

引用格式: DENG Haiqin, FAN Chao, GUO Kun, et al. Research of Fiber Pulse Laser Generation with Oblique Grown PbSe Nanosheets Saturable Absorber (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(10):1014002

邓海芹,樊超,郭琨,等. 基于斜立生长硒化铅纳米片可饱和吸收体的光纤脉冲激光研究(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(10): 1014002

基于斜立生长硒化铅纳米片可饱和吸收体的 光纤脉冲激光研究(特邀)

邓海芹¹, 樊超², 郭琨¹, 汪进¹, 俞强^{1,3}, 张清林², 吴坚¹

(1 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

(2 湖南大学 物理与微电子科学学院, 长沙 410082)

(3 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 i-Lab & 纳米器件与应用重点实验室 & 纳米光子材料与器件重点实验室, 江苏 苏州 215123)

摘要: 利用窄禁带半导体硒化铅的可饱和吸收性质, 通过物理气相沉积法和光纤探针转移, 优化工艺制备硒化铅可饱和吸收体器件, 搭建不同波长的脉冲光纤激光器。在基本器件不变的情况下, 利用简单的环形腔, 在近红外 1~2 μm 范围内实现了稳定的锁模输出, 中心波长分别为 1 060.46 nm、1 563.24 nm、1 908.34 nm, 基频分别为 0.593 MHz、13.59 MHz、10.25 MHz, 脉宽分别为 30.53 ns、4.26 ns、1 ns。该结果扩展了新型纳米晶材料硒化铅化合物的应用, 可为脉冲光纤激光的波长调控提供解决方案, 并满足多波长可调控激光器在生物医学、监测等场景下的应用需求。

关键词: 脉冲激光器; 可饱和吸收体; 物理气相传输; PbSe; 近红外; 锁模

中图分类号: TN201

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20215010.1014002

Research of Fiber Pulse Laser Generation with Oblique Grown PbSe Nanosheets Saturable Absorber (Invited)

DENG Haiqin¹, FAN Chao², GUO Kun¹, WANG Jin¹, YU Qiang^{1,3}, ZHANG Qinglin²,
WU Jian¹

(1 College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology,
Changsha 410073, China)

(2 School of Physics and Electronic Science, Hunan University, Changsha 410082, China)

(3 i-Lab & Key Laboratory of Nanodevices and Applications & Key Laboratory of Nanophotonic
Materials and Devices, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences,
Suzhou, Jiangsu 215123, China)

Abstract: Based on the saturable absorption properties of narrow band gap semiconductor PbSe, saturable absorber devices are achieved by physical vapor deposition using pure PbSe powder as the precursor and transferred by optical fiber probe. And pulse fiber lasers with different wavelengths are built. By using a simple ring cavity in near infrared, the stable mode-locked output is realized with almost unchanged devices in the range of near-infrared 1~2 μm , and the central wavelengths are 1 060.46 nm, 1 563.24 nm and 1 908.34 nm respectively, the fundamental frequencies are 0.593 MHz, 13.59 MHz and 10.25 MHz

基金项目: 国家自然科学基金(No.51772088), 中国科学院纳米器件与应用重点实验室开放课题 (Nos.20SZ01, 21YZ03)

第一作者: 邓海芹(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为高能激光技术。Email: ddhq9859@163.com

导师(通讯作者): 吴坚(1983—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为高能激光技术。Email: wujian15203@163.com

张清林(1978—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为低维半导体纳米结构制备及其光子学。Email: qinglin.zhang@hnu.edu.cn

收稿日期: 2021-07-27; 录用日期: 2021-08-18

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

separately, and the pulse widths are 30.53 ns, 4.26 ns and 1 ns respectively. This result expands the applications of the new nanocrystalline material lead selenide compound, provides a solution for the wavelength regulation of pulsed fiber laser, and satisfies the application requirements of multi-wavelength tunable laser in biomedical, monitoring and other places.

Key words: Pulse laser; Saturable absorbers; Physical vapor transmission; PbSe; Near infrared; Mode-locking

OCIS Codes: 140.3538; 140.4050; 160.4236; 320.4240

0 引言

脉冲光纤激光单色性好、相干性好、方向性好和亮度高,相比于20世纪末的超快固体激光器,结构紧凑、可柔性操作、制造成本较低、电光效率高。超快光纤激光器的应用潜力不断发展和扩大,目前已广泛应用于工业加工、近视手术微机械加工、血压传感器和精密测量等领域^[1-5]。因此如何搭建激光器来满足各行各业的不同需求是目前研究的热点。在实际应用中,常用的有掺铒光纤激光器^[6-7]和掺镱光纤激光器^[8],可分别用于1.55 μm 和1.05 μm 波长范围。此外,通过掺铥、掺钕光纤的应用,超快激光器的光谱范围可以拓展到2 μm 至3 μm 的中红外范围^[9],已有的超快光纤激光器的实现手段主要是通过调Q和锁模技术,可饱和吸收体是实现超快脉冲的关键器件^[10-13]。可饱和吸收体是一种非线性光学器件,其吸收损耗随着入射光功率的增加而减少,即透过率增大,可以达到无源调制的效果。基于可饱和吸收体光纤激光器的产生主要有被动调Q和锁模。目前,常用的可饱和吸收体种类繁多,主要分为自然可饱和吸收体和等效可饱和吸收体两种。自然可饱和吸收体主要是由具有可饱和吸收特性的材料组成,因此高性能的可饱和吸收材料也是近年来超快光纤激光器研究的热点。自然可饱和吸收体主要有半导体可饱和吸收镜、碳纳米管^[14]、石墨烯^[5, 15-16]等,因其损耗低、光谱宽或成本低等特性,实现了多种优异的脉冲输出。但半导体可饱和吸收镜的制备工艺复杂,损伤阈值低且工作频带窄^[17],碳纳米管和石墨烯等近年来虽然已经有了一些运用的尝试,但其制备较为困难。相关研究人员也在不断探索新的易制备的、性能更优异的二维材料。近年来,有一大批新型材料因其易于与激光环形腔集成、有较宽的可饱和吸收光谱范围、可控的调制深度、良好的饱和恢复时间且有多种制备方法的优点而作为可饱和吸收体,如过渡金属硫化物^[18-19]、拓扑绝缘体^[20-22]等材料,使其成为进一步应用于超快激光器的候选材料。

