

NbSe₂ 纳米颗粒锁模的 2 μm 光纤激光器*

刘新星^{1,2}, 田 振³, 唐玉龙^{1,2}

(1. 上海交通大学 物理与天文学院 激光等离子体教育部重点实验室, 上海 200240; 2. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240;
3. 聊城大学 物理科学和信息工程学院 山东光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252000)

摘 要: 高重复大脉冲能量激光在基础科学研究以及通信、探测、材料加工等应用领域具有重要价值。报道了溶液法制备的过渡金属二硫化物 NbSe₂ 纳米颗粒材料的线性和非线性光学特性, 并利用其 2 μm 波段可饱和吸收特性对掺铥光纤激光器进行被动调制实现了 2 μm 锁模激光输出。线性测量发现 NbSe₂ 纳米材料的光学吸收覆盖近红外到近中红外波段且随波长增加而降低; 非线性光学测量显示 NbSe₂ 纳米材料在 2 μm 波段的调制深度为 6.5%、饱和强度为 19 MW·cm⁻²。然后我们把 NbSe₂ 纳米材料转移到金镜上制作成可饱和吸收器件, 并对掺铥光纤激光器进行调制得到 2 μm 耗散孤子谐波锁模激光, 单脉冲能量为 3.36 nJ, 脉冲宽度为 1.48 ns, 重复频率为 50.66 MHz。激光光谱的中心波长为 1 910.8 nm, 光谱宽度为 5.8 nm。首次在 2 μm 光纤激光器中采用 NbSe₂ 纳米颗粒实现耗散孤子锁模, 证明了 NbSe₂ 纳米材料在 2 μm 波段的非线性光学调制能力, 结合纳米颗粒的可集成特性, 溶液法制备的 NbSe₂ 纳米材料有望成为一种新型的宽谱非线性光电调制材料/器件。

关键词: 光纤激光器; 可饱和吸收体; 锁模; 耗散孤子; 纳米颗粒

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.190458

NbSe₂ nanoparticles mode-locked 2 μm thulium fiber laser

Liu Xinxing^{1,2}, Tian Zhen³, Tang Yulong^{1,2}

(1. Key Laboratory for Laser Plasmas (Ministry of Education), School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Collaborative Innovation Center of IFSA, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
3. Shandong Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, School of Physics Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China)

Abstract: High-repetition-rate laser pulses with large pulse energies have great application potential in various areas including telecommunications, sensing, material processing, etc. Here, we report the linear and nonlinear optical properties of solution-based transition-metal dichalcogenide NbSe₂ nanoparticles, and at the same time its application to mode-locked 2 μm fiber laser. The linear absorption of the NbSe₂ nanoparticles covers the near-infrared to the near mid-infrared regions, and decreases with increasing wavelength, showing a broadband operation potential. Nonlinear absorption measurement of the NbSe₂ nanoparticle gives a modulation depth of 6.5% and saturable intensity of 19 MW·cm⁻² at the wavelength of about 2 μm. The the NbSe₂ nanoparticles were transferred onto a gold mirror to fabricate a saturable absorber, with which a mode-locked thulium fiber laser was constructed and harmonic mode-locking was achieved. The mode-locked laser provides pulse energy of 3.36 nJ, pulse duration of 1.48 ns and repetition rate of 50.66 MHz. The laser wavelength is centered at 1 910.8 nm with a spectral bandwidth of 5.8 nm. The realization of dissipative-soliton mode-locking in the 2 μm fiber laser with NbSe₂ nanoparticles proves that NbSe₂ nanoparticles are good modulators for pulse generation in the 2 μm spectral region, and the integratable solution based nanoparticles have the potential of being new broadband nonlinear light modulators.

