

# 硒化钨在保偏调 Q 光纤激光器中的稳定性研究

郭超世, 陈博华, 王 昊, 吴 侃, 陈建平

上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

**摘要** 将二维材料硒化钨( $WSe_2$ )与聚合物聚乙烯醇(PVA)混合制成饱和吸收体薄膜,在掺铒保偏光纤激光器中实现了稳定的调 Q 运转。全保偏的腔体能够最大程度减少环境对激光腔双折射的扰动,在此基础上,研究了硒化钨聚乙烯醇( $WSe_2$ -PVA)饱和吸收体薄膜在调 Q 运转中的稳定性。研究发现,当材料中的热量累积到一定阈值后,聚合物基底材料首先进入熔融状态,随后热量在薄膜中进一步累积,导致硒化钨受热损坏,表现为饱和吸收体薄膜的损耗急剧增加。

**关键词** 激光器; 调 Q; 非线性光学材料; 保偏光纤

**中图分类号** TN248

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0703018

## Investigation on Stability of $WSe_2$ -PVA in an All Polarization Maintaining Q-Switched Fiber Laser

Guo Chaoshi, Chen Bohua, Wang Hao, Wu Kan, Chen Jianping

State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** In this paper, we fabricated thin-film saturable absorber by mixing 2D material tungsten diselenide ( $WSe_2$ ) and polymer polyvinyl alcohol (PVA). The  $WSe_2$ -PVA saturable absorber (SA) was incorporated in an erbium-doped polarization maintaining (PM) fiber laser, and stable Q-switched operation was realized. An all PM cavity can reduce environmental perturbation on the cavity birefringence. Based on this PM cavity, we investigated the stability of  $WSe_2$ -PVA SA in the Q-switched operation. It is found that when the heat accumulation reached a certain threshold in the SA, the polymer substrate firstly melted and more heat accumulated quickly. As a result,  $WSe_2$  was damaged, showing a significant increase of SA loss.

**Key words** lasers; Q-switching; nonlinear optical material; polarization maintaining fiber

**OCIS codes** 060.3510; 140.3540; 160.4330; 060.2420

## 1 引 言

石墨烯的发现开启了人们对二维材料探索的大门。石墨烯具有良好的光电属性,如零带隙、单层碳原子结构以及超高的光透射率等,这使得它被广泛应用于光电的各个领域,如光调制器<sup>[1-2]</sup>、探测器<sup>[3]</sup>、光开关<sup>[4]</sup>等。此外,石墨烯也可作为饱和吸收体应用于激光器等领域<sup>[5-8]</sup>。自 2013 年以来,由于过渡金属硫族化合物(TMDs)具有与石墨烯相似的光电属性<sup>[9]</sup>,如较宽的线性光吸收谱、起源于泡利不相容原理的饱和吸收特性、较快的弛豫时间,以及卓越的非线性等特点,引起了各个研究团队的广泛关注。将石墨烯作为饱和吸收体应用于激光器中更是得到了普遍研究:2015 年,陈博华等<sup>[10]</sup>利用非保偏腔体结构,将 4 种过渡金属硫族化合物作为可饱和吸收体,实现了微秒量级脉冲宽度的调 Q 激光器;2016 年,Cheng 等<sup>[11]</sup>利用化学气相沉积

**收稿日期:** 2017-02-20; **收到修改稿日期:** 2017-04-05

**作者简介:** 郭超世(1990—),男,硕士研究生,主要从事基于新型二维纳米材料光纤脉冲激光器方面的研究。

E-mail: super\_guo555@sjtu.edu.cn

**导师简介:** 吴 侃(1984—),男,博士后,副教授,主要从事激光器及微波光子方面的研究。

E-mail: kanwu@sjtu.edu.cn(通信联系人)

(CVD)的方法分别实现了  $\text{MoSe}_2$  和  $\text{WSe}_2$  的调 Q 脉冲激光器,得到了重复频率范围在几兆赫兹以及脉冲宽度在纳秒量级的脉冲;2015年,Khazaiezhad 等<sup>[12]</sup>利用拉锥光纤,将  $\text{WS}_2$  作为可饱和吸收体,实现了一个中心波长为 1565 nm,重复频率范围为 33~108 kHz、脉冲宽度为 1.3~3  $\mu\text{s}$  的调 Q 脉冲激光器;同样在 2015年,Lin 等<sup>[13]</sup>将  $\text{WS}_2$  作为可饱和吸收体实现了一个波长可调节的调 Q 脉冲激光器,其波长调节范围为 1027~1065 nm。除了将 TMDs 作为可饱和吸收体实现调 Q 激光器之外,也有很多研究团队将 TMDs 作为可饱和吸收体应用于锁模激光器中:Ahmad 等<sup>[14]</sup>在 2016 年利用  $\text{MoSe}_2$  实现了具有 8 MHz 重复频率的锁模脉冲;2015年,吴侃等<sup>[15-16]</sup>将  $\text{MoS}_2$  作为可饱和吸收体成功实现了一个具有 463 MHz 基频的锁模激光器,之后他们又利用  $\text{WS}_2$  成功调出中心波长为 1550 nm、脉冲宽度为 595 fs 的飞秒脉冲激光器。从以上分析可知,TMDs 在最近几年来已经获得了越来越多的关注,并且已经应用于科研实践中,人们普遍研究了基于过渡金属硫族化合物作为饱和吸收体的调 Q 或者锁模现象,但是并未对调 Q 或锁模脉冲的稳定性进行系统的分析与研究,所以研究  $\text{WSe}_2$ -PVA 薄膜材料在脉冲激光器中的稳定性,便成了本文的研究出发点。