本文采用物理气相沉积法制备窄禁带材料PbSe纳米片,采用光纤探针直接将PbSe样品转移至光纤端面,简化了机械剥离过程,制备PbSe可饱和吸收体(PbSe saturable absorber, PbSe-SA)光纤调制器件。利用PbSe的可饱和吸收特性,基于硒化铅可饱和吸收实现1 μm 、1.5 μm 、2 μm 波段锁模脉冲输出。

1 PbSe的制备与表征

1.1 制备工艺

PbSe纳米片是在双温区管式炉中通过物理气相沉积方法制得。如图1(a)所示,在石英舟中放入约0.25 g纯PbSe粉末(Aldrich公司,纯度99.99%)作为前驱体,将载有PbSe粉末的石英舟放入透明石英管,位于炉体的第一温区。将干净硅片作为PbSe晶体生长的衬底放于管式炉的另一个温区。

晶体生长前,石英管中需通入高纯氮气(纯度99.9%),流速为200 sccm,保持30 min,用以排空管路内的氧气。设置管式炉控温程序,源材料所处温区设为800 $^{\circ}\text{C}$,硅片所处的温区设置为480 $^{\circ}\text{C}$,升温时间都设为30 min。当两个温区都达到设定温度后,保温10 min。随后中止给管式炉加热,使系统自然下降到室温。生长过程中,持续通有高纯氮气,其流速为30 sccm。通过两端温度的作用,最终在硅衬底上得到斜立生长的PbSe纳米片,如图1(b)所示。

1.2 PbSe晶体表征

用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察硅片上PbSe的生长形貌,图1(c)显示了样品在基片上的生长分布情况,与一般生长情况不同,在基片表面没有获得范德华外延生长的PbSe薄膜,而是生长出立式结构的纳米片。在此基础上继续放大(图1(d)所示),可以看出PbSe纳米片厚度为400 nm,表面光滑无杂质;图1(e)显示了PbSe样品的X射线衍射图谱,结果表明在(111)、(200)、(220)、(222)、

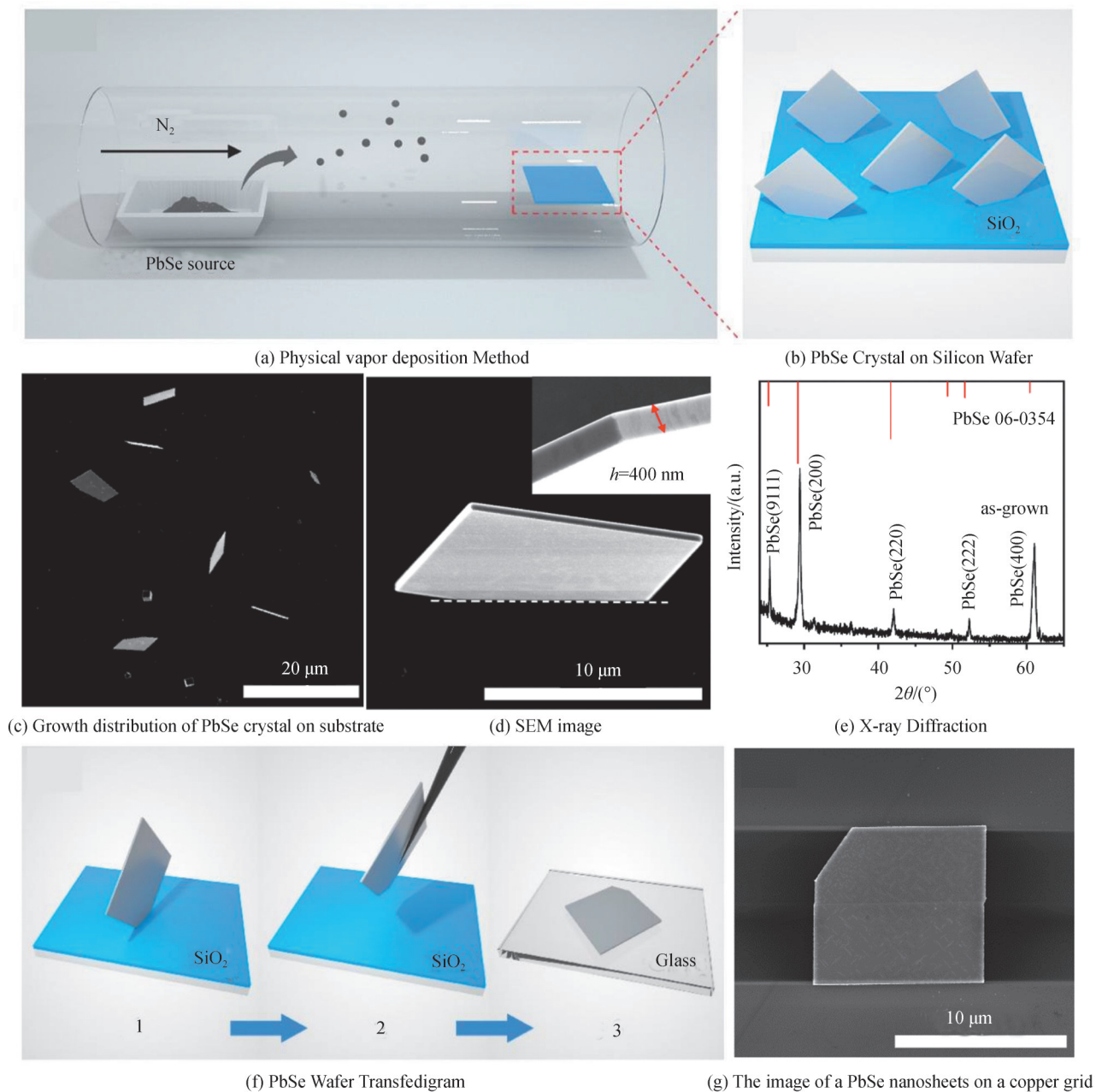


图1 PbSe 晶体生长及表征
Fig.1 The growth and characterization of PbSe crystal

(400)各平面峰值与标准卡片#06-0354匹配良好,证明制得的PbSe纳米片有较好的结晶质量。

利用斜立的生长方式所制得的样品便于挑起并转移。可以通过如图1(f)所示方法将硅片上制得的样品转移到其他目标衬底。转移后的单片PbSe晶体SEM图像如图1(g)显示,PbSe纳米片呈五边形,外观平滑均匀。其中形状上的缺角正好是斜立式生长过程中的接触位置。