Key words: fiber laser; saturable absorber; mode-locking; dissipative soliton; nanoparticle

由于 2 μm 激光处于人眼安全波段和大气传输窗口, 2 μm 锁模铥光纤激光器在医疗手术、激光雷达、材料(尤其是塑料聚合物材料)加工、传感等领域有着广泛的应用前景, 同时是中红外超连续谱和光学参量振荡器等核心泵浦源之一, 具有重要的科研和应用价值^[1-3]。而锁模脉冲光纤激光器因为具有高峰值功率和窄脉冲宽度在应用

* 收稿日期: 2019-11-23; 修订日期: 2019-12-30

基金项目: 上海市自然科学基金项目(19ZR1427100); 国家自然科学基金项目(61675129, 61875247); 基金委创新研究群体项目(11721091)

作者简介: 刘新星(1994—), 男, 硕士研究生, 从事锁模光纤激光器技术研究; lxx1600376326@163.com。

通信作者: 唐玉龙(1975—), 男, 副教授, 从事光纤激光器及非线性光纤光学研究; yulong@sjtu.edu.cn。

中具备独特的优势,其中基于可饱和吸收效应的被动锁模是实现光纤激光器锁模的主要方式。传统的半导体可饱和吸收镜(SESAM)已经成为应用最为广泛的可饱和吸收调制器,具有制备工艺成熟、参数设计可控、长期稳定性高等优点,但其缺点是制备过程复杂且工作带宽小^[4]。自2004年石墨烯优异的光学特性被发现之后,科学家便揭起了探索新纳米材料及二维材料的非线性光学特性的热潮,并把多种具有可饱和吸收特性的材料成功应用于超快激光的产生,这些材料包括石墨烯^[5]、碳纳米管^[6]、氮化碳^[7]、黑磷^[8]、拓扑绝缘体^[9]等。目前基于新材料可饱和吸收调制的2 μm锁模铥光纤激光器已经可以实现几nJ至几十nJ的脉冲能量以及ps甚至fs的脉宽,展现出了许多独特的光电特性。可饱和吸收体的相关参数特性是影响锁模激光器所能实现的脉冲能量水平、脉冲宽度、脉冲稳定性等激光特性的重要因素,因此探索新的可饱和吸收材料对于提高锁模激光器的能量水平、集成化、稳定性等具有重要意义。

最近,类石墨烯层状材料过渡金属二硫化物(TMDs)由于其优异的光学、电学及机械特性而备受关注^[10],该材料同时具备非线性光学吸收^[11]及层数依赖的带隙特征^[12],其中典型的半导体TMDs材料(MoS₂, MoSe₂, WS₂, WSe₂等)具有从近红外到中红外的宽谱非线性调制特性、并被成功地应用于不同波段激光器中产生脉冲激光输出^[13-15]。相比较而言,有关金属层状TMDs材料(NbS₂, NbSe₂, TaSe₂等)的非线性光学特性尚未受到广泛关注。作为一种新型的TMDs材料,二硒化铌(NbSe₂)具备优异的光电响应和超导性能^[16],已应用于无线通讯中的天线制备^[10]、太阳能电池^[17]、锂离子电池^[18]等领域。然而,只有少数文献报道了NbSe₂的非线性光学特性,比如2018年深圳大学的Shi Yihuan等人将NbSe₂量子点溶液沉积在D型光纤侧面上制作成可饱和吸收体并将其熔接进光路进行调制,分别在Er掺杂和Yb掺杂光纤中实现了1.5 μm和1 μm锁模脉冲输出,脉宽为765 fs和380 ps^[19];同时,他们还实现了1.5 μm波段的调Q光纤激光脉冲输出^[20]。然而,还没有研究报道关于NbSe₂纳米材料在2 μm波段的调制特性及锁模激光输出。

2 μm波段处于反常色散区域,被动锁模的激光脉冲能量除了受到材料损伤阈值的限制外,还受到腔内因峰值功率过高引起的过度非线性相移的影响。因此,为了提高光纤锁模激光器的脉冲能量,耗散孤子锁模机制被提出。耗散孤子锁模既需要像传统孤子锁模一样保持线性色散和非线性自相位调制的平衡,还需要平衡增益和损耗,其产生的脉冲能量一般比传统孤子能量大1~2个数量级^[21]。另外,因为耗散孤子锁模脉冲能量较高,易于通过脉冲分裂而实现高次谐波锁模;高次谐波锁模可以极大地提高锁模脉冲的重复频率,这种高重频的激光脉冲在生物成像、光通信等领域中具有重要应用价值。

