

基于石墨烯三元复合材料的双波长孤子激光器

郭 波, 欧阳秋云, 李 施, 方再金, 王鹏飞

哈尔滨工程大学纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 报道了一种基于石墨烯三元复合材料(石墨烯/二氧化锡/聚苯胺薄膜)的可切换双波长孤子光纤激光器。该石墨烯复合材料由液相超声法制备而成,将其制成聚合物薄膜并转移到激光器腔内。该石墨烯器件不仅可以作为一种饱和吸收体来进行锁模,而且具有较强的三阶非线性光学效应,在激光器中,它可以构成一种滤波器来产生双波长脉冲。利用该双功能器件实现了光纤激光器的双波长孤子运转,最小脉冲宽度为 1.25 ps,基本重复频率为 2.13 MHz,相应的最高单脉冲能量为 1.51 nJ,峰值功率约为 1.2 kW。

关键词 材料; 石墨烯复合材料; 被动锁模; 孤子; 多波长

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0703012

Dual-Wavelength Soliton Laser Based on Graphene Ternary Composite

Guo Bo, Ouyang Qiuyun, Li Shi, Fang Zaijin, Wang Pengfei

Key Laboratory of In-fiber Integrated Optics, Ministry Education of China, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract We report a switchable dual-wavelength soliton fiber laser based on graphene ternary composite, that is, graphene/SnO₂/PANI film. The graphene composite is synthesized by the liquid-phase ultrasonic method, the composite is transferred into the laser cavity by the polymer-film method. The as-prepared graphene device not only can act as an excellent saturable absorber for mode-locking, but also induces a highly third-order nonlinear optical effect to form a filter for dual-wavelength pulse generation in the laser. By exploiting the dual-function of this device, the switchable dual-wavelength soliton operation of the fiber laser is stably initiated with a minimum pulse width of 1.25 ps, a fundamental repetition rate of 2.13 MHz, a pulse energy of 1.51 nJ and peak power of 1.2 kW.

Key words materials; graphene composite; passive mode-locking; soliton; multiwavelength

OCIS codes 160.4330; 140.3510; 140.4050

1 引 言

自 20 世纪 60 年代 E. Snitzer 提出将光纤技术应用于激光器以来,孤子激光器一直是激光领域重要的研究热点^[1]。多波长孤子激光器作为孤子激光器家族中的一员,因具有脉冲宽度短、峰值功率高、工作波段宽等优点而成为光通信、非线性光学、光纤传感等领域的关键器件,逐渐成为众多科学家关注的一个焦点。为实现多波长孤子光纤激光器,通常需要在腔内插入一个锁模器和一个滤波器,从而将连续光变为一串由多个不同波长组成的孤子脉冲^[2]。对于前者,已有几种主动锁模技术^[3]和被动锁模技术(如非线性偏振旋转^[4-9]、非线性光纤环形镜^[10-12]及饱和吸收体^[13-18]等)被用来实现孤子脉冲输出。与主动锁模相比,被动锁模技术更具优势,其结构简单、紧凑,成本低,不需要调制器,易获得具有高峰值功率的锁模脉冲等。对于后者,有许多直接方法(如采样光栅^[3]和高双折射光纤^[5])和间接方法(如在高非线性光纤中产生四波混频效应或

收稿日期: 2017-01-30; **收到修改稿日期:** 2017-04-05

基金项目: “十三五”装备预研领域基金(6140414040116CB01012)、科技部国际合作专项(2016YFE0126500)、国家自然科学基金(61575050,61575051)、黑龙江省自然科学基金(ZD2016012,A2015015)、哈尔滨工程大学 111 项目(B13015)

作者简介: 郭 波(1980—),男,博士,讲师,主要从事二维材料光电器件、锁模及调 Q 光纤激光技术、中红外激光技术及非线性物理等方面的工作。E-mail: guobo512@hrbeu.edu.cn

受激布里渊散射^[15])被用来实现多波长激光输出。通过这些方法使腔内功率在不同波长间重新分配,以有效抑制增益光纤均匀展宽引起的模式竞争和跳变,从而获得多波长激光输出。1991年,美国斯坦福大学的Schlager等^[2]采用双折射保偏光纤在主动锁模掺铒光纤激光器中实现了脉宽为2 ps的双波长脉冲;1992年,英国南安普顿大学的Matsas等^[4]利用非线性偏振旋转技术实现了双波长孤子锁模掺铒光纤激光器。不过,这些方法也有不足之处,如锁模条件非常严格,需要仔细调整腔内参数,且易受光纤运动的影响,这些缺点迫使超快激光领域的研究人员寻找新的锁模机制。