随机选择了一块PbSe,经晶体结构表征分析。图2(a)显示的透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)表征图可见同样的五边形结构,与SEM图结果一致。为了进一步确定PbSe的原子排布,采用透射电子显微镜对PbSe样品进行区域放大,图2(b)中的高分辨透射电子显微镜图像(High-Resolution Transmission Electron Microscope, HRTEM)显示了清晰的晶格点,晶面间距约为0.307 nm。图2(c)是相应的区域电子衍射(Selection Area Electronic Diffraction, SAED)图样。规则的衍射点表明PbSe样品是成分均一的单晶。图2(d)能量散射X射线谱(Energy Dispersive X-ray spectroscopy, EDX)显示,PbSe薄片在整个扫描区域主要的成分是铅和硒(铜元素来自铜网),元素化学计量比约等于1:1,结果证明

PbSe的原子组成是均匀的,与化学式相符。根据这些表征,证明实验制得的PbSe薄片厚度均匀,成分准确,质量优良,可以制成性能良好的可饱和吸收调制器件。

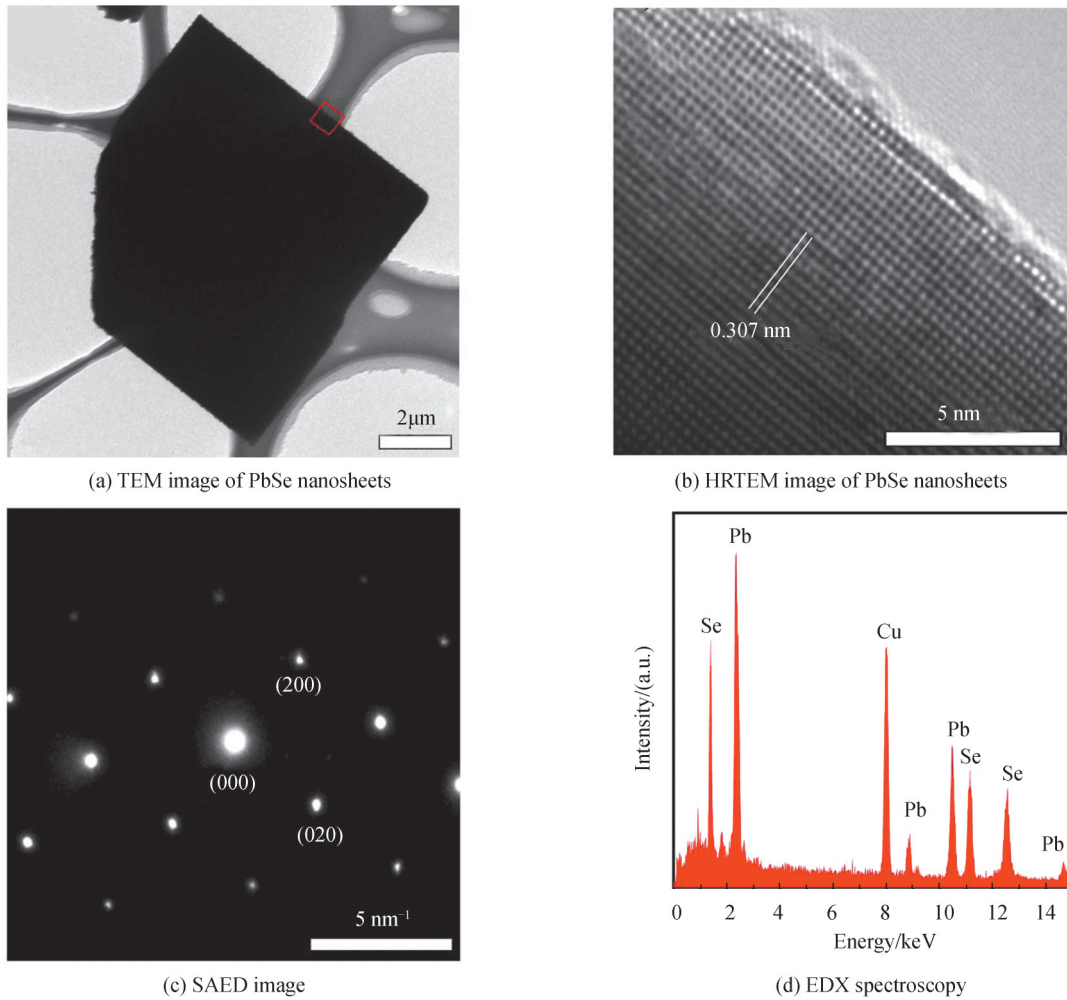
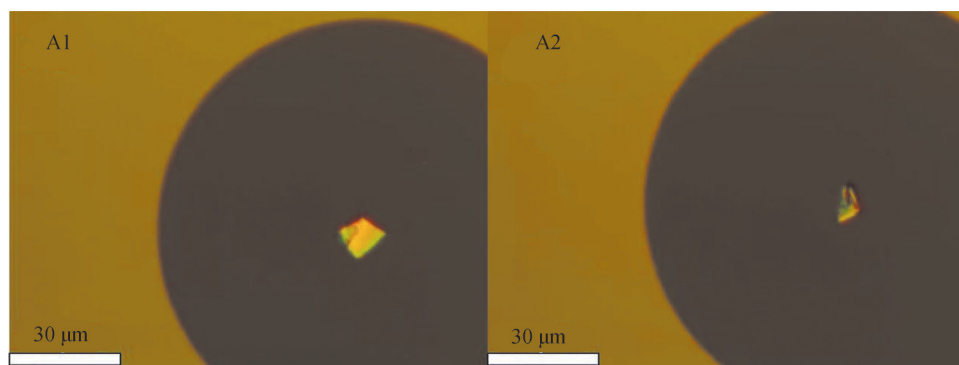


图2 PbSe纳米片表征

Fig.2 The characterization of PbSe nanosheets

1.3 PbSe晶体可饱和吸收器件制备

将一根光纤熔融拉锥,得到光纤探针作为转移工具。在显微镜下可以挑起PbSe纳米片,将PbSe样品精准放置在光纤端面的中心(如图3(a)所示)。至此,跳线的一端附着有PbSe样品。将跳线从中间剪断,将这两个跳线头对准拧紧在一枚法兰盘(或称光纤适配器)中,得到PbSe可饱和吸收器件,该器件通过熔接方法接入环形腔中。这种采用物理沉积法制得的斜立式PbSe纳米片厚度均匀,有一定的自支撑能力,结合光纤