本文采用液相超声法制备了NbSe₂纳米颗粒并将其转移到金镜上形成层状NbSe₂可饱和吸收体,同时表征了NbSe₂可饱和吸收体的线性和非线性光学吸收特性。线性吸收测量显示NbSe₂具有1 100~2 300 nm宽带吸收特性,但吸收随波长增加而下降;非线性表征展示了NbSe₂饱和吸收体在2 μm波段具有6.5%的调制深度和19 MW·cm⁻²的饱和强度。利用NbSe₂可饱和吸收体,首次研究了NbSe₂纳米颗粒在2 μm光纤激光器中的非线性调制并成功实现了五次谐波的耗散孤子锁模激光输出。该激光器的最高输出功率为170.4 mW的,在50.66 MHz的重复频率下获得了3.36 nJ的脉冲能量和1.48 ns的脉冲宽度。

1 材料表征

层状的纳米颗粒NbSe₂材料采用液相剥离法(liquid-phase exfoliation method)进行制备。NbSe₂粉末通过乙醇分散后,再在超声仪中超声2 h得到层状的NbSe₂纳米颗粒。然后静置该溶液约5 h,大尺寸片状材料将沉降到底部,从而分离出没有剥离的材料;顶层的约2/3溶液收集后用来进行实验,并将该溶液滴涂到金镜上来制备可饱和吸收体。

图1(a)为NbSe₂纳米颗粒的扫描电子显微镜(SEM)图片,清晰地展示出了纳米颗粒的三维结构及堆积而成的类层状结构。图1(b)展示了NbSe₂纳米颗粒的透射电子显微镜(TEM)图片,其具有约20 nm的横向尺寸。

使用紫外/可见/近红外分光光度计(Lambda 950)测试NbSe₂纳米颗粒的线性吸收性能,结果如图2(a)所示。在1 100~2 300 nm的光谱范围内NbSe₂纳米颗粒具有百分之几的吸收,吸收系数随着波长增加而下降,在2 μm波长处吸收系数约为3.5%,说明了NbSe₂纳米颗粒具有与传统TMDs材料相媲美的宽带吸收特性。通过将NbSe₂纳米颗粒悬浊液滴涂到金镜上制成了NbSe₂可饱和吸收体,然后采用反射法测量了NbSe₂饱和吸收体在2 μm波段的非线性吸收特性,测量装置如图2(b)中插图所示。测试激光是一个2 μm的锁模铥光纤放大器系统(自制),具有50 MHz的重复频率、500 fs的脉冲宽度和10瓦级输出功率(最高可到20 W平均功率)。测量过程中通过逐渐增

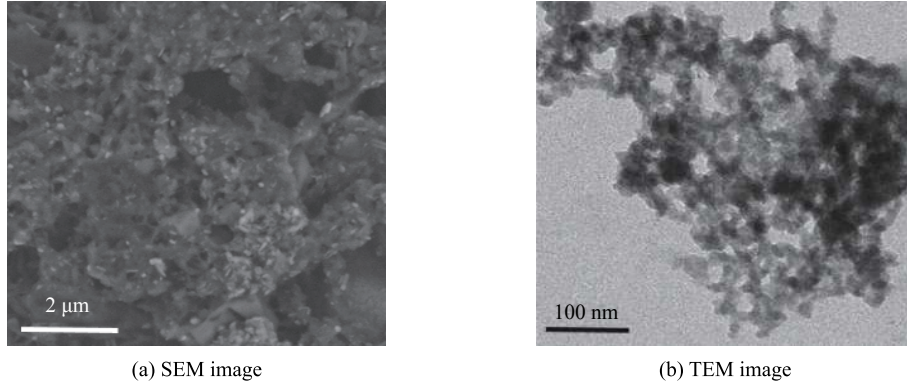

 Fig. 1 SEM and TEM images of the NbSe₂ nanoparticles prepared by solution process