首先将二维材料硒化钨与聚合物聚乙烯醇(PVA)混合制成饱和吸收体薄膜,并将其嵌入掺铒保偏光纤激光器中,获得了稳定的调 Q 运转,并且利用保偏腔的腔体结构隔离掉外界环境对腔内双折射的影响。研究表明,热累积是导致材料在激光器中损坏的主要原因。相信本文的工作将会推动今后以过渡金属硫族化合物作为饱和吸收体在光纤脉冲激光器中的研究。

## 2 $\text{WSe}_2$ -PVA 材料的制备

$\text{WS}_2$ -PVA 材料的制备一般分为 2 种主要方式:自上而下和自下而上。自上而下的方式主要是通过打破材料中各层之间的范德瓦耳斯力,使体状材料剥离为单层薄膜状或几层薄膜状材料,主要包括机械剥离、激光减薄和溶液处理等。自下而上的方式则是直接从分子层面合成相应的材料,主要包括化学气相沉积法、分子束外延法、水热法、脉冲磁控溅射法、脉冲激光沉积法和气相硫化法等。按照是否有化学反应参与,可以将制备方法分为物理方法和化学方法。其中,物理方法主要为机械剥离法和液相剥离法。在本实验中,本课题组主要采用液相剥离法制备  $\text{WSe}_2$ -PVA 材料。该方法可以一次制备大量的纳米片,且能方便地与聚合物混合制成薄膜,是一种制备二维材料饱和吸收体的理想方法。

液相剥离法就是使用超声波在材料中产生微泡和迫力来打破不同分子层之间的范德瓦耳斯力。超声处理之后,再用离心机将未被剥离的材料和已剥离出来的二维纳米材料分隔开,未被剥离的材料沉积在液体底部,而少层二维纳米材料则悬浮在液体上方,以供收集。通过控制超声处理的时间和强度,就可以控制分离出来的材料的尺寸和层数。制备的饱和吸收体为  $\text{WSe}_2$ -PVA,它的制备过程如下:配制 5  $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$  的  $\text{WSe}_2$  水溶液和 50  $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$  的 PVA 水溶液,将 2 mL  $\text{WSe}_2$  溶液和 10 mL PVA 溶液用磁力搅拌机充分混合 24 h,之后用超声波处理 4 h,再将混合物滴到一个洁净的培养皿表面,在 50  $^\circ\text{C}$  下风干 3~4 d,即可获得表面平整的  $\text{WSe}_2$ -PVA 薄膜。

## 3 实验操作与结果

### 3.1 $\text{WSe}_2$ -PVA 饱和吸收特性的表征

饱和吸收特性是饱和吸收体非常重要的一种特性,它是一种无弹性的光学非线性效应,也就是说,在材料和入射光之间存在能量转换。对于二维材料来说,当一束光照射在薄膜表面时,价带电子受激跃迁到导带,由于散射作用的影响,这些电子逐渐损失能量,并跌落至低能态。当在同一时刻内有大量电子在入射光的作用下跃迁到导带时,导带就会被填满,价带电子的跃迁受到抑制。此时材料对入射光的吸收就会减少,材料处于饱和状态,故称为饱和吸收体。这种特性可用于实现脉冲激光器,如调 Q 脉冲激光器和锁模脉冲激光器。

双臂测试常用来测试材料的饱和吸收特性,如图 1 所示。其中,光源选取重复频率为 37 MHz 的锁模脉冲激光器。输出的激光经过 1 个隔离器后进入第 1 个耦合器,其分光比为 99:1。1%的光通过端口输入至光功率计 1,作为参考光测量,并计算入射光功率;另一侧 99%的光透过 SA(饱和吸收体)入射到耦合器 2

(其分光比为90:10),此处作为1个10 dB衰减器,可降低进入光功率计2的光功率,起到保护作用。通过调节锁模脉冲激光器的输出功率,可得到材料的饱和吸收特性曲线,如图2所示。在图2中,圆点代表实验数据,曲线代表拟合结果,采用的拟合方程如下:

$$T(I) = 1 - \Delta T \exp(-I/I_{\text{sat}}) - T_{\text{ns}}, \quad (1)$$

式中  $T(I)$  为透射率,  $\Delta T$  为调制深度,  $I$  为入射光强,  $I_{\text{sat}}$  为饱和强度,  $T_{\text{ns}}$  为非饱和吸收。由拟合结果可知调制深度约为7.17%,饱和强度为  $7 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,非饱和吸收损耗为65.97%。