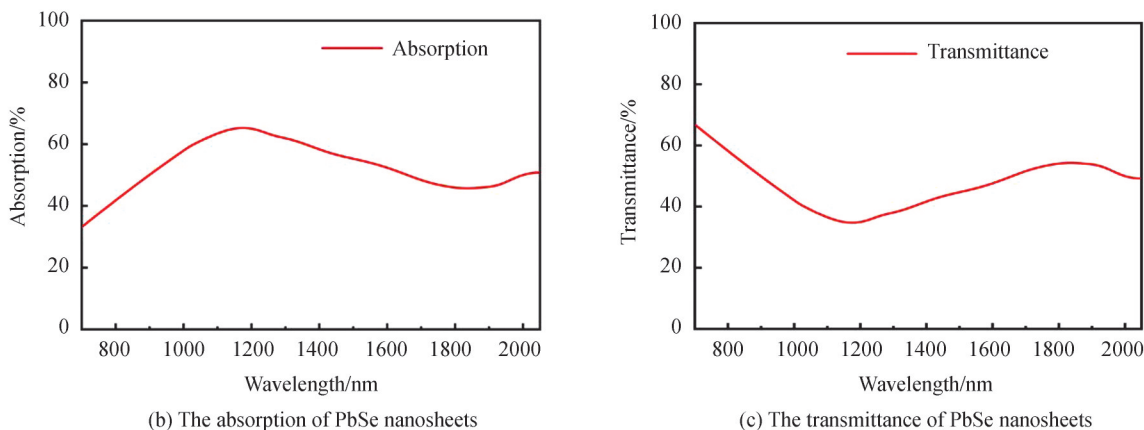


图3 PbSe纳米片的性质
Fig.3 the property of PbSe nanosheets

探针转移至光纤端面,省略了传统的剥离步骤,大大简化了可饱和吸收器件的制备过程。利用超连续光源测量可得PbSe纳米片的吸收和透射系数,如图3(b)和(c)所示。

2 基于PbSe的脉冲光纤激光器及其结构

本文分别探究了1 μm、1.5 μm和2 μm波段的基于PbSe-SA的光纤调制器件的脉冲光纤激光器,通过优化光纤环路的器件、掺杂光纤的种类、腔长调节,获得了不同波段下的超快脉冲光纤激光器。

其中1 μm被动锁模环形光纤激光器的结构示意图如图4所示。环形腔的总长度约为351 m,其中包括1.5 m长的掺镱光纤(Ytterbium Doped Fiber, YDF)作为增益介质,约300 m的单模光纤(HI1060)。选择976 nm稳定波长的商用激光二极管(Laserdiode, LD)组件泵浦,使用980/1 060 nm波分复用器(Wavelength Division Multiplexing, WDM)将泵浦输入光纤环形振荡器。在环形振荡器内,WDM两侧均连接偏振控制器(Polarization Controller, PC),共同作用调节光纤的偏振状态。环形腔中WDM之后依次接入YDF,偏振无关隔离器,基于PbSe的可饱和吸收器件,腔内能量利用20:80耦合器(Optical Coupler, OC)实现输出。输出端使用功率计(量程为50~500 mW)、光谱仪(量程为500~1 700 nm,测量2 μm波段的量程为1 700~2 100 nm)、示波器(采样频率为6 GHz)对脉冲参数进行测量。其中耦合器、波分复用器、隔离器均为中心波长1064 nm的器件,YDF尺寸为6/125。在实验装置的排列设计中,考虑了以下几方面:1)由于偏振控制器在腔内不同位置时对输出的影响作用效果不同,同时为了增大脉冲光纤激光输出的可控性,在泵浦光耦合进来的前端和尾端都接入了PC;2)因为泵浦光源经过增益介质的吸收之后,功率会显著下降,为了降低PbSe可饱和吸收体受强激光损坏的风险,将其置于掺镱光纤之后;3)由于1 μm波段光纤处于正色散区,为了平衡色散的非线性效应,同时为了压缩脉冲宽度,接入了一段300 m长的单模光纤。

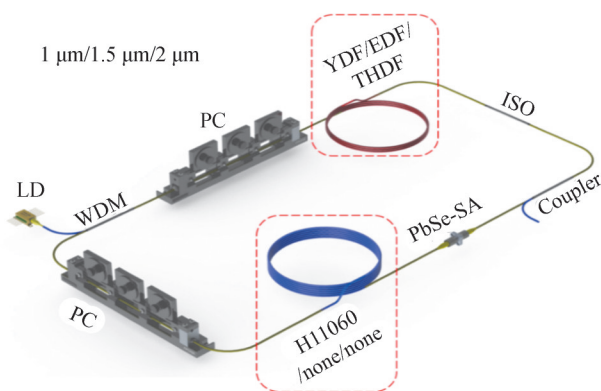


图4 PbSe-SA脉冲光纤激光器的实验装置
Fig.4 Experimental setup of the PbSe-SA pulse fiber laser

1.5 μm 被动锁模环形光纤激光器的结构中, 环形腔的总长度约为 15 m。由 976 nm 的激光二极管泵浦。由 980/1 550 nm WDM 将泵浦光耦合进环形腔, WDM 两端分别连接 PC 以调节谐振腔的偏振态。在环形腔内依次接入 3 m 长的掺铒光纤(Erbium Doped Fiber, EDF)作为增益介质、隔离器(Isolator, ISO)、PbSe 可饱和吸收器件; 在隔离器之后通过耦合器输出 20% 腔内能量进行测量。由于 1.5 μm 波段光纤处于负色散区域, 因此与 1 μm 波段相比不需要接入单模光纤来压缩脉冲宽度, 腔长显著减小, 重复频率随之提升。

2 μm 波段的铥钬共掺光纤激光器装置如图 4 所示, 与 1.5 μm 波段所介绍的装置类似, 环形腔振荡器总长约 19 m。不同的是以 1 570 nm 的商售 LD 作为泵浦源, 环形腔内接入了 2.3 m 的铥钬共掺光纤(Thulium Holmium co-Doped Fiber, THDF), 通过 10:90 耦合器从腔内输出约 10% 能量。

3 结果与讨论

3.1 1 μm 波段脉冲光纤激光器

在实验中, 逐渐增加泵浦功率时, 开始表现为连续激光输出, 继续增加泵浦功率, 在 300 mW 左右可以激发锁模脉冲。继续增加泵浦功率到 400 mW, 激光器保持锁模脉冲输出, 随后逐渐减小泵浦功率, 激光器仍保持锁模运转, 减小至 160 mW 左右, 恢复连续光运转。因此在泵浦功率 160~400 mW 范围内, 可以实现稳定的被动锁模输出。