石墨烯自2004年问世以来,其新奇的电学、热学及光学性质引起了物理、化学和材料领域研究人员的极大兴趣,探索石墨烯在光纤器件上的应用已成为目前光电子领域的热点问题之一^[19-25]。2009年,新加坡南洋理工大学的鲍桥梁等和英国剑桥大学的孙志培等发现了石墨烯的饱和吸收特性,并将其用在激光器中实现了多种孤子脉冲输出。随后,利用石墨烯显著的高非线性,人们获得了多波长孤子脉冲^[26-29]。这是因为,石墨烯器件在激光器腔内既可以充当饱和吸收体,又可以等效为一段高非线性光纤来滤波,具有双重功能。与传统方法^[4-12]相比,该类器件具有损耗更小、成本更低,且可使激光器全光纤化等优点。2011年,厦门大学的罗正钱等^[26]利用石墨烯拉锥器件在掺铒光纤激光器中获得了皮秒量级的四波长锁模脉冲;2014年,华南师范大学的罗智超等^[27]利用石墨烯拉锥器件在掺铒光纤激光器中获得了双波长矩形脉冲。不过,需要指出的是,石墨烯本身的三阶非线性折射系数相对较小,为了提高石墨烯器件的非线性,一般需借助拉锥光纤或侧抛光纤结构带来的倏逝场效应,虽然通过这些方法可以实现多波长激光输出,但因石墨烯在拉锥光纤上分布不均匀,从而导致得到的多波长脉冲的波长间隔较窄,而且拉锥工艺相对较困难。为此,本课题组提出了这样一个问题:可否制备一个高非线性的石墨烯薄膜(其非线性强度可以与沉积石墨烯的拉锥光纤相当,甚至更高)来实现多波长孤子脉冲输出?

由于石墨烯复合材料独特的结构以及与纳米材料之间的协同作用,石墨烯纳米复合材料在电学、热学及能源领域都展示出了优异的性能,引起了研究人员对其非线性光学及光电特性的极大重视^[30-33]。2009年,南开大学的张晓亮等^[32]制备了一种石墨烯以共价键形式附着在低聚噻吩基质上的二元复合材料,并研究了它的光学非线性以及光限幅性;结果显示,该石墨烯复合材料的非线性光学性能相比单一的石墨烯及低聚噻吩均有了很大提升。2013年,Husain等^[33]利用I-scan法研究了石墨烯-聚乙烯醇二元复合材料在785 nm和1064 nm处的非线性光学响应;他们指出,这类二元复合材料不仅具有聚合物基质高度灵活的物理可塑性和结构,还具有石墨烯优良的饱和吸收特性、电子迁移性以及机械稳定性。此外,金属纳米材料不仅具备纳米材料和金属材料的特有性质,还具备良好的三阶光学非线性^[34-36]。可以设想,如果将金属纳米粒子和石墨烯聚合物结合起来组成三元复合纳米材料,那么该三元复合纳米材料将会表现出更为优异的三阶非线性光学性能,该材料是一种潜力巨大的光学材料。然而,目前这方面的研究还鲜有人涉入。

本课题组利用石墨烯三元复合材料的饱和吸收和高非线性,构建了一种可切换、双波长孤子光纤激光器,并深入分析了其双波长孤子脉冲的形成机理。

2 材料制备、器件制作和实验装置

2.1 材料的制备和表征

首先,将5.0 mg石墨烯加入到100 mL去离子水中,经10 min超声处理后,依次加入1.90 g氯化亚锡以及1.4 mL浓盐酸,再超声处理10 min,然后在室温下搅拌5 h,待反应完毕后,抽滤、分离,就得到了石墨烯/二氧化锡纳米复合材料;接着,将该石墨烯/二氧化锡纳米复合材料在氢氫环境(氢气的体积分数为10%)中于750 °C退火3 h,得到了锡核壳结构复合材料——石墨烯/二氧化锡粉末;然后将上述制得的0.15 g石墨烯/二氧化锡粉末加入到100 mL浓度为1 mol·L⁻¹的盐酸溶液中,经10 min超声处理后,就得到了石墨烯/二氧化锡溶液;将0.25 g过硫酸铵与0.2 mL苯胺加入到100 mL、浓度为1 mol·L⁻¹的盐酸溶液中,经10 min超声处理后,加入到石墨烯/二氧化锡溶液中,然后放入低温恒温搅拌反应浴中,待温度降至-5 °C后搅拌2 h,再用去离子水 and 无水乙醇对样品进行离心和清洗处理,然后在40 °C下真空干燥24 h;在氢氫(氢气的体积分数为10%)环境中,在750 °C退火处理3 h,得到石墨烯/二氧化锡/聚苯胺复合材料(G/SnO₂)_{0.15}/PANI;将1 mg的(G/SnO₂)_{0.15}/PANI放入到0.1 mL的N-甲基吡咯烷酮(NMP)中超声处理15 min,然后

