 2017, 31(32): 1750303.
- [33] Chen H, Li I L, Ruan S C, *et al.* Fiber-integrated tungsten disulfide saturable absorber (mirror) for pulsed fiber lasers[J]. Optical Engineering, 2016, 55(8): 081318.
- [34] Yan P G, Liu A J, Chen Y S, *et al.* Microfiber-based WS₂-film saturable absorber for ultra-fast photonics[J]. Optical Materials Express, 2015, 5(3): 479-489.
- [35] Liu W J, Pang L H, Han H N, *et al.* Tungsten disulphide for ultrashort pulse generation in all-fiber lasers[J]. Nanoscale, 2017, 9(18): 5806-5811.
- [36] Liu W J, Pang L H, Han H N, *et al.* Tungsten disulfide saturable absorbers for 67 fs mode-locked erbium-doped fiber lasers[J]. Optics Express, 2017, 25(3): 2950-2959.
- [37] Li Y, He Y L, Cai Y, *et al.* Black phosphorus: broadband nonlinear optical absorption and application[J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(2): 025301.
- [38] Luo Z C, Liu M, Guo Z N, *et al.* Microfiber-based few-layer black phosphorus saturable absorber for ultra-fast fiber laser[J]. Optics Express, 2015, 23(15): 20030-20039.
- [39] Yu H, Zheng X, Yin K, *et al.* Thulium/holmium-doped fiber laser passively mode locked by black phosphorus nanoplatelets-based saturable absorber[J]. Applied Optics, 2015, 54(34): 10290-10294.
- [40] Lu F F. Passively harmonic mode-locked fiber laser based on ReS₂ saturable absorber[J]. Modern Physics Letters B, 2017, 31(18): 1750206.
- [41] Yin J D, Li J R, Chen H, *et al.* Large-area highly crystalline WSe₂ atomic layers for ultrafast pulsed lasers[J]. Optics Express, 2017, 25(24): 30020-30031.
- [42] Wang J T, Jiang Z K, Chen H, *et al.* High energy soliton pulse generation by a magnetron-sputtering-deposition-grown MoTe₂ saturable absorber[J]. Photonics Research, 2018, 6(6): 535-541.
- [43] Wang J T, Chen H, Jiang Z K, *et al.* Mode-locked thulium-doped fiber laser with chemical vapor deposited molybdenum ditelluride[J]. Optics Letters, 2018, 43(9): 1998-2001.
- [44] Zhang K, Feng M, Ren Y Y, *et al.* Q-switched and mode-locked Er-doped fiber laser using PtSe₂ as a saturable absorber[J]. Photonics Research, 2018, 6(9): 893-899.
- [45] Semaan G, Meng Y, Salhi M, *et al.* High power passive mode-locked L-band fiber laser based on microfiber topological insulator saturable absorber[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9893: 98930R.
- [46] Yan P G, Lin R Y, Ruan S C, *et al.* A practical topological insulator saturable absorber for mode-locked fiber laser[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 8690.
- [47] Yan P G, Lin R Y, Ruan S C, *et al.* A 295 GHz, femtosecond passive harmonic mode-locked fiber laser based on evanescent field interaction with topological insulator film[J]. Optics Express, 2015, 23(1): 154-164.
- [48] Li J P. Vector passive harmonic mode-locking fiber laser based on topological insulator Bi₂Se₃ interacting with fiber taper[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2016, 20(1): 135-139.
- [49] Liu J M, Li X L, Zhang S M, *et al.* Polarization domain wall pulses in a microfiber-based topological insulator fiber laser[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 29128.
- [50] Luo Z C, Liu M, Liu H, *et al.* 2 GHz passively harmonic mode-locked fiber laser by a microfiber-based topological insulator saturable absorber[J]. Optics Letters, 2013, 38(24): 5212-5215.
- [51] Du J, Zhang M, Guo Z, *et al.* Phosphorene quantum dot saturable absorbers for ultrafast fiber lasers[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 42357.
- [52] Liu M, Yan Y R, Wang X D, *et al.* Black phosphorus quantum dots saturable absorber for dual-wavelength pulse cluster fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0703013.
刘萌, 闫玉蓉, 汪徐德, 等. 基于黑磷量子点可饱和吸收体的多波长长脉冲簇光纤激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0703013.
- [53] Wang X D, Luo Z C, Liu M, *et al.* A microfiber-based gold nanorod saturable absorber with evanescent field interaction for multi-soliton patterns in a fiber laser[J]. Laser Physics, 2016, 26(6): 065105.