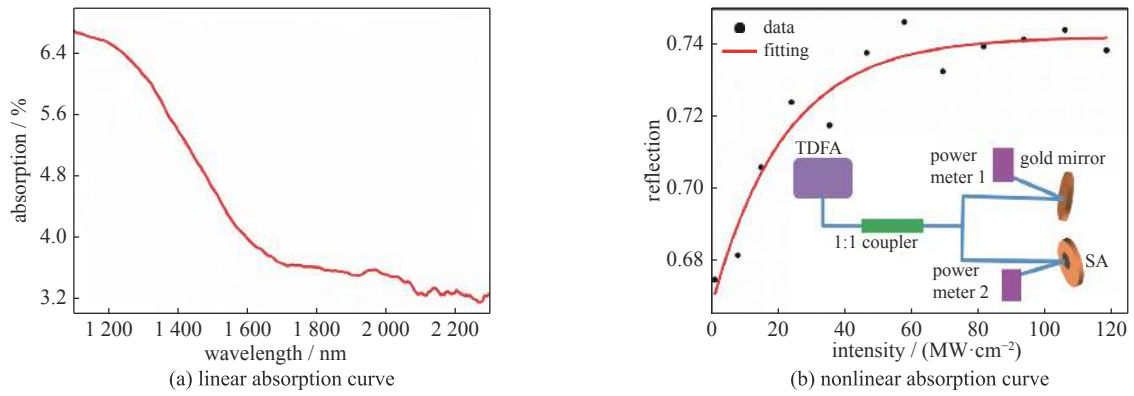
 图 1 溶液法制备的 NbSe₂ 纳米颗粒的 SEM 图和 TEM 图

 Fig. 2 Linear absorption curve and nonlinear absorption curve of the liquid-processed NbSe₂ nanoparticles

 图 2 溶液法制备的 NbSe₂ 纳米颗粒的线性吸收和非线性吸收曲线

加 2 μm 泵浦激光的功率并记录不同功率密度下的反射率来得到非线性吸收特性, 非线性吸收的相关参数通过以下公式拟合

$$R(I) = 1 - \Delta D \times \exp(-I/I_{\text{sat}}) - a_{\text{ns}} \quad (1)$$

式中: R 是反射率; ΔD 是调制深度; I 为入射强度; I_{sat} 为饱和强度; a_{ns} 为非饱和损耗。如图 2(b) 所示, 通过拟合得到所制备的 NbSe₂ 饱和吸收体具有 6.5% 的调制深度、19 MW/cm² 的饱和强度和 26% 的非饱和吸收损耗。

2 实验装置

实验装置如图 3 所示。增益光纤采用长度为 12 cm 的高掺杂 Tm³⁺ 单包层硅光纤 (5/125 μm, 0.24NA), 该光纤在 1 550 nm 的吸收系数为 ~350 dB·m⁻¹。泵浦源是一个 Er/Yb 共掺的连续波光纤激光器, 最高输出功率为 1 W, 激光中心波长为 1 550 nm。泵浦光通过一个 1 550/2 000 nm 的波分复用器 (WDM) (基于 SMF-128 单模光纤) 耦合进增益光纤 (耦合效率约 90%)。在增益光纤之后, 熔接一段长约 4.6 m 的色散补偿光纤 (DCF, 2.2 μm, 0.35NA core) 用于补偿增益光纤的色散, 从而保持谐振腔的总色散值为正, 有利于实现耗散孤子锁模。在激光器的输出端熔接一段 4 m 的 SMF-28 光纤, 用来增加谐振腔长度从而降低锁模激光的重复频率。色散补偿光纤、SMF-28 光纤和铥增益光纤在激光输出波长处 (约 1.9 μm) 的色散值分别为 93, -67 和 -12 ps²·km⁻¹[22], 计算得出谐振腔的总色散约为 0.05 ps², 处于正常色散区。远离激光输出端, 基于 NbSe₂ 纳米颗粒的金镜用来提供激光反馈和实现可饱和吸收; 该金镜反馈与输出端光纤的直角端面约 3.5% 的非涅耳反射共同形成激光谐振腔。该金镜固定在一个镜架上 (可以实现二维倾斜) 并装配在一个三维平移台上, 从而可以实现对可饱和吸收材料的 5 维调节。靠近可饱和吸收材料端的光纤端面切斜角, 距离可饱和吸收材料约数毫米。