将泵浦功率调至 220 mW, 使用光谱仪记录输出光谱, 图 5(a) 显示了激光器的中心波长位于 1 060.46 nm, 3 dB 带宽约为 0.14 nm, 谱线宽度很窄。使用示波器测量时域信号, 图 5(b) 展示了锁模脉冲序列, 时间间隔 1 690 ns, 对脉冲序列放大, 单个脉冲形状如图 5(c) 所示, 脉冲宽度为 30.53 ns。在不同泵浦功率下, 锁模脉冲的重复频率稳定在 0.6 MHz(592.8~592.7 kHz) 附近, 如图 5(d) 所示。

通过分析实验结果, 基于 PbSe-SA 掺铒光纤激光器在 1 μm 波段可以实现中心波长为 1 060.46 nm, 重复频率为 0.59 MHz, 脉宽为 30.53 ns 的锁模脉冲, 最大输出功率为 2.1 mW, 此时泵浦功率为 400 mW。此处脉

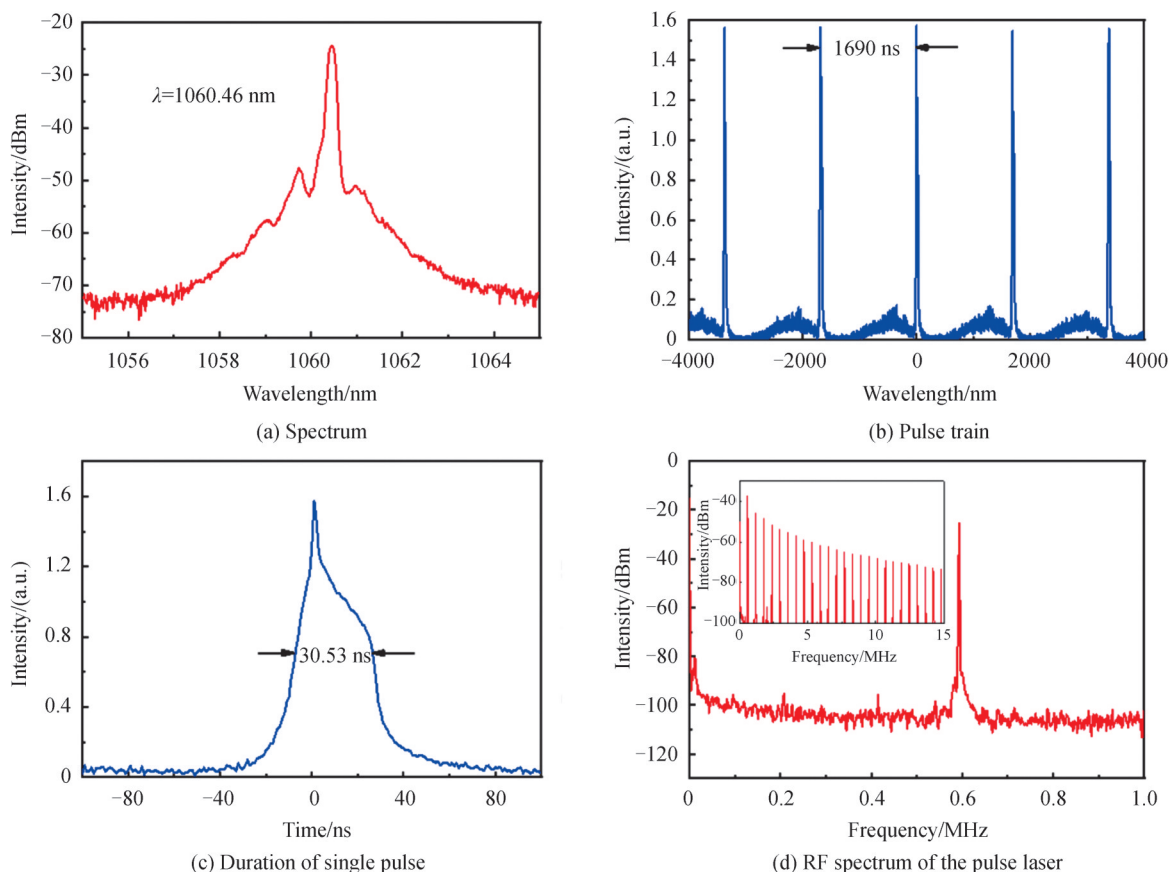


图 5 PbSe-SA 激光器 1 μm 波段性能

Fig.5 Performance of the pulse laser based on PbSe-SA at 1 μm band

宽较宽,主要是因为脉宽与谐振腔长度有关,色散与非线性效应的平衡可以得到更窄的脉冲,光纤环形腔较长,光纤的非线性效应引起了脉冲展宽,该实验装置中总腔长约为 351 m,因此 $1\ \mu\text{m}$ 激光器的脉宽最宽。在不同泵浦功率下,激光器的中心波长和频率具有良好的稳定性。如图 5 (e) 所示,可以看出本次实验结果输出功率与泵浦功率未呈常见的线性关系,依据 $1\ 020\sim 1\ 100\ \text{nm}$ 光谱情况分析原因可能是在增加泵浦功率过程中,激光出现了拉曼散射,因此腔内损耗了大部分能量,导致输出功率未如期增加。观察单脉冲的形状可以发现,脉冲明显被展宽,推测可能是由于接入的 300 m 单模光纤带来了脉冲的时间延迟。

3.2 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段脉冲光纤激光器

基于 $1.5\ \mu\text{m}$ 的实验装置,逐渐增加泵浦功率,开始激光器输出为连续光,当泵浦功率增加到 320 mW 时,激光器开始产生锁模脉冲激光;继续增加泵浦功率,观察到锁模脉冲的重复频率成倍增加,即出现了高次谐波。图 6 (a)、(b) 为激光器在 430 mW 下的输出光谱和时域信号,图 6 (a) 显示激光器的中心波长为 $1\ 563.24\ \text{nm}$,光谱展宽明显;图 6 (b)、(c) 的锁模脉冲序列表明基频为 13.59 MHz,脉宽为 4.26 ns。输出功率随泵浦功率增加而增加,近似呈线性关系,如图 6 (d) 所示。继续增加泵浦功率过程中,在 430 mW 前锁模脉冲为基频,再增大泵浦功率后,开始出现高次谐波。在 $430\sim 680\ \text{mW}$ 范围内,从一次谐波可逐渐增至二十阶高次谐波。脉冲光谱逐渐变窄,但中心波长保持稳定在 $1\ 563.24\ \text{nm}$,如图 7 (a) 所示;高次谐波锁模脉冲的重复频率为基频的数倍,如图 7 (b) 所示。基于 $2\ \mu\text{m}$ 逐渐增加泵浦功率到 250 mW 时,慢慢启动锁模脉冲输出。在 $250\sim 900\ \text{mW}$ 的泵浦功率范围内,能够实现稳定的被动锁模孤子脉冲输出。在 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段的 PbSe-SA 光纤激光器,可以输出中心波长 $1\ 563.24\ \text{nm}$,重复频率为 13.59 MHz,脉宽为 4.26 ns 的锁模脉冲序列;且通过提高泵浦功率可以改变激光器的重复频率,出现高次谐波。与 $1\ \mu\text{m}$ 波段结果做比较, $1\ \mu\text{m}$ 的光谱明显极窄,3 dB 带宽只有 0.14 nm,而 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段光谱展宽明显,因此脉宽也更窄;此外,该实验中,相同泵浦功率下输出功率有所提高,且输出功率与泵浦功率近似线性关系。

