

基于黑磷量子点可饱和吸收体的多波长脉冲簇光纤激光器

刘萌^{1,2}, 闫玉蓉^{1,2}, 汪徐德³, 罗爱平^{1,2}, 徐文成^{1,2}, 罗智超^{1,2,4*}

¹华南师范大学广州市特种光纤光子器件重点实验室, 广东 广州 510006;

²华南师范大学广东省微结构功能光纤与器件工程技术研究中心, 广东 广州 510006;

³淮北师范大学物理与电子信息学院, 安徽 淮北 235000;

⁴深圳大学光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 由于其独特的光电特性,黑磷量子点(BPQDs)获得研究者的广泛关注。将基于微纳光纤沉积 BPQDs 的光子器件接入掺铒光纤激光腔内,利用其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。在单波长脉冲簇状态下,每簇脉冲包含 9 个脉冲,各脉冲之间具有不同的时间间隔;在双波长脉冲簇状态下,每个波长分别对应一套脉冲簇序列,两套脉冲簇序列具有不同的强度和不同的时间间隔。该结果有助于加深人们对多波长光纤激光器及脉冲簇动力学的理解,也证明了 BPQDs 可以作为性能优良的可饱和吸收体应用于超快光学领域。

关键词 材料;锁模光纤激光器;黑磷量子点;可饱和吸收体;多波长;脉冲簇

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0703013

Black Phosphorus Quantum Dots Saturable Absorber for Dual-Wavelength Pulse Cluster Fiber Laser

Liu Meng^{1,2}, Yan Yurong^{1,2}, Wang Xude³, Luo Aiping^{1,2}, Xu Wencheng^{1,2}, Luo Zhichao^{1,2,4}

¹Guangzhou Key Laboratory for Special Fiber Photonic Devices and Applications, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

²Guangdong Provincial Key Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices & Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center for Microstructured Functional Fibers and Devices, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

³School of Physics and Electronic Information, Huaibei Normal University, Huaibei, Anhui 235000, China;

⁴Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract Due to their unique optoelectronic properties, recently the black phosphorus quantum dots (BPQDs) has attracted considerable attention. By introducing the microfiber-based BPQDs photonics device into the erbium-doped fiber laser cavity, the single and dual-wavelength pulse cluster phenomena are achieved because of the characteristics

收稿日期: 2017-02-15; 收到修改稿日期: 2017-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(11474108, 11304101, 61307058, 61378036, 11504121)、广东省自然科学基金杰出青年基金(2014A030306019)、广东省科技创新青年拔尖人才(2014TQ01X220)、广东省高等学校优秀青年教师培养计划(YQ2015051)、广东省科技项目(2016B090925004)、深圳大学光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室开放基金(GD201602)

作者简介: 刘萌(1989—),女,博士研究生,主要从事超快激光及非线性孤子动力学方面的研究。

E-mail: liumeng.575@163.com

导师简介: 徐文成(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事超快激光及非线性孤子动力学方面的研究。

E-mail: xuwch@scnu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: zcluo@scnu.edu.cn

of saturable absorption and high nonlinear effect of BPQDs. In the case of single wavelength pulse cluster, each pulse cluster contains 9 pulses, which has different time intervals. While in the case of dual-wavelength pulse cluster, each wavelength corresponds to one sequence of pulse cluster, which has different amplitudes and time intervals. These results help to deepen the understanding of multi-wavelength fiber laser and pulse cluster dynamics, and further demonstrate that the BPQDs can act as the saturable absorber with excellent performance into many fields, such as ultrafast optics.

Key words materials; mode-locked fiber laser; black phosphorus quantum dots; saturable absorber; multi-wavelength; pluse cluster

OCIS codes 160.4330; 140.3510; 140.4050

1 引 言

自 2004 年英国曼彻斯特大学的 Geim 和 Novoselov 用机械剥离法成功得到碳纳米二维材料——石墨烯以来^[1],石墨烯二维材料的一系列新颖独特的电学和光学特性被发现,并且成为半导体材料和纳米科学研究的新方向。作为石墨烯二维材料特性研究的一个重要分支,石墨烯独特的非线性光学特性也不断被挖掘出来,如与波长无关的可饱和吸收特性、高非线性折射率系数等^[2-3]。因此,石墨烯作为性能优良的非线性光学材料在超快激光锁模、波长转换、激光信息处理、光纤通讯等领域具有重要的应用价值^[4-10]。但是,石墨烯的零带隙结构和低吸收系数的特性弱化了石墨烯的光调制能力,从而限制了其在某些需要光与物质具备强相互作用的领域中的应用。