加入到1 mL的 PVDF(聚偏氟乙烯)溶剂(由体积分数为 75%的 PVDF 和体积分数为 25%的 NMP 混合而成)中,超声处理 15 min 后将0.1 mL溶液滴至载玻片上,放入 60 °C 干燥箱中干燥 8 h,就得到了 G/SnO₂/PANI 有机薄膜,如图 1(a)所示。从图中可以看出,该薄膜表面是均匀的,而且对可见光是透明的。图 1(b)和 1(c)分别为该 G/SnO₂/PANI 薄膜的扫描电镜(SEM)形貌。

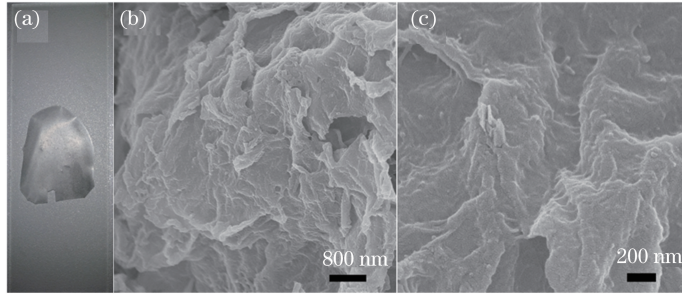


图 1 G/SnO₂/PANI 薄膜的(a)实物照片以及(b)低倍率和(c)高倍率扫描电镜形貌

Fig. 1 (a) Physical photo, (b) low magnification and (c) high magnification SEM morphology of G/SnO₂/PANI film

2.2 器件的制作和非线性吸收

从大片的 G/SnO₂/PANI 薄膜中剪下一小块(尺寸约为 1mm×1 mm)并贴在光纤跳线端面上,如图 2(a)所示。充分干燥后,通过法兰盘与另一根洁净的光纤跳线对接,组成一个光纤器件,如图 2(b)所示。G/SnO₂/PANI 器件是否具有饱和吸收是实验能否成功的关键因素,因此采用功率相关透射法来测量石墨烯器件的饱和吸收特性,所用实验装置与文献[37]相同,其中,抽运光源为中心波长为 1550 nm 的半导体可饱和吸收镜的锁模光纤激光器,其脉冲宽度为 500 fs,重复频率为 50 MHz,脉冲能量为 0.3~3 nJ。

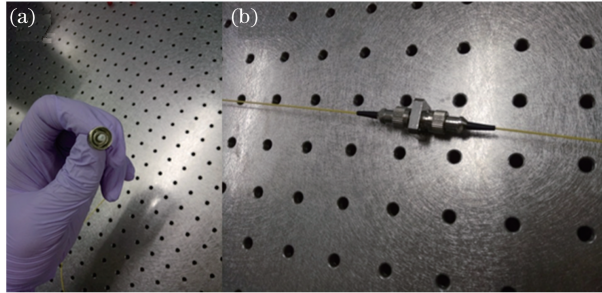


图 2 转移 G/SnO₂/PANI 薄膜后(a)光纤端面及(b)锁模器件的照片

Fig. 2 Photos of (a) fiber tip and (b) mode-locker after transferring G/SnO₂/PANI film

根据二能级模型^[19-20],可以给出所制备的 G/SnO₂/PANI 器件非线性饱和吸收数据的拟合曲线,如图 3 所示。所用拟合公式为:

$$T(I) = 1 - T_{ns} - \Delta T \cdot \exp\left(-\frac{I}{I_{sat}}\right), \quad (1)$$

式中 $T(I)$ 为透射率, I 为输入脉冲能量, ΔT 为调制深度, I_{sat} 为饱和强度, T_{ns} 为非饱和损耗。

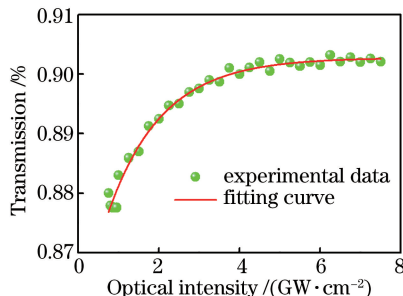


图 3 G/SnO₂/PANI 器件的非线性饱和吸收曲线

Fig. 3 Nonlinear saturable absorption curve of G/SnO₂/PANI device

根据(1)式可以计算出该 G/SnO₂/PANI 器件的非线性饱和吸收参数如下:饱和强度约为 1.28 GW·cm⁻²,调制深度约为 2.64%,非饱和吸收损耗约为 9.8%。与文献[19-23]报道的相比,本课题组制备的 G/SnO₂/PANI 器件的饱和强度较大,这可能是因为在实验中使用的石墨烯薄膜厚度较大。此外,在实验发现,由于受制备 G/SnO₂/PANI 薄膜所用旋涂法本身特点的影响,在靠近中心的地方,薄膜厚度较大;远离中心的地方,薄膜厚度较小。因此,在大片 G/SnO₂/PANI 薄膜不同位置剪下的小块薄膜制备的锁模器,将表现出不同的非线性吸收特征。