激光输出功率采用功率计 (FieldMate, Coherent Co.) 进行测量; 激光光谱采用中红外光谱分析仪 (SIR 5000, SandHouse Co.) 进行表征, 光谱仪的分辨率为 0.22 nm; 采用 3.5 GHz 的探测器 (InGaAs) 和 2.5 GHz 的示波器 (Agilent DSO9254A) 来测量激光脉冲的输出特性; 激光的射频谱采用 26.5 GHz 的微波分析仪 (N9938A, FieldFox) 来测量。

3 实验结果及讨论

基于图3的实验装置构建光纤激光器后,当泵浦光增加到约500 mW时,该光纤激光器产生连续激光输出。进一步增加泵浦功率,可以观察到不太稳定的调Q脉冲。在泵浦功率增加的过程中,通过调节锁模器件(NbSe₂可饱和吸收体)的位置(平移和倾斜)来寻找实现锁模的最佳状态。当泵浦功率增加到768 mW时,精细调节可饱和吸收体的位置后,得到稳定的锁模激光脉冲输出,该锁模脉冲可以稳定保持至最高的泵浦功率871 mW。NbSe₂纳米颗粒实现锁模的原理如下:因为NbSe₂纳米颗粒的尺寸远大于其波尔半径,量子限域(quantum confinement)效应弱,因此NbSe₂纳米颗粒对光子的吸收主要来源于自由载流子吸收(电子跃迁);随着泵浦强度增加,价电子不断跃迁到导带,由于导带价电子的泡利不相容原理,达到吸收饱和,从而对激光进行可饱和强度调制形成锁模脉冲。所得到的稳定锁模输出功率曲线如图4所示,输出功率随泵浦功率近似线性增加,最高输出功率为170.4 mW,相对于耦合进光纤的泵浦功率的斜率效率为71.7%。这种高效率2微米激光运行主要来自于泵浦光激励掺铥光纤时的“二到一”交叉弛豫过程^[23-24]。

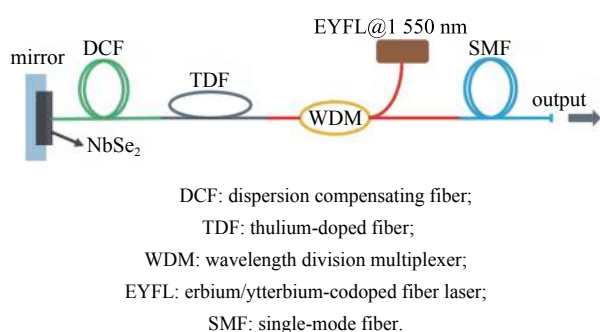


Fig. 3 Experimental setup of the mode-locked Tm³⁺ fiber laser with NbSe₂ nanoparticles

图3 实验装置示意图

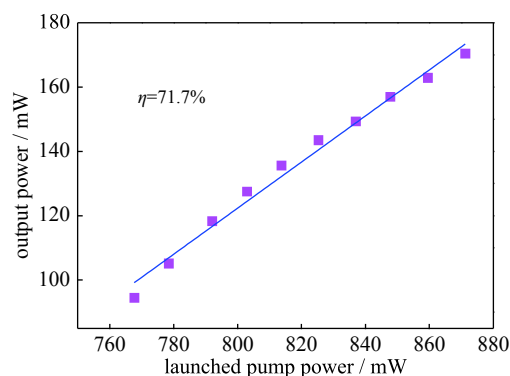


Fig. 4 Output power curve of the mode-locked 2 μm fiber laser with NbSe₂ nanoparticles

图4 NbSe₂锁模的2 μm光纤激光器输出功率曲线

在稳定锁模的最高输出功率条件下测得的锁模激光脉冲特性如图5所示。锁模的脉冲周期为19.74 ns,对应于脉冲的重复频率为50.66 MHz。因为谐振腔中激光的渡越时间为98.7 ns(对应谐振腔中光纤总长度约9.8 m),所以该锁模状态为5次谐波锁模。我们尝试通过调节可饱和吸收体的位置和泵浦功率,但得不到基频锁模,该光纤激光器只能实现高次(5次)谐波锁模是由可饱和吸收体的调制深度、非线性特性及谐振腔的色散特性决定的。图5(a)为5 μs时间窗口中的锁模脉冲序列(归一化后的结果),由图可知不同脉冲间的强度稳定性大于95%。基于