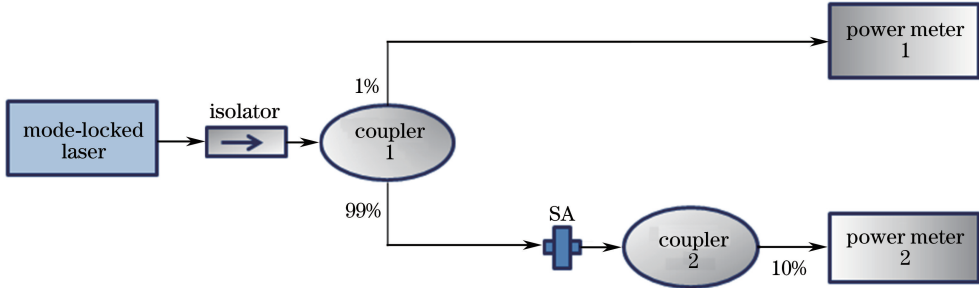


图1 饱和吸收特性测试示意图

Fig. 1 Illustration of saturable absorption measurement

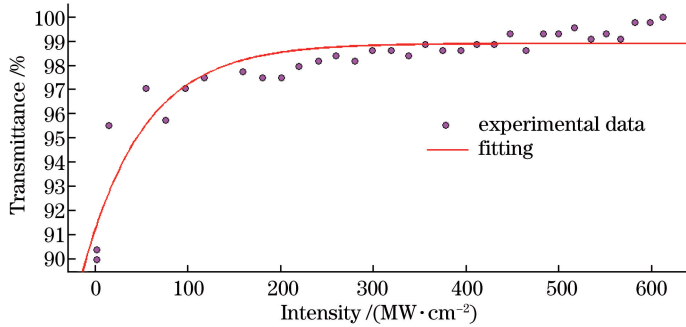


图2 WSe<sub>2</sub>-PVA 材料的饱和吸收特性曲线

Fig. 2 Saturable absorption curve of WSe<sub>2</sub>-PVA

### 3.2 基于 WSe<sub>2</sub>-PVA 实现保偏调 Q 激光器

为了研究材料的稳定性,首先采用保偏光纤制作腔体来实现调 Q 激光运转。保偏腔可以有效隔离外界环境对光纤双折射的扰动,从而保证激光器偏振态的稳定。该掺铒保偏光纤激光器的结构如图3所示。1台980 nm的激光二极管(LD)作为抽运源,1个980 nm和1550 nm的波分复用器(WDM)将980 nm的抽运光耦合进工作波长为1550 nm的激光器谐振腔中。980 nm抽运光注入掺铒光纤(EDF)中为激光器运转提供增益。隔离器确保激光器的单向运行。耦合器1将10%的光从腔内取出作为激光器输出,其余90%的

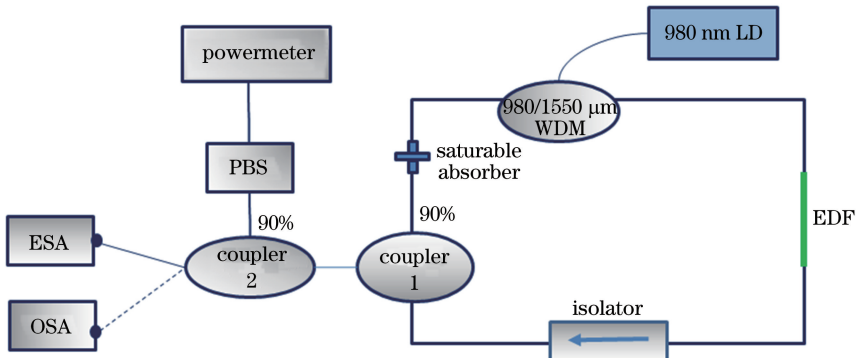


图3 保偏光纤激光器的结构图

Fig. 3 Setup of all polarization maintaining fiber laser

光返回腔中。WSe<sub>2</sub>-PVA 饱和吸收体被 2 个 FC/PC 光纤头通过法兰盘夹持在中间,这样光纤内的光束就能够通过 WSe<sub>2</sub>-PVA 饱和吸收体并使其发挥作用。激光器的输出通过耦合器 2 进一步分束。一路经过 1 个偏振分束器(PBS)进入到光功率计,可用来观察腔内偏振态的变化趋势。一路连接到光谱仪(OSA)用来获取激光器输出的光谱,或连到电谱仪(ESA)获取光电转换后电信号的频谱。