2.3 实验装置

为了检验 G/SnO₂/PANI 器件的性能,将其置于环形腔光纤激光器中。图 4 给出了所用光纤激光器的实验装置图,该激光器由 1 个熔融 980 nm/1550 nm 波分复用器(WDM)、一段约为 5 m 的高掺杂掺铒光纤(Core active L900, EDF)、一段长约 90 m 的单模光纤(SMF)、1 个 10:90 光耦合器(OC)、1 个偏振控制器(PC)、1 个 G/SnO₂/PANI 器件和 1 个带尾纤的 976 nm 半导体激光器(980-500-B-FA, LD)组成。其中,SMF 的色散参数为 18 ps·km⁻¹·nm⁻¹;EDF 的色散参数约为 -16.3 ps·km⁻¹·nm⁻¹,其峰值吸收在 1530 nm 处,为 14.5 dB·m⁻¹。激光器腔内的净色散约为 -2 ps²,半导体激光器 LD 的最大输出功率约为 420 mW。波分复用器 WDM 连接抽运源,光耦合器 OC 用来提取输出光,偏振无关隔离器 ISO 和偏振控制器 PC 分别用来迫使光在环形腔内单向运转和调整传输光的偏振态,G 为 G/SnO₂/PANI 器件。该脉冲激光器的性能由 1 个功率计、1 个光谱分析仪(ANDO, AQ-6317B)和 1 个光电探测器(Thorlabs, PDA 2 GHz)连接到 1 GHz 混合示波器(Tektronix MDO4054-6, 5 GHz·s⁻¹)上进行测试。

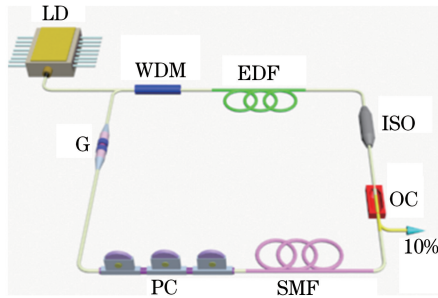


图 4 G/SnO₂/PANI 锁模光纤激光器的实验装置图

Fig. 4 Schematic setup of G/SnO₂/PANI mode-locked fiber laser

3 实验结果与分析

在 G/SnO₂/PANI 器件接入环形激光器之前,将抽运功率从 0 逐渐增加到 420 mW,并在很大范围内调整偏振控制器。在此过程中,既没有发现锁模脉冲,也没有观察到多波长激光输出,这就排除了非线性偏振旋转锁模和 Fabry-Perot 效应的发生。之后,将 G/SnO₂/PANI 器件接入到环形光纤激光器内,并将抽运功率从 0 逐渐增加到 420 mW,同时调整偏振控制器。实验发现,该激光器的自启动锁模阈值约为 105 mW;当抽运功率增加到 300 mW 时,通过适当调整偏振控制器还获得了双波长孤子脉冲,如图 5 所示。

在此主要讨论抽运功率为 330 mW 时双波长孤子脉冲的光学性能。从图 5(a)可以看出,整个光谱包含两部分,右边部分的中心波长位于 1557.6 nm,左边部分的中心波长位于 1532 nm。可以看出,它们均带有明显的 Kelly 边带,这是孤子光谱的典型特征,它们的 3 dB 带宽分别为 2.1 nm 和 0.8 nm。需要指出的是,位于 1532 nm 处的尖峰为连续波。图 5(b)给出了双波长孤子脉冲的脉冲序列。可以看出,有 2 个脉冲在激光器内传输,其周期均为 470.8 ns(相应的基本腔频率为 2.13 MHz),这与孤子脉冲在腔内的循环时间相符,从而进一步说明了该激光器处于锁模状态。此外,在实验中通过使用 1 个梳状滤波器还获得了长波长处(1557.6 nm)的单孤子输出,使用自相关仪测出其脉冲宽度约为 1.25 ps,如图 5(b)中的插图所示。根据孤子理论^[37],可以计算出其时间带宽积约为 0.328,该值略大于理论极限值(0.315),说明了腔内啁啾的存在。为了验证该双波长孤子脉冲的长期稳定性,给出了其长期输出谱(14 h,间隔为 2 h),如图 5(c)所示。可以看出,该双波长孤子脉冲具有良好的长期稳定性。