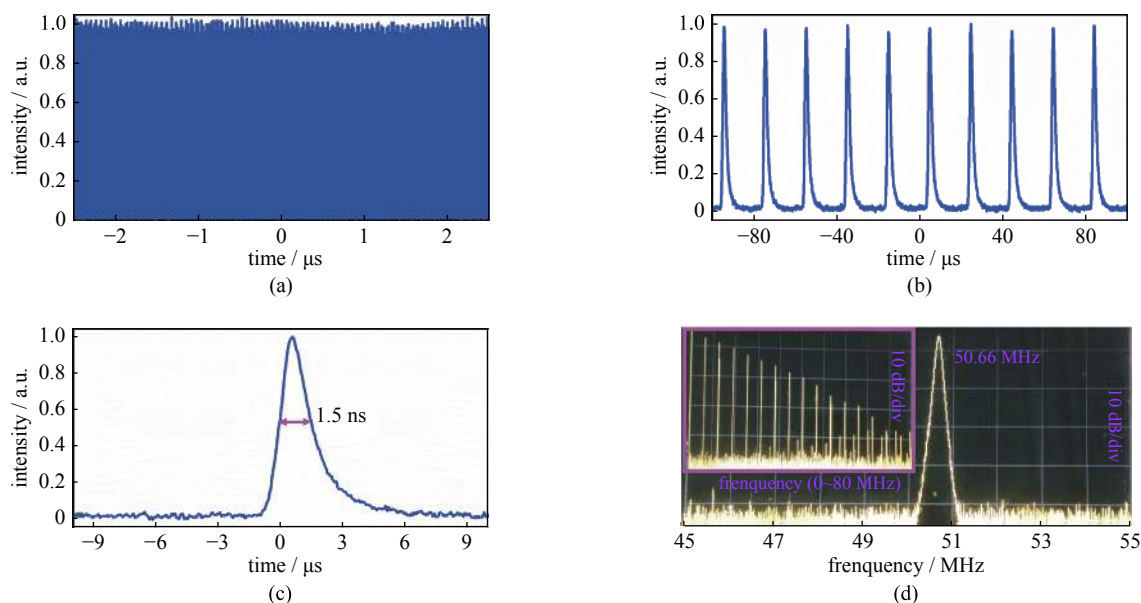


Fig. 5 Pulsing characteristics of the NbSe₂ nanoparticles mode-locked 2 μm fiber laser

图5 NbSe₂纳米颗粒锁模的2 μm光纤激光器输出脉冲特性

最大的锁模功率 170.4 mW, 该激光器锁模脉冲的最大单脉冲能量为 3.36 nJ, 该脉冲能量虽然比 MoS₂ 锁模的 2 μm 光纤耗散孤子脉冲能量要低^[22], 但比传统的孤子锁模脉冲能量大^[25], 显示了耗散孤子是实现大脉冲能量锁模方面的优势, 也说明了 NbSe₂ 具有成为一种优秀的非线性光学材料的潜力。

图 5(c) 为该锁模光纤激光器最高输出功率条件下测得的单脉冲波形, 该脉冲近似为高斯波形, 脉冲的 FWHM 宽度为 1.48 ns, 该脉冲宽度与 1 μm 波段的耗散孤子脉宽相近^[26]。基于该激光脉冲宽度 (1.48 ns) 和上面测得的激光光谱宽度 5.8 nm, 锁模激光脉冲的时间带宽积为 706, 该值远大于高斯脉冲的傅里叶变换极限时间带宽积 (0.441), 因此该锁模脉冲为高度时间啁啾脉冲。这种大啁啾脉冲来自于耗散孤子的锁模特性, 通过形成啁啾在时域上展宽脉冲, 从而实现大脉冲能量, 避免了传统孤子的孤子面积定理^[27] 对锁模脉冲能量的限制。如果对该锁模脉冲进行腔外补偿来压缩脉宽, 初步计算显示需要 SMF-28 (色散为 $-67 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$) 的光纤长度约 7.6 km。为了进一步表征该锁模的稳定性, 我们采用射频频谱仪对锁模脉冲的射频频谱进行了测量, 分辨率带宽为 100 kHz, 结果如图 5(d) 所示。50.66 MHz 的锁模频率的信噪比大于 40 dB, 说明该激光器处于较稳定的锁模状态, 在 80 MHz (见插图) 的频率窗口中, 存在一定的“超模”噪声, 说明锁模的稳定性还有提升的空间。