受石墨烯成功案例的启发,科学家们认定二维晶体材料可能会成为影响人类未来电子和光子技术的新型材料,因此,寻找和探索其他新型二维材料成为研究热点^[11]。近年来,层状过渡金属硫属化合物(MoS₂ 和 WS₂ 等)被证实是一类具有优良性能的二维纳米材料^[12-19],如作为二维过渡金属硫属化合物的代表——单层 MoS₂ 在特定的波段具有比石墨烯更强的可饱和吸收能力^[20],意味着在这些特定的波段,单层 MoS₂ 是性能更优良的非线性光学材料。研究表明,多层 MoS₂ 具有间接带隙,单层 MoS₂ 才为直接带隙。由于其相对较大的带隙(约为 1.9 eV),单层 MoS₂ 的可饱和吸收特性通常在可见光波段,其工作范围不能覆盖通信领域常用的 1550 nm 波段(0.8 eV)。

为了弥补石墨烯及 MoS₂ 在非线性光学领域的不足,新型二维材料——黑磷应运而生。二维黑磷材料拥有直接带隙,且根据层数大小,其直接带隙大小可以在 0.3~1.5 eV 范围内调节^[21-24]。因此,在近红外光子学领域,尤其是光通信领域,黑磷可以成为连接石墨烯和 MoS₂ 的桥梁。到目前为止,黑磷已经被证实在 400~1930 nm 范围内具有可饱和吸收特性,意味着黑磷确实是优异的宽带可饱和吸收体(SA)^[25];不同波段下利用黑磷可饱和吸收体实现锁模和调 Q 的研究结果也陆续被报道^[26-29]。最近,Sun 等^[30]利用液体剥离方法制备出超小层状黑磷,被称为黑磷量子点(BPQDs)。由于量子约束和边缘效应,BPQDs 展示出了一些有趣的光电特性。在非线性光学领域,BPQDs 已被学者证实在 800 nm 和 1550 nm 波段具有可饱和吸收特性,并在基于 BPQDs 可饱和吸收体的掺铒光纤激光器中获得了锁模脉冲^[31-32]。然而,目前尚未见关于在基于 BPQDs 的光纤激光器中获得多波长锁模脉冲现象方面的报道。多波长锁模光纤激光器在光纤传感、光学仪器、光学信号处理等领域具有重要应用价值,因此一直备受关注。另外,关于多波长锁模激光器的报道大多数为基频锁模^[33],鲜有多波长脉冲簇锁模激光器的报道。脉冲簇为光纤激光器中的一种孤子非线性现象,对其研究不仅可以进一步揭示孤子的本质特性,还可以应用于激光加工领域^[34]。因此,在基于 BPQDs 可饱和吸收体的光纤激光器中研究多波长脉冲簇现象具有重要意义。

近期研究表明,黑磷具有很高的三阶折射率系数,约为 $10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ ^[35],而微纳光纤的小直径使其又具有很高的非线性系数。因此,将 BPQDs 沉积在微纳光纤上制成同时具有可饱和吸收特性和高非线性效应的双功能光子器件,将有助于其在基于该器件的光纤激光器中研究各种孤子非线性效应。在基于微纳光纤沉积 BPQDs 光子器件的掺铒光纤激光器中分别获得了基频锁模脉冲和单、双波长的脉冲簇输出:1)双波长脉冲簇锁模状态下,两个波长的光谱分别位于 1532.02 nm 和 1556.25 nm,两个光谱的中心波长间隔为 24.23 nm;2)时域方面,两个波长的光谱分别对应一套具有不同脉冲强度和脉冲间隔的脉冲簇。该结果不仅有助于加深对脉冲簇动力学特性的理解,而且也表明了 BPQDs 在非线性光学领域的优异性能以及良好的应用前景。

2 基于微纳光纤沉积 BPQDs 光子器件的制备

所用的 BPQDs 采用液体剥离法制备而成^[30],制好的 BPQDs/N-甲基吡咯烷酮(NMP)溶液的质量分数为 0.05 mg/mL。为了将 BPQDs 接进光纤激光腔内,采用光学沉积法将 BPQDs 沉积在微纳光纤上,制备成基于微纳光纤沉积 BPQDs 的光子器件。之所以选择这种可饱和吸收体制备方法,主要是因为基于微纳光纤沉积 BPQDs 的可饱和吸收体具有光学损伤阈值更高、光和材料的相互作用更强、引入的非线性效应更强等优点。具体制备方法^[36]如下:1)利用火焰刷技术将标准单模光纤拉成直径约为 10 μm 的微纳光纤;2)将准备好的 BPQDs 溶液滴在微纳光纤上,使微纳光纤浸没在溶液里。采用经过掺铒光纤放大器放大之后的自发辐射光源作为光源,输出功率可达 34 mW;3)打开光源通光,由于微纳光纤表面的倏逝场会产生光梯度力,BPQDs 二维材料因受力而沉积在微纳光纤上。在显微镜下实时观察整个沉积过程,当观察到沉积长度达到 360 μm 时,关闭光源,用注射器将残余液体吸掉,然后在室温下风干,完成整个制备过程。图 1 为制备好的基于微纳光纤沉积 BPQDs 的光子器件的显微镜图。由图 1 可知,BPQDs 均匀地附着在微纳光纤的表面。测得该可饱和吸收体的插入损耗为 4.5 dB。