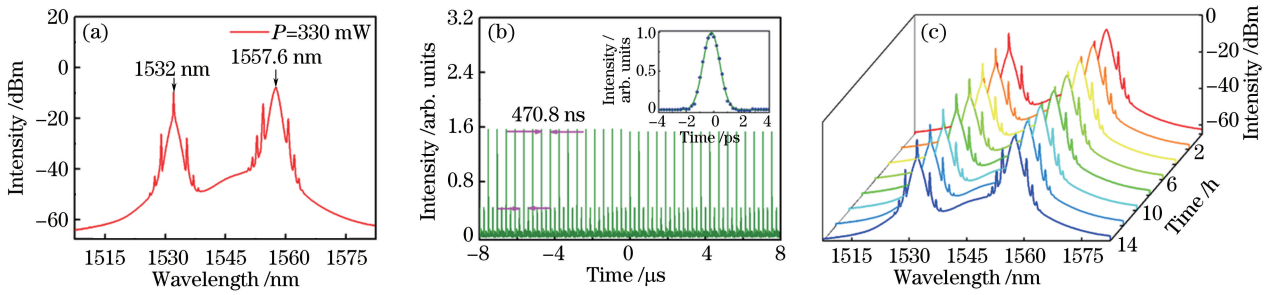


图 5 抽运功率为 330 mW 时, 双波长孤子脉冲的典型特征。(a) 光谱; (b) 相应的示波迹, 插图自相关迹; (c) 长期光谱演化, 14 h, 间隔 2 h

Fig. 5 Typical characteristics of dual-wavelength soliton pulse at pump power of 330 mW. (a) Optical spectrum; (b) its corresponding oscilloscope trace, the inset is the autocorrelation trace; (c) long-term optical spectra measured at 2 h interval over 14 h

进一步地, 保持抽运功率不变, 通过适当调整偏振控制器, 实现了双波长激光器中单个孤子脉冲的可切换运转, 如图 6 所示。图 6(a) 右边部分孤子光谱的中心波长位于 1557.6 nm 处, 其 3 dB 光谱带宽约为 2.1 nm; 左边部分为连续波, 光谱的中心波长位于 1532 nm 处。图 6(b) 给出了相应的脉冲序列, 可以看出, 只有 1 个脉冲在激光器内传输。图 6(c) 和 6(d) 分别给出了短波长处(1532 nm) 孤子脉冲的光谱和脉冲序列。

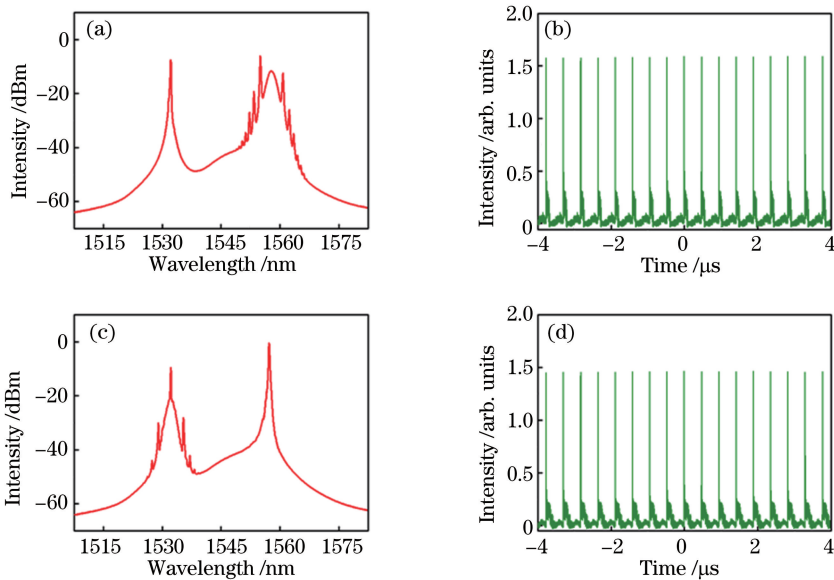


图 6 (a), (c) 可切换孤子脉冲的输出光谱及 (b)、(d) 相应的示波迹

Fig. 6 (a), (c) Output optical spectra and (b), (d) corresponding oscilloscope traces of switchable soliton pulse

图 7 给出了该激光器的平均输出功率与抽运功率之间的关系。可以看出, 它的输出功率与抽运功率之间是线性依赖关系。如前文所述, 当抽运功率超过 300 mW 后, 激光器处于双波长孤子运转状态; 当抽运功率增加至 420 mW 时, 获得了最大输出功率 3.2 mW, 相应的脉冲能量约为 1.51 nJ, 峰值功率约为 1.2 kW。此外, 表 1 总结了近年来研究人员利用饱和吸收体在掺铒光纤激光器中获得的双波长孤子脉冲输出。可以看出, 与碳纳米管 CNT、拓扑绝缘体 Bi₂Te₃、少层二硫化钨 WS₂ 及六方氮化硼 h-BN 类似, 石墨烯三元复合材料也具有十分优异的光学性质。