- [54] Guo B, Wang S H, Wu Z X, *et al.* Sub-200 fs soliton mode-locked fiber laser based on Bismuthene saturable absorber[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 22750-22760.
- [55] Mouchel P, Semaan G, Niang A, *et al.* High power passively mode-locked fiber laser based on graphene nanocoated optical taper[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(3): 031106.
- [56] Wang Z H, Wang Z, Liu Y G, *et al.* The simultaneous generation of soliton bunches and Q-switched-like pulses in a partially mode-locked fiber laser with a graphene saturable absorber[J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(5): 055101.
- [57] Liu B W, Xiang Y, Luo Y Y, *et al.* Soliton molecules in a fiber laser based on optic evanescent

- field interaction with WS_2 [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(7): 151.
- [58] Luo A P, Zhu P F, Liu H, *et al.* Microfiber-based, highly nonlinear graphene saturable absorber for formation of versatile structural soliton molecules in a fiber laser[J]. *Optics Express*, 2014, 22 (22): 27019-27025.
- [59] Liu M, Cai Z R, Hu S, *et al.* Dissipative rogue waves induced by long-range chaotic multi-pulse interactions in a fiber laser with a topological insulator-deposited microfiber photonic device[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(20): 4767-4770.
- [60] Wang Z H, He R J, Liu Y G, *et al.* Generation of trapezoidal envelope pulses and soliton rains from passively mode-locked fiber laser with MoS_2 saturable absorber on microfiber[J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11(7): 072504.
- [61] Wang Z H, Wang Z, Liu Y G, *et al.* Noise-like pulses generated from a passively mode-locked fiber laser with a WS_2 saturable absorber on microfiber[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(8): 085103.
- [62] Rusu M, Herda R, Kivistö S, *et al.* Fiber taper for dispersion management in a mode-locked ytterbium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(15): 2257-2259.
- [63] Yang P L, Teng H, Fang S B, *et al.* 65-fs Yb-doped all-fiber laser using tapered fiber for nonlinearity and dispersion management[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1730-1733.
- [64] Fang Q, Kieu K, Peyghambarian N. An all-fiber 2 μm wavelength-tunable mode-locked laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(22): 1656-1658.
- [65] Wang Y Z, Li J F, Zhai B, *et al.* Tunable and switchable dual-wavelength mode-locked Tm^{3+} -doped fiber laser based on a fiber taper[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15299-15306.
- [66] Zhao R W, Li G R, Zhang B T, *et al.* Optical modulation of microfibers and application to ultrafast fiber lasers[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(17): 9120-9124.
- [67] Zhang Z S, Gan J L, Yang T, *et al.* All-fiber mode-locked laser based on microfiber polarizer[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(5): 784-787.
- [68] Lou J Y, Wang Y P, Tong L M. Microfiber optical sensors: a review[J]. *Sensors*, 2014, 14(4): 5823-5844.
- [69] Tong L M. Micro/nanofibre optical sensors: challenges and prospects[J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 903-g001.
- [70] Zhang Y, Jin W, Yu H B, *et al.* Novel intracavity sensing network based on mode-locked fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(9): 1336-1338.
- [71] Wang S, Lu P, Liao H, *et al.* Passively mode-locked fiber laser sensor for acoustic pressure sensing[J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, 60(21): 1892-1897.
- [72] Chen D R, Sun B, Chen H Z, *et al.* A Fourier domain mode-locked fiber laser based on dual-pump fiber optical parametric amplification and its application for a sensing system[J]. *Laser Physics*, 2013, 23(7): 075110.
- [73] Yu H B, Jin W, Liao Y B, *et al.* A novel fiber-optic intra-cavity sensing network using a mode-locked fiber ring laser[C]//15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, May 10, 2002, Portland, OR, USA. New York: IEEE, 2002: 507-510.
- [74] Huang J, Lan X W, Wei T, *et al.* Radio frequency interrogated actively mode-locked fiber ring laser for sensing application[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 494-496.
- [75] Nakazaki Y, Yamashita S, Hsu K. Wide and fast wavelength-swept mode-locked fiber laser based on dispersion tuning and its application to dynamic FBG sensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7004: 70043R.
- [76] Lee B H, Lee H D, Han G H, *et al.* Short cavity active mode locking fiber laser for optical sensing and imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9157: 91572Q.