当抽运功率为 20 mW 时,激光器处于连续波工作状态,腔内的损耗较低。继续提高抽运功率到 130 mW 时,激光器产生不稳定的调 Q 脉冲串。当抽运功率小于 170 mW 时,调 Q 脉冲串的脉冲幅度产生较小的波动。当抽运功率范围在 170~300 mW 之间时,激光器输出较为稳定的调 Q 脉冲串。当抽运功率超过 300 mW 后,因材料受腔内高功率的影响,激光器的输出开始变得不稳定。为了获得锁模脉冲,激光器腔内的参数需要符合(2)式所示的关系<sup>[17]</sup>:

$$E_p^2 > E_{\text{sat,L}} E_{\text{sat,A}} \Delta R, \quad (2)$$

式中  $E_p$  为脉冲能量,与腔内的平均功率相关; $E_{\text{sat,L}}$  和  $E_{\text{sat,A}}$  分别为增益介质和饱和吸收体的饱和能量; $\Delta R$  为饱和吸收体的调制深度。因此在饱和吸收体参数一定的情况下,需要通过增大腔内功率来使激光器从调 Q 进入锁模运转。而在本课题组尝试通过增大抽运功率来实现锁模脉冲输出时,腔内较高的功率反而影响了饱和吸收体的稳定性,并未实现稳定的锁模脉冲输出,所以本课题组系统研究了 WSe<sub>2</sub>-PVA 饱和吸收体在调 Q 激光器中的稳定性,稳定性的研究将在 3.3 节展开。图 4 归纳了调 Q 激光器的输出参数。图 4(a) 为激光器的时域脉冲波形,图 4(b) 展示了单个脉冲的波形图,可见输出脉冲宽度为 1  $\mu\text{s}$ 。图 4(c) 是激光器的输出光谱,其输出光谱的中心波长为 1560 nm,说明激光器工作在较低损耗的状态下。图 4(d) 为激光器输出的电频谱,重复频率为 110 kHz,基频信噪比为 50 dB,说明激光器运行在一个较为稳定的工作状态下。

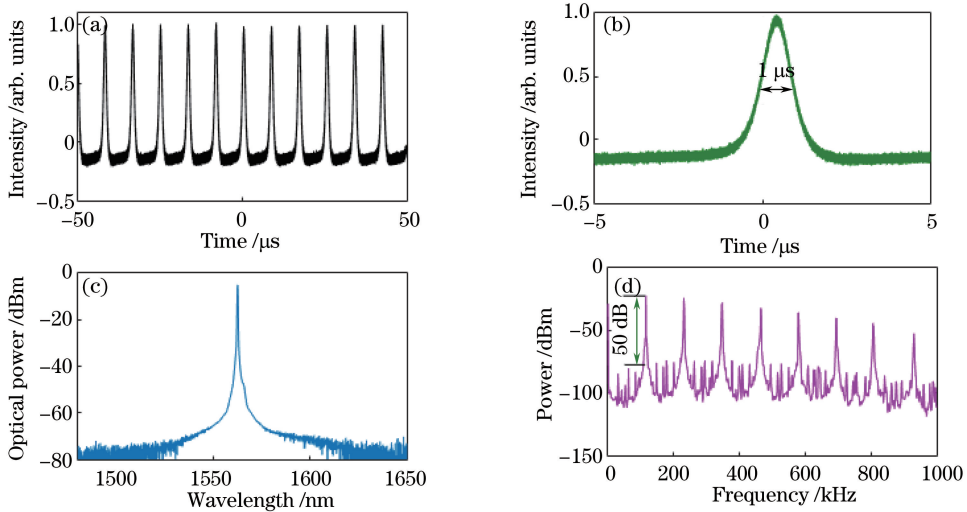


图 4 调 Q 激光器的输出特性。(a)时域脉冲波形;(b)单个脉冲的波形;(c)光谱;(d)电频谱

Fig. 4 Output performance of Q-switched fiber laser. (a) Pulse train waveform in the time domain; (b) single profile of the pulse; (c) optical spectrum; (d) electrical spectrum

对调 Q 激光器来说,脉冲宽度和重复频率是另外两个重要的参数。图 5(a) 记录了脉冲宽度和重复频率随抽运功率变化的规律。当抽运功率从 130 mW 增加到 170 mW 时,调 Q 状态不是特别稳定,脉冲的幅度随着时间而变化,从图 5 虚线左侧也可以明显看出输出参数的变化不稳定。当抽运功率超过 170 mW 时,达到了一个稳定的调 Q 状态,对应图 5 虚线右侧,输出脉冲串的幅度基本保持不变,维持在一个常数的水平。从图 5(a) 中可以看出脉冲宽度和重复频率这两个参数随着抽运功率的变化情况。随着抽运功率从 170 mW 增加到 430 mW,重复频率从 92 kHz 增加到 140 kHz,脉冲宽度从 1.5  $\mu\text{s}$  减小到 0.8  $\mu\text{s}$ 。值得一提的是,实验中脉冲宽度的量级是微秒级,根据文献<sup>[18]</sup>可知,在影响调 Q 脉冲宽度的诸多因素中,增益介质的长度是影响脉冲宽度的重要因素。采用较短的增益介质,如固态激光器,才会得到一二百纳秒或更窄的脉宽<sup>[11]</sup>。而本实验中采用的是光纤脉冲激光器,其增益光纤的长度一般是几十厘米到几米,属于较长的增益介质,因此脉宽宽度也较固态调 Q 激光器的宽,在微秒级别<sup>[10,19-21]</sup>。通过选用线性腔有望获得更短的脉冲宽度,但