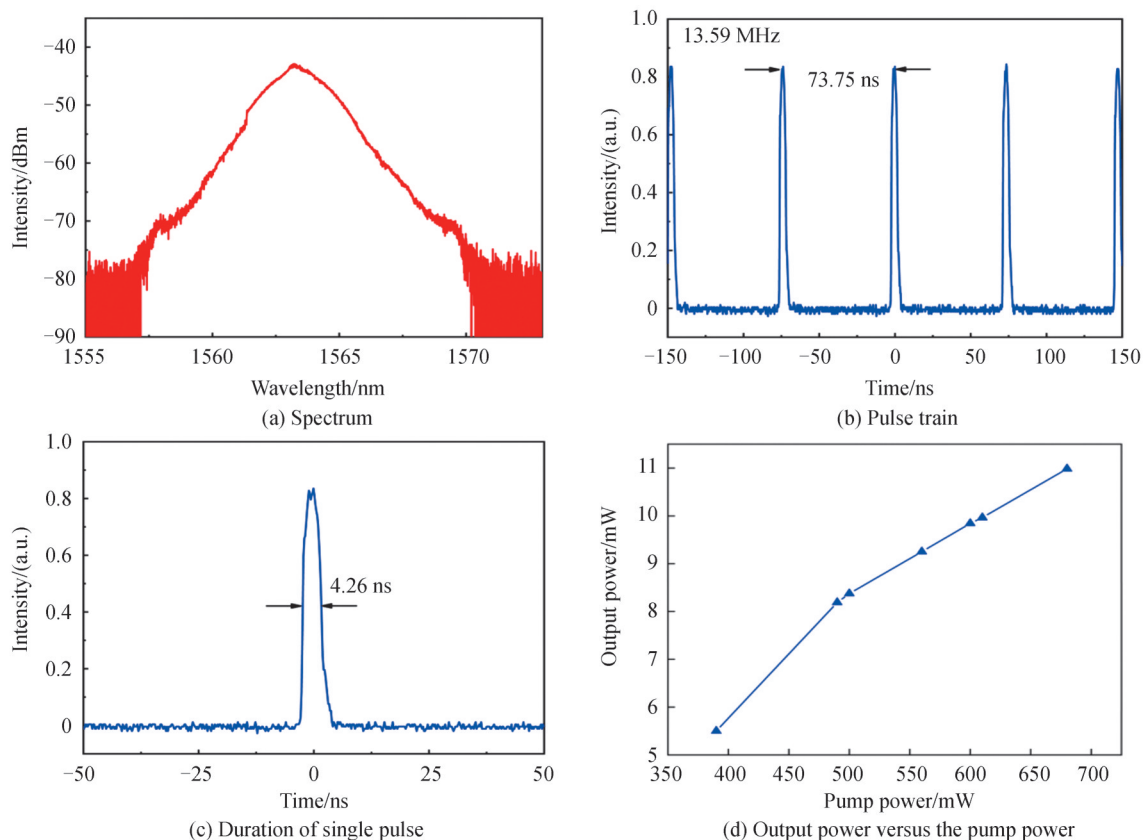


图 6 PbSe-SA 激光器 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段性能

Fig.6 Performance of the pulse laser based on PbSe-SA at $1.5\ \mu\text{m}$ band

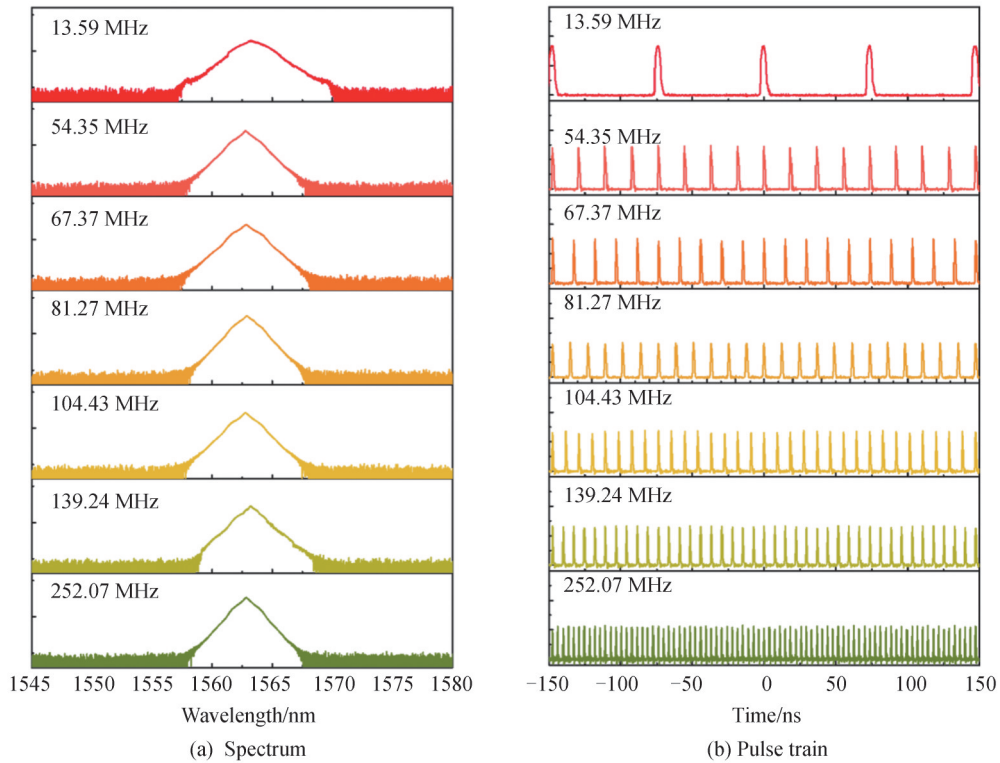
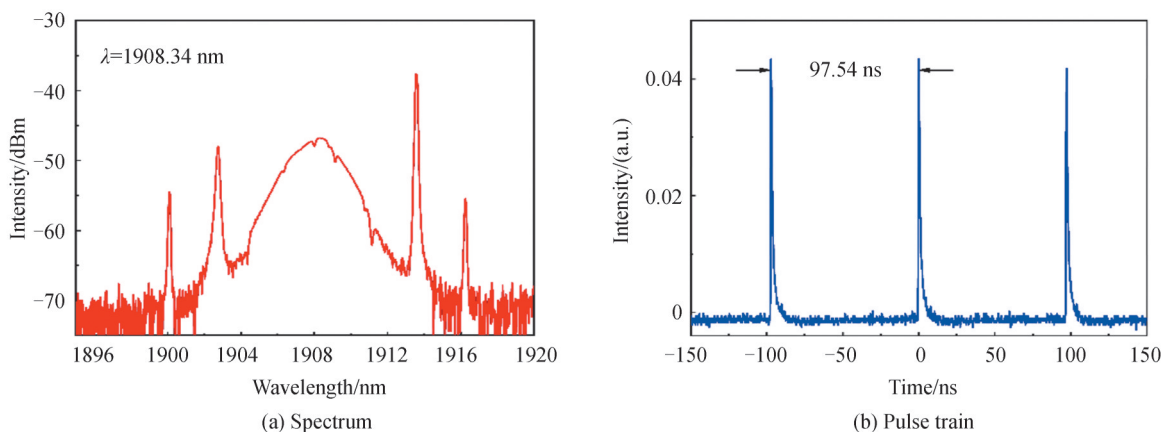