在上述光纤激光器中没有使用梳状滤波器, 但仍获得了双波长孤子脉冲, 同时实验还发现, 该双波长孤子脉冲具有可切换性, 这意味着腔内双折射滤波器的存在。在一般的激光器中, 由于普通光纤的双折射很弱, 腔内双折射诱导的双折射滤波器的带宽很大, 波长间隔达几十纳米, 其滤波效应可以忽略, 因而不易观察到双波长输出。然而在本实验中, 这种情形发生了变化。如果没有石墨烯器件, 在很大范围内, 无论如何调整抽运功率和偏振态都不会有双波长脉冲激光输出。因此, 该石墨烯器件在增强腔内产生滤波效应的过程

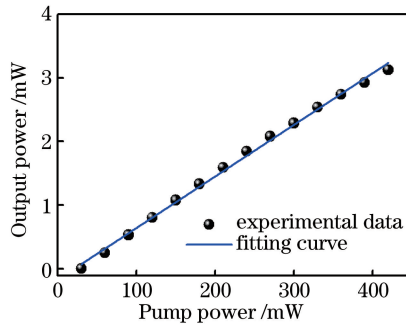


图 7 双波长孤子激光器输出功率与抽运功率之间的关系

Fig. 7 Output power versus pump power of dual-wavelength soliton laser

中起到了关键作用。研究发现,在激光器中引入高非线性器件时,将导致高双折射现象发生,有利于滤波效应的产生。在实验中,G/SnO₂/PANI 器件具有双重功能,既具有石墨烯的饱和吸收特性,又具有非常高的三阶非线性。因此,在激光器内,G/SnO₂/PANI 器件既可以用来锁模,同时又可以等效为一段高非线性光纤,利用其显著的高非线性效应来实现双波长孤子脉冲的稳定输出。这与文献[4-12]的报道明显不同:为了实现双波长激光输出,一般需要额外使用几千米的光纤累积非线性效应来增加双折射强度以及平衡激光器的增益竞争。此外,由于本实验制备的 G/SnO₂/PANI 薄膜的厚度较大(20~30 μm),从而造成该激光器的锁模阈值较高(105 mW),在未来的工作中,本课题组将对该石墨烯薄膜的厚度及平整性进行优化,以获得输出功率更高的双波长,甚至波数更多的孤子激光器。

表 1 基于可饱和吸收体的双波长孤子掺铒光纤激光器的对比

Table 1 Comparison of dual-wavelength soliton Er-doped lasers based on saturated absorbers

Saturated absorber	Central wavelength /nm	Wavelength spacing /nm	Pulse duration /ps	Output power /mW	Pulse energy /nJ	Reference
CNT	1532, 1557	25	—	0.248	—	[7]
CNT	1549.5, 1559.5	10	—	—	—	[15]
Bi ₂ Te ₃	1557.4, 1559.4	2	1.3	—	—	[41]
WS ₂	1558.5, 1566	7.5	0.6	10.1	1.14	[45]
h-BN	1531.5, 1557.5	26	1.3	7.2	3.4	[49]
G/SnO ₂ /PANI	1532, 1557.6	25.6	1.25	3.2	1.51	This work

最后需要指出的是,除了石墨烯及其复合材料,其他二维材料,如拓扑绝缘体^[38-41]、少层过渡金属硫化物^[42-46]、黑磷^[47-48]及六方氮化硼^[49]等,均为直接带隙层状材料。可以推测,这些材料也可以用于制作高非线性的光子器件,来实现多波长孤子脉冲输出。在未来的工作中,将对这些二维材料的三阶非线性光学性质和器件进行深入研究,以设计出更多类型的多波长孤子激光器。

4 结 论

利用 G/SnO₂/PANI 器件的双重功能实现了可切换的双波长孤子脉冲输出,波长间隔为 25.6 nm,最小脉冲宽度为 1.25 ps。当抽运功率为 420 mW 时,获得了该双孤子激光器的最大输出功率 3.2 mW,相应的最高单脉冲能量为 1.51 nJ,峰值功率约为 1.2 kW。这说明,石墨烯三元复合材料 G/SnO₂/PANI 具有十分优异的三阶非线性光学性质,可用来制作非线性光子学器件,将成为研究非线性光学现象的一个热点材料。