是线性腔中材料的耦合方式一般为沉积在一面端面反射镜上,而反射镜本身会影响材料的热量积累,不利于分离变量来单独研究薄膜材料的热稳定性,所以为了研究饱和吸收体薄膜在透射工作方式下的热稳定性,本工作采用了环形腔的方式。脉冲能量和激光器输出功率的变化趋势如图 5(b)所示。从图中可以看出脉冲能量的变化范围为 12~29 nJ 之间,激光器输出功率的变化为 0~5.9 dBm。

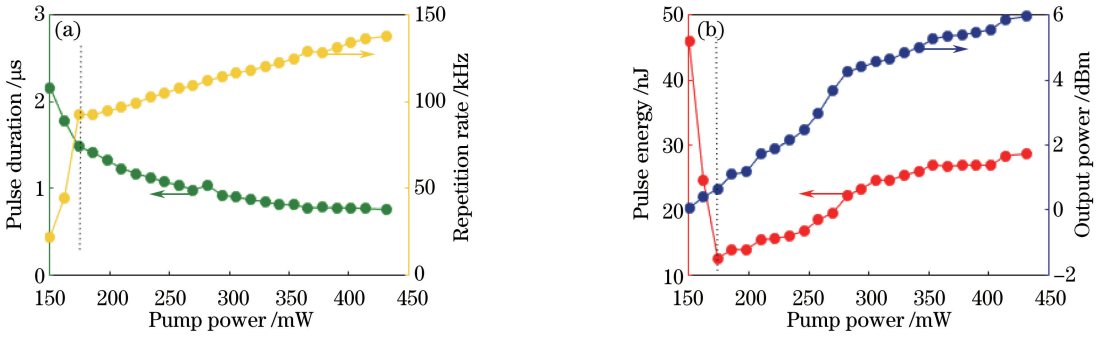


图 5 (a)激光器输出脉冲宽度和重复频率与抽运功率的关系,(b)脉冲能量和输出功率与抽运功率的关系

Fig. 5 (a) Variations of pulse duration and repetition frequency of laser with pump power; (b) variations of pulse energy and output power of laser with pump power

### 3.3 WSe<sub>2</sub>-PVA 在调 Q 激光器中的稳定性

为了研究饱和吸收体在调 Q 激光器持续输出时的变化情况,激光器的实时输出特性就变成了需要观察的重要参数。如上文所述,在这种情况下,保偏腔结构的设计能更好地隔离环境对测试的干扰,从而达到控制变量的作用。

为了观察材料在激光器输出中的稳定性,首先以小时为单位对激光器的输出功率进行了连续测量,共连续测量 12 h,发现激光器的输出功率波动较大,如图 6 所示,这可能是由于环境温度变化对激光器的扰动所致。所以缩短观察时间,研究材料在较短时间内的稳定性。更换相同的材料后,对激光器的输出功率连续记录了约 3 h(10000 s),记录精度为 1 s,如图 7 所示。从图中可以看出,输出功率的变化范围可以分为 4 个区间(记为区间 I、区间 II、区间 III 和区间 IV)。以下介绍每个区间内激光器输出特性的变化以及 WSe<sub>2</sub>-PVA 饱和吸收体的相关状态变化。

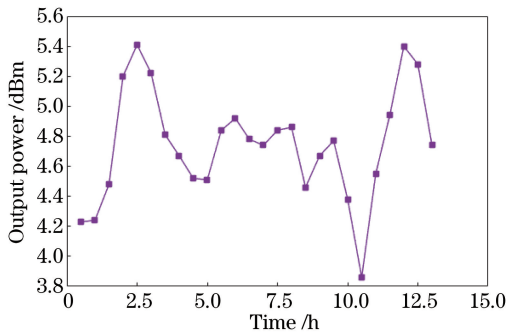


图 6 12 h 内激光器输出功率的变化

Fig. 6 Variation of laser output power in a period of 12 h

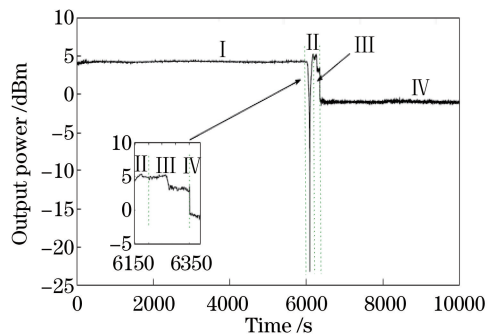


图 7 10000 s 内激光器输出功率的变化

Fig. 7 Variation of laser output power in a period of 10000 seconds

当激光器工作在区间 I 时,激光器维持在调 Q 状态稳定工作,此时的抽运功率锁定在 280 mW,输出功率达到 4.25 dBm,脉冲能量为 23 nJ。从图中可以看出,输出功率曲线是稳定的,浮动很小,变化的最大值为 0.25 dB。为了分析 WSe<sub>2</sub>-PVA 饱和吸收体对输出功率波动的影响,在图 8(a)中给出了对比实验结果。在这个对比实验中,记录了没有饱和吸收体情况下激光器以连续光模式运转 5000 s 的输出功率波动。从图 8 (a)中可以看出,输出功率变化的最大值为 0.15 dB,所以可以推断出饱和吸收体对激光器输出功率的影响约为 0.1 dB。这说明,虽然在区间 I 时,饱和吸收体并没有损坏,但从其对输出功率的影响来看,热量在激光器稳定工作的这个区间内正在逐渐积累,饱和吸收体特性正在发生缓慢且微弱的改变。此外,连续光激光器输