该锁模光纤激光器的激光光谱如图 6 所示, 中心波长为 1 910.8 nm, 激光光谱的半高宽 (FWHM) 为 5.8 nm, 该光谱宽度能够支持的变换极限脉冲宽度约为 925 fs (以高斯脉冲波形来计算)。该光谱具有边缘陡峭的独特形状, 这种陡峭的光谱是耗散孤子的典型特征^[28]。对于耗散孤子锁模, 宽光谱有利于形成大啁啾, 从而实现更高的孤子脉冲能量。

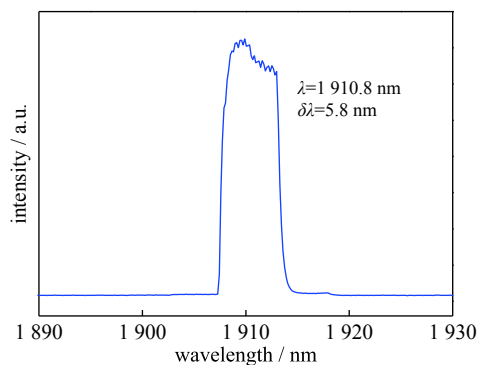


Fig. 6 Laser spectrum of the NbSe₂ nanoparticles mode-locked 2 μm fiber laser

图 6 NbSe₂ 纳米颗粒锁模的 2 μm 光纤激光器光谱曲线

4 结 论

本文研究了 NbSe₂ 纳米颗粒材料的线性和 2 μm 波段的非线性光学特性, 发现该纳米材料具有宽带光吸收的特点, 吸收光谱可以从近红外覆盖到近中红外区 (随波长增加吸收下降), 同时利用该纳米颗粒材料制备了可饱和吸收体, 非线性光学测量显示 NbSe₂ 纳米颗粒在 2 μm 波段的调制深度为 6.5%、饱和强度为 19 MW/cm²、非饱和吸收损耗为 26%。为了证实其非线性光学吸收特性, 我们把基于 NbSe₂ 纳米颗粒的可饱和吸收体用于 2 μm 掺铥光纤激光器中, 实现了耗散孤子谐波锁模激光输出, 单脉冲能量为 3.36 nJ、脉冲宽度为 1.48 ns; 激光中心波长为 1 910.8 nm, 激光光谱宽度为 5.8 nm。锁模的输出平均功率为 170.4 mW, 激光斜率效率大于 70%。实验结果证实了 NbSe₂ 纳米颗粒在 2 μm 波段具有优异的光调制特性, 能够产生高脉冲能量激光输出, 同时有望推广到 3 μm 中红外区域成为一种新型的宽光谱非线性光电材料。

参考文献:

- [1] Mingareev I, Weirauch F, Olowinsky A, et al. Welding of polymers using a 2 μm thulium fiber laser[J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, 44(7): 2095-2099.
- [2] Fried N M, Murray K E. High-power thulium fiber laser ablation of urinary tissues at 1.94 μm[J]. *Journal of Endourology*, 2005, 19(1): 25-31.
- [3] Leindecker L, Marandi A, Byer R L, et al. Octave-spanning ultrafast OPO with 2.6-6.1 μm instantaneous bandwidth pumped by femtosecond Tm-fiber laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7046-7053.
- [4] Gomes L A, Orsila L, Jouhti T, et al. Picosecond SESAM-based ytterbium mode-locked fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(1): 129-136.
- [5] Sobon G, Sotor J, Pasternak I, et al. Thulium-doped all-fiber laser mode-locked by CVD-graphene/PMMA saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 127971-127976.
- [6] Meng Yafei, Li Yao, Xu Yongbing, et al. Carbon nanotube mode-locked thulium fiber laser with 200 nm tuning range[J]. *Science Reports*, 2017, 7: 45109.
- [7] Luo Yongfeng, Zhou Yan, Tang Yulong, et al. Mode-locked Tm-doped fiber laser based on iron-doped carbon nitride nanosheets[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14: 110002.
- [8] Sotor J, Sobon J, Kowalczyk M, et al. Ultrafast thulium-doped fiber laser mode locked with black phosphorus[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(16): 3885-3888.
- [9] Luo Zhichao, Liu Meng, Liu Hao, 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.
- [10] Girish S G, Min G J, Shin K Y, et al. Two-dimensional metallic niobium diselenide for sub-micrometer-thin antennas in wireless communication systems[J].