参 考 文 献

- [1] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. Nature, 2003, 424(6950): 831-838.
- [2] Schlager J B, Kawanishi S, Saruwatari M. Dual wavelength pulse generation using mode-locked erbium-doped fibre ring laser[J]. Electronics Letters, 1991, 27(22): 2072-2073.
- [3] Deparis O, Kiyari R, Salik E, et al. Round-trip time and dispersion optimization in a dual-wavelength actively mode-locked Er-doped fiber laser including nonchirped fiber Bragg gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11

- (10): 1238-1240.
- [4] Matsas V J, Newson T P, Richardson D J, *et al.* Self-starting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation[J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(15): 1391-1393.
- [5] Chen Z, Sun H, Ma S, *et al.* Dual-wavelength mode-locked erbium-doped fiber ring laser using highly nonlinear fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(24): 2066-2068.
- [6] Zhang H, Tang D, Zhao L, *et al.* Dual-wavelength domain wall solitons in a fiber ring laser[J]. *Optics Express*, 2011, 19(4): 3525-3530.
- [7] Zhao X, Zheng Z, Liu L, *et al.* Switchable, dual-wavelength passively mode-locked ultrafast fiber laser based on a single-wall carbon nanotube modelocker and intracavity loss tuning[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1168-1173.
- [8] Mao D, Lu H. Formation and evolution of passively mode-locked fiber soliton lasers operating in a dual-wavelength regime[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, 29(10): 2819-2826.
- [9] Lin H, Guo C, Ruan S, *et al.* Tunable and switchable dual-wavelength dissipative soliton operation of a weak-birefringence all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(5): 1501807.
- [10] Noske D U, Guy M J, Rottwitt K, *et al.* Dual-wavelength operation of a passively mode-locked “figure-of-eight” ytterbium-erbium fibre soliton laser[J]. *Optics Communications*, 1994, 108(4): 297-301.
- [11] Yun L, Liu X, Mao D. Observation of dual-wavelength dissipative solitons in a figure-eight erbium-doped fiberlaser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 20992-20997.
- [12] Ning Q Y, Wang S K, Luo A P, *et al.* Bright-dark pulse pair in a figure-eight dispersion-managed passively mode-locked fiber laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1647-1652.
- [13] Zhang H, Tang D Y, Wu X, *et al.* Multi-wavelength dissipative soliton operation of an erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 12692-12697.
- [14] Luo Z C, Luo A P, Xu W C. Tunable and switchable multiwavelength passively mode-locked fiber laser based on SESAM and inline birefringence comb filter[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3(1): 64-70.
- [15] Chen G W, Li W L, Yang H R, *et al.* Switchable dual-wavelength fiber laser mode-locked by carbon nanotubes[J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, 62(5): 353-357.
- [16] Liu X, Han D, Sun Z, *et al.* Versatile multi-wavelength ultrafast fiber laser mode-locked by carbon nanotubes[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2718.
- [17] Song Q Y, Chen G X, Tan X L, *et al.* Multiwavelength passively mode-locked laser based on single-walled carbon nanotube[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0102002.
宋秋艳, 陈根祥, 谭晓琳, 等. 基于单壁碳纳米管的多波长被动锁模激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0102002.
- [18] Wang Y B, Qi X H, Shen Y, *et al.* Ultra-long cavity multi-wavelength Yb-doped fiber laser mode-locked by carbon nanotubes[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 64(20): 204205.
王玉宝, 齐晓辉, 沈阳, 等. 超长腔碳纳米管锁模多波长掺镱光纤激光器[J]. *物理学报*, 2015, 64(20): 204205.
- [19] Bao Q, Zhang H, Wang Y, *et al.* Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers [J]. *Advanced Functional Materials*, 2009, 19(19): 3077-3083.
- [20] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, *et al.* Graphene photonics and optoelectronics[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(9): 611-622.
- [21] Martinez A, Fuse K, Xu B, *et al.* Optical deposition of graphene and carbon nanotubes in a fiber ferrule for passive mode-locked lasing[J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 23054-23061.
- [22] Song Y W, Jang S Y, Han W S, *et al.* Graphene mode-lockers for fiber lasers functioned with evanescent field interaction[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(5): 051122.
- [23] Liu Jiang, Wu Sida, Wang Ke, *et al.* Passively mode-locked and Q-switched Yb-doped fiber lasers with graphene-based saturable absorber[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0802001.
刘江, 吴思达, 王科, 等. 基于石墨烯可饱和吸收体的被动锁模, 被动调Q掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0802001.
- [24] Tian Zhen, Liu Shanliang, Zhang Bingyuan, *et al.* Graphene mode-locked Er³⁺ doped fiber pulse laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(3): 0302004.
田振, 刘山亮, 张丙元, 等. 石墨烯锁模掺铒光纤脉冲激光器的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0302004.
- [25] He Jingliang, Hao Xiaopeng, Xu Jinlong, *et al.* Ultrafast mode-locked solid-state lasers with grapheme saturable absorber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900138.
何京良, 郝霄鹏, 徐金龙, 等. 基于石墨烯可饱和吸收被动锁模超快全固体激光器的研究[J]. *光学学报*, 2011, 31