出偏振态的稳定性也通过 PBS 进行了研究,结果如图 8(b)所示。可见,功率的变化小于 0.25 dB,说明保偏腔确实可以隔绝环境扰动,使饱和吸收体对激光器功率的影响能够显现出来。为了验证饱和吸收体在区间 I 时的特性并未发生明显变化,调 Q 激光器的输出光谱和电频谱也被同时记录下来,且每 5 min 记录 1 组数据,一共记录了 19 组数据,如图 9 和图 10。在图 9 中,横轴代表光谱的波长,纵轴代表时间,图中红色高亮部分为光谱中心波长的位置。从图中可以看出激光器的输出光谱并未发生明显变化。图 10 为激光器输出的电频谱,频谱中的变化可以认为是腔体内部温度的变化对饱和吸收体造成的影响,也符合上文所分析的,即虽然饱和吸收体仍然能保证稳定的调 Q 运转,但热量在材料中的累积确实使饱和吸收体的特性发生了缓慢改变。

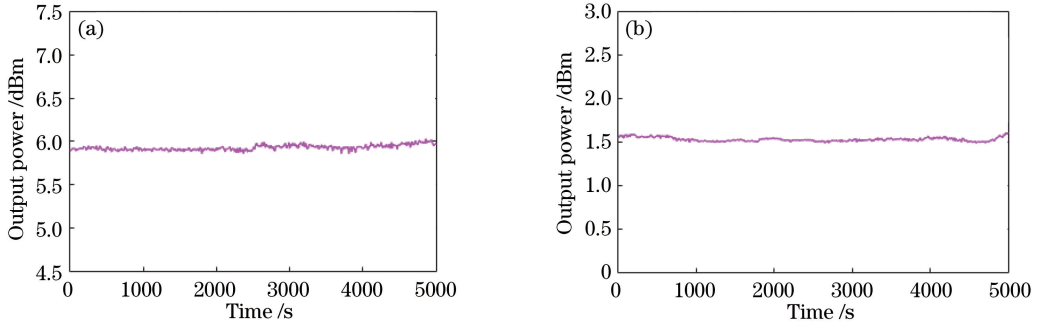


图 8 (a)激光器中无饱和吸收体时的输出功率变化,(b)经过 PBS 后输出功率的变化

Fig. 8 (a) Variation of output power of laser without SA in the cavity; (b) variation of output power after a PBS

在区间 II 中,通过抽运功率的变化来观察材料对光功率变化的响应情况。抽运功率先被人为调低,然后又迅速调高到 430 mW,然后再调回到 280 mW。测得激光器的输出功率表现为先降低然后升高到 5.49 dBm(430 mW),随后回落到抽运功率调回到区间 I 时的 280 mW。当抽运功率为 430 mW 时,对应的输出功率为 5.49 dBm,小于图 5(b)中测得的 5.95 dBm,这是因为此时的饱和吸收体已经工作了近 1.6 h,受热量累积的影响,饱和吸收体的性能已经发生了改变。从图 5(b)中可以发现,当抽运功率从 280 mW 增加到 430 mW 时,脉冲能量的上升幅度并没有输出功率上升的多,所以可以认为是腔内的平均功率而不是脉冲能量导致饱和吸收体的物理和光学特性发生了变化。随着区间 I 和区间 II 中的热量累积达到一定阈值时,WS<sub>e2</sub>-PVA 薄膜的基底材料 PVA 进入熔融状态,导致材料的透光性发生变化,从而影响光输出的稳定性,如图 7 中的区间 III 所示,激光器的输出功率变得不稳定。而透光性的变化导致了热量在薄膜中迅速累积,最终损坏 WS<sub>e2</sub>,导致薄膜的损耗迅速增加,激光器的输出功率也迅速下降至 0 dBm 以下。