ACS Nano, 2019.

- [11] Zhou Kaizhe, Zhao Min, Chang Mengjie, et al. Size-dependent nonlinear optical properties of atomically thin transition metal dichalcogenide nanosheets[J]. *Small*, 2014, 11(6): 694-701.
- [12] Komsa H P, Krasheninnikov A V. Electronic structures and optical properties of realistic transition metal dichalcogenide heterostructures from first principles[J]. *Physical Review B*, 2013, 88: 085318.
- [13] Chen Bohua, Zhang Xiaoyan, Wu Kan, et al. Q-switched fiber laser based on transition metal dichalcogenides MoS₂, MoSe₂, WS₂, and WSe₂[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26723-26737.
- [14] Cheng Chen, Liu Hongliang, Tan Yang, et al. Passively Q-switched waveguide lasers based on two-dimensional transition metal diselenide[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10385-10390.
- [15] Liu Xinxing, Zhang Shuaiyi, Yan Zhengyu, et al. WSe₂ as a saturable absorber for a passively Q-switched Ho, Pr: LLF laser at 2.95 μm[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(5): 1213-1220.
- [16] Huang Y H, Chen R S, Zhang J R, et al. Electronic transport in NbSe₂ two-dimensional nanostructures: Semiconducting characteristics and photoconductivity[J]. *Nanoscale*, 2015, 7: 18964.
- [17] Guo Jiahao, Shi Yantao, Zhu Chao, et al. Cost-effective and morphology-controllable niobium diselenides for highly efficient counter electrodes of dye-sensitized solar cells[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, 1: 11874.
- [18] Kumagai N, Tanno K. Kinetic and structural characteristics of 3R-niobium disulfide as a positive material for secondary lithium batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 1991, 36: 935.
- [19] Shi Yiyuan, Long Hui, Liu Shunxiang, et al. Ultrasmall 2D NbSe₂ based quantum dots used for low threshold ultrafast lasers[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6: 12638-12642.
- [20] Shi Yiyuan, Liu Wenjia, Lü Wei, et al. Passively Q-switched Er-doped fiber laser based on NbSe₂ quantum dot saturable absorber[C]//Asia Communications and Photonics Conference. 2018.
- [21] Chong A, Buckley J, Renninger W, et al. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser[J]. *Optics Express*, 2006, 14(21): 10095-10100.
- [22] Tian Zhen, Wu kan, Kong Lingchen, et al. Mode-locked thulium fiber laser with MoS₂[J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12: 065104.
- [23] Jackson S D. Cross relaxation and energy transfer upconversion processes relevant to the functioning of 2 μm Tm³⁺-doped silica fibre lasers[J]. *Optics Communications*, 2004, 230(1/3): 197-203.
- [24] Tang Y L, Xu J Q, Chen W, et al. 150-W Tm³⁺-doped fiber lasers with different cooling techniques and output couplings[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, 27: 104207.
- [25] Tamura K, Ippen E P, Haus H A, et al. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser[J]. *Optics Letters*, 1993, 18: 1080-1082.
- [26] Zhang H, Lu S B, Zheng J, et al. Molybdenum disulfide(MoS₂) as a broadband saturable absorber for ultra-fast photonics[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7249-7260.
- [27] Hasegawa A, Tappert F. Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersion dielectric fibers. I. Anomalous dispersion[J]. *Applied Physics Letters*, 1973, 23: 142-144.
- [28] Huang Chongyuan, Wang Cong, Shang Wei, et al. Developing high energy dissipative soliton fiber lasers at 2 micron[J]. *Science Reports*, 2015, 5: 13680.