- (9): 0900138.
- [26] Luo Z Q, Wang J Z, Zhou M, *et al.* Multiwavelength mode-locked erbium-doped fiber laser based on the interaction of graphene and fiber-taper evanescent field[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(3): 229-233.
- [27] Zhao N, Liu M, Liu H, *et al.* Dual-wavelength rectangular pulse Yb-doped fiber laser using a microfiber-based graphene saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2014, 22(9): 10906-10913.
- [28] Huang S, Wang Y, Yan P, *et al.* Tunable and switchable multi-wavelength dissipative soliton generation in a graphene oxide mode-locked Yb-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11417-11426.
- [29] Zhou J, Luo A, Luo Z, *et al.* Dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber laser with switchable wavelength spacing based on a graphene saturable absorber[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(2): A21-A24.
- [30] Wang J, Hernandez Y, Lotya M, *et al.* Broadband nonlinear optical response of graphene dispersions[J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(23): 2430-2435.
- [31] Lim G K, Chen Z L, Clark J, *et al.* Giant broadband nonlinear optical absorption response in dispersed graphene single sheets[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(9): 554-560.
- [32] Zhang X L, Zhao X, Liu Z B, *et al.* Enhanced nonlinear optical properties of graphene-oligothiophene hybrid material [J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 23959-23964.
- [33] Husaini S, Slagle J E, Murray J M, *et al.* Broadband saturable absorption and optical limiting in graphene-polymer composites[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(19): 191112.
- [34] Kyoung M, Lee M. Nonlinear absorption and refractive index measurements of silver nanorods by the Z-scantechique [J]. *Optics Communications*, 1999, 171(1): 145-148.
- [35] Anija M, Thomas J, Singh N, *et al.* Nonlinear light transmission through oxide-protected Au and Ag nanoparticles: an investigation in the nanosecond domain[J]. *Chemical Physics Letters*, 2003, 380(1): 223-229.
- [36] Wang J, Han J H, Zhu B H, *et al.* Third-order nonlinear optical properties of graphene-CdS composites[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 42(11): 1106006.
王 记, 韩俊鹤, 朱宝华, 等. 石墨烯-硫化镉复合材料的三阶非线性光学性质 [J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1106006.
- [37] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. 5th ed. San Francisco, CA, USA: Academic, 2013.
- [38] Zhao C, Zhang H, Qi X, *et al.* Ultra-short pulse generation by a topological insulator based saturable absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(21): 211106.
- [39] Guo B, Yao Y, Xiao J, *et al.* Topological insulator-assisted dual-wavelength fiber laser delivering versatile pulse patterns[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(2): 8-15.
- [40] Li J, Luo H, Wang L, *et al.* 3- μm mid-infrared pulse generation using topological insulator as the saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3659-3662.
- [41] Liu M, Zhao N, Liu H, *et al.* Dual-wavelength harmonically mode-locked fiber laser with topological insulator saturable absorber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(10): 983-986.
- [42] Zhang H, Lu S, Zheng J C, *et al.* Molybdenum disulfide (MoS_2) as a broadband saturable absorber for ultra-fast photonics[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7249-7260.
- [43] Mao D, Wang Y, Ma C, *et al.* WS_2 mode-locked ultrafast fiber laser[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 7965.
- [44] Yan P, Liu A, Chen Y, *et al.* Microfiber-based WS_2 -film saturable absorber for ultra-fast photonics [J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(3): 479-489.
- [45] Guo B, Yao Y, Yan P G, *et al.* Dual-wavelength soliton mode-locked fiber laser with a WS_2 -based fiber taper [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(3): 323-326.
- [46] Yan P, Chen H, Yin J, *et al.* Large-area tungsten disulfide for ultrafast photonics [J]. *Nanoscale*, 2017, 9: 1871-1877.
- [47] Chen Y, Jiang G, Chen S, *et al.* Mechanically exfoliated black phosphorus as a new saturable absorber for both Q-switching and mode-locking laser operation[J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 12823-12833.
- [48] Qin Z, Xie G, Zhang H, *et al.* Black phosphorus as saturable absorber for the Q-switched Er:ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 24713-24718.
- [49] Guo B, Li S, Zhang K, *et al.* Hexagonal boron nitride: a rising nonlinear optical material for dual-wavelength soliton generation[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.