图7 第1,4,5,6,8,10,20阶谐波的光谱及脉冲序列的变化情况
Fig.7 Spectrum and pulse train recorded on 1st, 4th, 5th, 6th, 8th, 10th, 20th harmonic waves

3.3 2 μm 波段脉冲光纤激光器

基于2 μm 的光纤环形腔实验装置,随着泵浦功率逐渐增加到250 mW时,在示波器上可以观测到激光输出的脉冲时域信号,并在250~900 mW的泵浦功率范围内,能够实现稳定的被动锁模孤子脉冲输出。2 μm 波段PbSe-SA激光器的工作性能如图8所示;图8(a)为激光器在260 mW下的光谱中心波长为1908.34 nm,中心波长两侧对称出现明显的克利边带,故此时为孤子脉冲状态;图8(b)、(c)为激光器输出的时域信号,输出锁模脉冲时间间隔为97.6 ns,脉冲宽度为1 ns(如图8(c)所示),经计算可得其重复频率为10.25 MHz。记录基频信号如图8(d)所示,输出脉冲光纤激光的信噪比为46.96 dB,信号清晰。图8(e)显示在不同泵浦功率下激光器重复频率稳定在10.25 MHz左右;图8(f)表明输出功率和泵浦功率的关系,在250~900 mW的泵浦范围内,输出功率与泵浦功率呈线性关系,最大输出功率为32.4 mW。在2 μm 波段PbSe-SA光纤激光器实现了中心波长1908.34 nm,脉冲宽度1 ns,重复频率10.25 MHz的锁模脉冲输出,与1 μm 和1.5 μm 的激光器相比,2 μm 的激光器信噪比高,光谱及频率稳定,输出功率明显提高,激光器性能明显稳定。



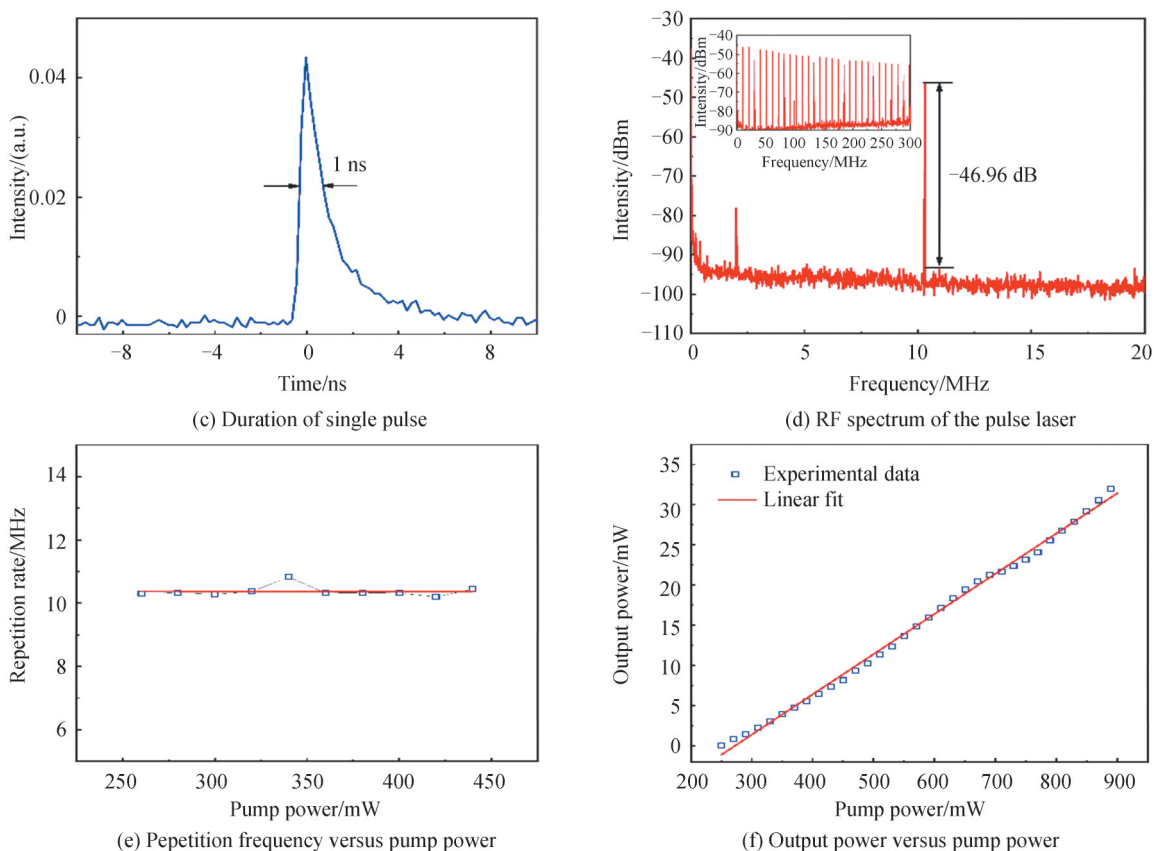


图8 PbSe-SA 铥钕共掺光纤激光器 $2\ \mu\text{m}$ 波段输出特性
Fig.8 Performance of PbSe-SA THDF co-doped fiber laser at $2\ \mu\text{m}$ band