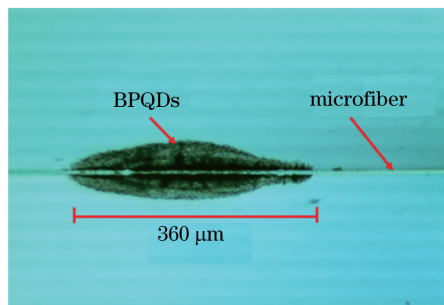


图 1 基于微纳光纤沉积 BPQDs 的可饱和吸收体的显微镜图

Fig. 1 Microscopic image of microfiber-based BPQDs saturable absorber

3 实验装置

将制备好的基于微纳光纤沉积 BPQDs 的光子器件接入激光腔内,组成基于 BPQDs 的掺铒光纤激光器,其结构如图 2 所示。该激光器采用环形腔结构,腔长为 21.6 m,其中一段长为 7 m 的掺铒光纤作为增益介质,抽运源波长为 976 nm,最大输出功率为 400 mW。采用一个偏振无关隔离器用于确保光的单向传输,两个偏振控制器用于调节光的偏振态,腔内激光通过 10:90 耦合器的 10% 端口输出腔外,然后利用光谱仪(MS9710C, Anritsu, 日本)和示波器(DSA 70804, 8 GHz, Tektronix, 美国)对其输出进行测量,脉冲宽度用自相关仪(FR-103XL, Femtochrome, 美国)测量。

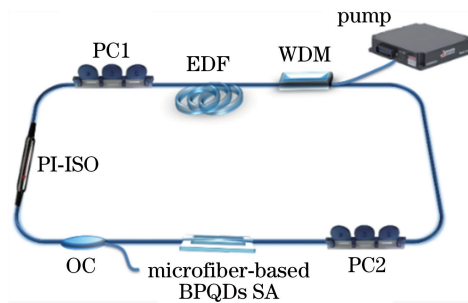


图 2 基于 BPQDs 可饱和吸收体的掺铒光纤激光器结构图

Fig. 2 Schematic of erbium-doped fiber laser based on BPQDs saturable absorber

4 结果与讨论

由于 BPQDs 在 1550 nm 具有可饱和吸收特性,所以当抽运功率升至 12 mW 时,激光器可以实现自启动锁模。为了优化锁模状态,将抽运功率升高至 56 mW,图 3 为此时激光器稳定的锁模输出状态。图 3(a)

为锁模光谱,其中心波长为 1559.7 nm,3 dB 带宽为 5.4 nm。光谱两侧有明显的克利边带,表明该激光器工作在负色散孤子区域^[37]。图 3(b)为相应的脉冲序列,脉冲之间的时间间隔为 105.8 ns,对应基频重复率为 9.45 MHz,与激光器的腔长相符。图 3(b)的插图为大范围的脉冲序列,可以看出,脉冲强度基本一致,无明显的波动,表明该锁模状态的稳定性。图 3(c)为该状态下的自相关曲线,假设脉冲形状为双曲正割型,则脉宽为 550 fs。计算得出该状态下时间带宽积为 0.37,略大于 0.315,说明此时脉冲带有少量啁啾。

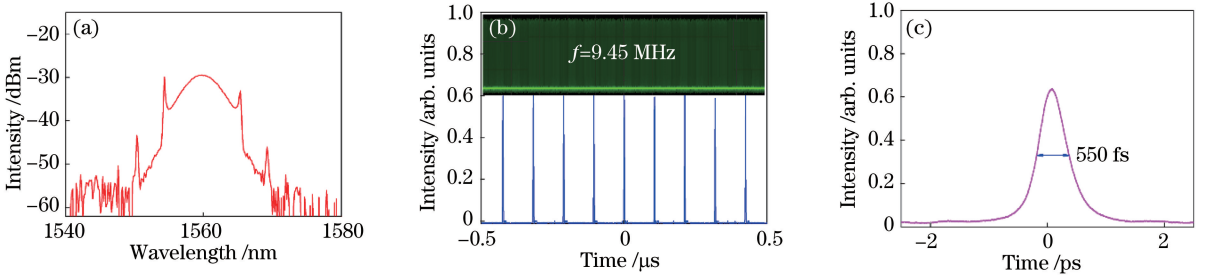


图 3 基频锁模状态。(a)光谱;(b)脉冲序列;(c)自相关曲线

Fig. 3 Fundamental repetition rate mode-locked operation. (a) Spectrum; (b) pulse train; (c) autocorrelation trace