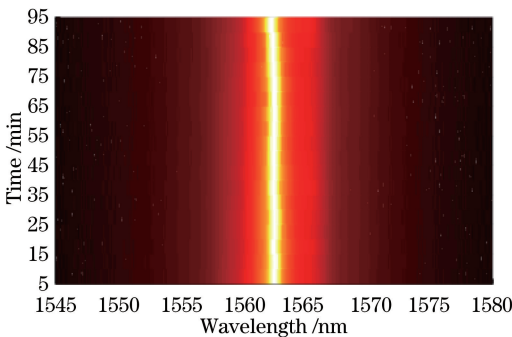


图 9 调 Q 激光器稳定工作期间的输出光谱

Fig. 9 Optical spectrum of the laser during a stable Q-switched operation

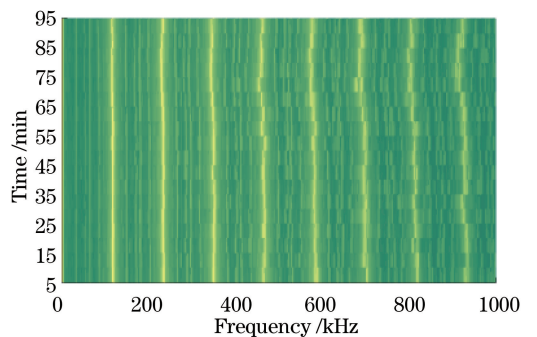


图 10 调 Q 激光器稳定工作期间的输出电频谱

Fig. 10 Electrical spectrum of the laser during a stable Q-switched operation

在区间 IV 中,由于 PVA 发生了熔融,部分未被损坏的 WS<sub>e2</sub> 可能填入光束照射的区域,使得薄膜的损耗虽然很高,但仍然保留了一定的饱和吸收体的功能,所以激光器仍然维持调 Q 运转,但相应的输出功率的波动明显大于区间 I 中输出功率的波动。激光器在区间 IV 时的输出参数也被记录下来,并与在区间 I 时的进行对比,如图 11 所示。其中图 11(a)~(c)是区间 I 时的输出参数图,(a)为时域波形,(b)为光谱,(c)为

电频谱,图 11(d)~(f)为区间 IV 时的输出参数图,(d)为时域波形,(e)为光谱,(f)为电频谱。从图中明显可以看出,与区间 I 相比,激光器在区间 IV 时的输出发生了明显的变化,各项指标均变差。对时域上的脉冲强度进行归一化处理,区间 I 的近脉冲强度由 1 变为区间 IV 的 0.5。电频谱的稳定性及重复频率都发生了变化。光谱的中心波长位置出现了 2 个波峰,说明激光器已处于不稳定的工作状态,相对应的就是饱和吸收体的特性发生了变化。为了更直观地观察材料的状态确实已经发生了变化,将未损坏材料和工作了近 1.6 h 材料的光学显微镜照片(相同的放大倍数下)进行对比,结果如图 12 所示。可知,工作了近 1.6 h 材料的中间高亮部分已与原始状态明显不同,材料的损伤直接表现为薄膜的插损增大。图中环形的 PVA 部分表明 PVA 在熔融状态下受到应力的作用由中心向外侧运动,形成环形结构,这说明材料的物理特性已经发生了改变。

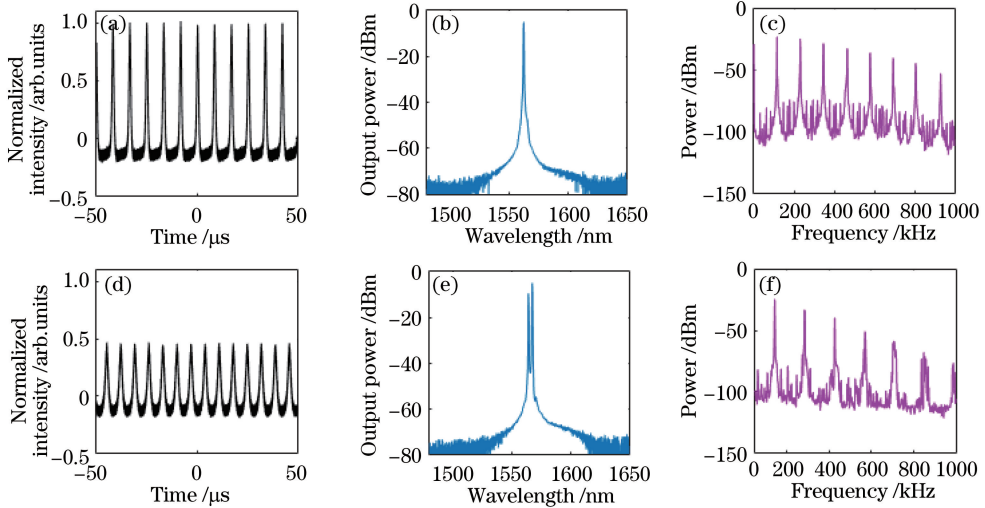


图 11 (a)~(c) 区间 I 和 (d)~(f) 区间 IV 的输出特性对比图。(a)(d) 时域波形;(b)(e) 光谱;(c)(f) 电频谱

Fig. 11 Comparison of output characteristics of the laser in the (a)-(c) region I and (d)-(f) region IV.