4 结论

本文选取纳米晶材料中的一种窄禁带半导体 PbSe 为例开展光纤脉冲激光实验。采用 PVD 方法制备 PbSe 晶体,用光纤探针转移方法,制成可饱和吸收调制器件。搭建环形腔结构的脉冲光纤激光器,实现稳定的脉冲输出,记录并分析了激光器的输出特性。实验结果显示,在相同器件下,基于 PbSe-SA 的光纤激光器实现了 $1\ \mu\text{m}$ 、 $1.5\ \mu\text{m}$ 、 $2\ \mu\text{m}$ 波段锁模脉冲输出,中心波长分别为 $1\ 060.46\ \text{nm}$ 、 $1\ 563.24\ \text{nm}$ 、 $1\ 908.34\ \text{nm}$,基频分别为 $0.593\ \text{MHz}$ 、 $13.59\ \text{MHz}$ 、 $10.25\ \text{MHz}$,脉宽分别为 $30.53\ \text{ns}$ 、 $4.26\ \text{ns}$ 、 $1\ \text{ns}$,且该激光器具有长时间稳定性。后续可通过优化谐振腔长度,减少光纤长度,色散管理等方法以达到脉冲宽度更窄的效果,该实验可为基于 PbSe 的近红外超快脉冲激光产生提供参考,将推动低维窄带隙材料在宽波段非线性光学中的应用开发。

参考文献

- [1] SUBRATA B, YOUNG-TAE K, SAMARENDRA K M. Ultrafast laser-assisted spatially targeted optoporation into cortical axons and retinal cells in the eye[J]. Journal of Biomedical Optics, 2017, 22(6): 1-4.
- [2] KIM S, PARK J, SO S, et al. Characteristics of an implantable blood pressure sensor packaged by ultrafast laser microwelding[J]. Sensors, 2019, 19(8): 1801.
- [3] FERMAN M E, HARTL I. Ultrafast fibre lasers[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 868-874.
- [4] PENILLA E H, DEVIA-CRUZ L F, WIEG A T, et al. Ultrafast laser welding of ceramics[J]. Science, 2019, 365(6455): 803.
- [5] SUN Z, HASAN T, TORRISI F, et al. Graphene mode-locked ultrafast laser[J]. ACS Nano, 2010, 4(2): 803-810.
- [6] NADY A, BAHAROM M F, LATIFF A A, et al. Mode-locked erbium-doped fiber laser using vanadium oxide as saturable absorber[J]. Chinese Physics Letters, 2018, 35(4): 044204.
- [7] STEINBERG D, ZAPATA JD, EATDSOUZA, et al. Mechanically exfoliated graphite onto d-shaped optical fiber for femtosecond mode-locked erbium-doped fiber laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(10): 1868-1874.
- [8] HISYAM M B, RUSDI M F M, LATIFF A A, et al. Generation of mode-locked ytterbium doped fiber ring laser using

- few-layer black phosphorus as a saturable absorber[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(1): 39-43.
- [9] LIU X, LI X, TANG Y, et al. PbS nanoparticles saturable absorber for ultrafast pulse generation in 2 μ m fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(1): 161-164.
- [10] DEBNATH PC, D-IYEOM. Ultrafast fiber lasers with low-dimensional saturable absorbers: status and prospects[J]. *Sensors*, 2021, 21(11): 3676-3708.
- [11] LEE J, KOO J, JHON Y M, et al. A femtosecond pulse erbium fiber laser incorporating a saturable absorber based on bulk-structured Bi₂Te₃ topological insulator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 6165-6173.
- [12] JIANG Junlin, YUE Wenjie, WANG Weiqi, et al. Passively mode-locked ytterbium-doped fiber laser based on MoO₃ as saturable absorber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(9): 0914001.
江俊林, 乐文杰, 王玮琦, 等. 基于MoO₃可饱和吸收体的掺镱被动锁模光纤激光器[J]. *光子学报*, 2018, 47(9): 0914001.
- [13] GAO Ziyue ZHU Jiangfeng, GONG Shuang, et al. Dual-wavelength passively Q-switched Yb:GdYSiO₅ laser based on WS₂ saturable absorber mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(10): 1014002.
高子叶, 朱江峰, 公爽, 等. 基于二硫化钨可饱和吸收体双波长被动调Q Yb:GdYSiO₅激光器[J]. *光子学报*, 2018, 47(10): 1014002.
- [14] LI D, JUSSILA H, WANG Y, et al. Wavelength and pulse duration tunable ultrafast fiber laser mode-locked with carbon nanotubes[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 2738.
- [15] ZHANG H, TANG D, KNIZE RJ, et al. Graphene mode locked, wavelength-tunable, dissipative soliton fiber laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(11): 111112.
- [16] WANG X, LI X H, JIANG C, et al. Photon-generated carrier transfer process from graphene to quantum dots: optical evidences and ultrafast photonics applications[J]. *NPJ 2D Materials and Applications*, 2020, 4(1): 27.
- [17] ZHANG A, WANG Z, OUYANG H, et al. Recent progress of two-dimensional materials for ultrafast photonics[J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2021, 11(7): 1778.
- [18] SOARES D M, MUKHERJEE S, SINGH G. TMDs beyond MoS₂ for electrochemical energy storage[J]. *Chemistry-A European Journal*, 2020, 26(29): 6320-6341.
- [19] DURÁN RETAMAL J R, PERIYANAGOUNDER D, KE J J, et al. Charge carrier injection and transport engineering in two-dimensional transition metal dichalcogenides[J]. *Chemical Science*, 2018, 9(40): 7727-7745.
- [20] WANG C, WANG L, LI X, et al. Few-layer bismuthene for femtosecond soliton molecules generation in Er-doped fiber laser[J]. *Nanotechnology*, 2018, 30(2): 025204.
- [21] CHAI T, LI X, FENG T, et al. Few-layer bismuthene for ultrashort pulse generation in a dissipative system based on an evanescent field[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(37): 17617-17622.
- [22] LU S, ZHAO C, ZOU Y, et al. Third order nonlinear optical property of Bi₂Se₃[J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 2072-2082.