(a)(d) Pulse train in the time domain; (b)(e) optical spectrum; (c)(f) electrical spectrum

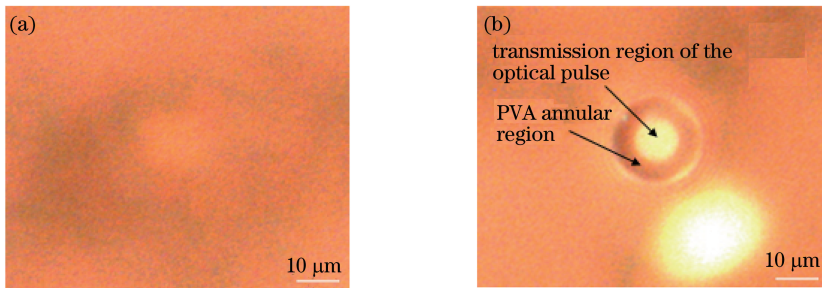


图 12 材料损坏前后的显微镜照片。(a) 损坏前;(b) 损坏后

Fig. 12 Photos of material before and after damage. (a) Before damage; (b) after damage

## 4 结 论

为研究  $WSe_2$ -PVA 饱和吸收体在调 Q 脉冲激光器中的稳定性,首先采用保偏的腔体结构实现了一个调 Q 激光器,保偏的腔体结构能够较好地隔离掉外界环境对光纤双折射的影响,并且能够很好地隔离掉激光器腔内偏振态的改变对激光器各项输出参数以及对材料物理特性和光学特性的影响,很好地控制腔外环境和腔内偏振态的可变因素,从而更加有利于研究过渡金属硫族化合物作为可饱和吸收体在调 Q 光纤脉冲激光器中的稳定性。在实现了保偏调 Q 激光器之后,对材料的稳定性进行了系统的分析与研究,通过对激光器输出功率、时域波形、电频谱和光谱的分析,研究了热量累积导致饱和吸收体损坏的物理过程。相信此工作将对研究二维材料饱和吸收体在激光器中的稳定性起到一定的促进作用。

## 参 考 文 献

- [1] Liu M, Yin X, Zhang X. Double-layer graphene optical modulator[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(3): 1482-1485.
- [2] Youngblood N, Anugrah Y, Ma R, *et al.* Multifunctional graphene optical modulator and photodetector integrated on silicon waveguides[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(5): 2741-2746.
- [3] Mueller T, Xia F, Avouris P. Graphene photodetectors for high-speed optical communications[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(5): 297-301.
- [4] Oya M, Kishikawa H, Goto N, *et al.* All-optical switch consisting of two-stage interferometers controlled by using saturable absorption of monolayer graphene[J]. *Optics Express*, 2012, 20: 27322-27330.
- [5] Wang Jinzhang, Luo Zhengqian, Zhou Min, *et al.* Evanescent-light deposition of graphene onto tapered fibers for passive Q-switch and mode-locker[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1295-1305.
- [6] Zhang H, Bao Q, Tang D, *et al.* Large energy soliton erbium-doped fiber laser with a graphene-polymer composite mode locker[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(14): 141103.
- [7] Zhang H, Tang D, Knize R J, *et al.* Graphene mode locked, wavelength-tunable, dissipative soliton fiber laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(11): 111112.
- [8] Popa D, Sun Z, Torrisi F, *et al.* Sub 200 fs pulse generation from a graphene mode-locked fiber laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(20): 203106.
- [9] Zhang H. Ultrathin two-dimensional nanomaterials[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(10): 9451-9469.
- [10] Chen B, Zhang X, Wu K, *et al.* Q-switched fiber laser based on transition metal dichalcogenides MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, and WSe<sub>2</sub>[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26723-26737.
- [11] Cheng C, Liu H, Tan Y, *et al.* Passively Q-switched waveguide lasers based on two-dimensional transition metal diselenide[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10385-10390.
- [12] Khazaeinezhad R, Nazari T, Jeong H, *et al.* Passive Q-switching of an all-fiber laser using WS<sub>2</sub>-deposited optical fiber taper[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(5): 1-7.
- [13] Lin J, Hu Y, Chen C, *et al.* Wavelength-tunable Yb-doped passively Q-switching fiber laser based on WS<sub>2</sub> saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29059-29064.
- [14] Ahmad H, Aidit S N, Hassan N A, *et al.* Generation of mode-locked erbium-doped fiber laser using MoSe<sub>2</sub> as saturable absorber[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(7): 076115.
- [15] Wu K, Zhang X, Wang J, *et al.* 463-MHz fundamental mode-locked fiber laser based on few-layer MoS<sub>2</sub> saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1374-1377.
- [16] Wu K, Zhang X, Wang J, *et al.* WS<sub>2</sub> as a saturable absorber for ultrafast photonic applications of mode-locked and Q-switched lasers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11453-11461.
- [17] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. *Nature*, 2003, 424: 831-838.
- [18] Degnan J J. Theory of the optimally coupled Q-switched laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(2): 214-220.
- [19] Zhang M, Hu G, Hu G, *et al.* Yb- and Er-doped fiber laser Q-switched with an optically uniform, broadband WS<sub>2</sub> saturable absorber[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 17482.
- [20] Ahmad H, Ismail M A, Suthaskumar M, *et al.* S-band Q-switched fiber laser using molybdenum disulfide (MoS<sub>2</sub>) saturable absorber[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(3): 035103.
- [21] Woodward R I, Howe R C, Runcorn T H, *et al.* Wideband saturable absorption in few-layer molybdenum diselenide (MoSe<sub>2</sub>) for Q-switching Yb-, Er- and Tm-doped fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 20051-20061.