由于微纳光纤沉积 BPQDs 的光子器件往激光腔内引入了很高的非线性效应,使得在抽运功率继续增加的时候孤子脉冲会发生分裂,产生多脉冲。通过脉冲与色散波和连续波之间的相互作用,多脉冲会团簇在一起形成脉冲簇。当抽运功率为 120 mW 时会出现脉冲簇,此时单波长脉冲簇的各项特性如图 4 所示。由图 4(a)可知,光谱中心波长和 3 dB 带宽分别为 1557 nm 和 8.6 nm。相应的脉冲序列如图 4(b)所示,可以看出两个脉冲簇之间的时间间隔为 105.8 ns,与基频重复率相符。图 4(c)为每个脉冲簇内部的细节,每个脉冲簇内包含 9 个脉冲,脉冲强度基本一致,脉冲之间的时间间隔不等。

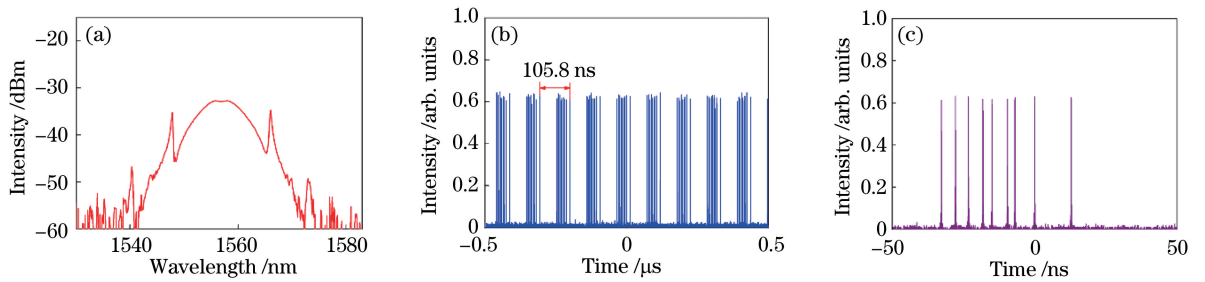


图 4 单波长脉冲簇状态。(a)光谱;(b)脉冲序列;(c)单个脉冲簇

Fig. 4 Single wavelength pulse cluster operation. (a) Spectrum; (b) pulse train; (c) single pulse cluster

通过调节偏振控制器可以产生偏振相关损耗,将其和激光腔的双折射结合起来会产生光谱滤波效应^[33]。于是当抽运功率继续升高至 140 mW,通过仔细调节偏振控制器可以获得双波长脉冲簇现象。如图 5(a)所示,两个波长的光谱分别位于 1532.02 nm 和 1556.25 nm;两个光谱中心波长之间的间隔为 24.23 nm,3 dB 带宽分别为 6.14 nm 和 5.78 nm。相应的脉冲序列如图 5(b)所示,可以看出每一组脉冲分别由两套脉冲簇组成,分别具有不同的脉冲强度和紧凑程度。两组脉冲簇之间的时间间隔为 105.8 ns,与基频重复率相符。为了更清晰地观察每组脉冲簇的细节,在图 5(c)中单独画出了一组脉冲簇,看得出两个脉冲簇内小脉冲的宽度和脉冲间隔都各不相同。

由图 5 结果推测这两套脉冲簇分别对应于不同波长的光谱。为了验证这个想法,利用一个带通滤波器 (OTF-350, Santec, 日本) 分别将两个波长滤出来并探测其特性,结果如图 6 所示。滤波光谱分别为图 6(a) 和图 6(b),相应的脉冲序列分别为图 6(c) 和图 6(d)。图 6(e) 和图 6(f) 分别为这两种情况下单个脉冲簇的细节图。由滤波结果可知,在该双波长脉冲簇状态下,每个波长分别对应一套脉冲簇:短波长处的光谱对应一套强度较低、脉冲之间间隔较大的脉冲簇;长波长处的光谱则对应于强度较高、脉冲比较紧凑的一套脉冲簇。由于不同波长的脉冲在激光腔内会经历不同的非线性相移,所以两个波长的脉冲会分裂成具有不同脉冲个数的小脉冲簇,各个脉冲之间又经过复杂的相互作用形成不同的脉冲簇模式。值得注意的是,这种双波

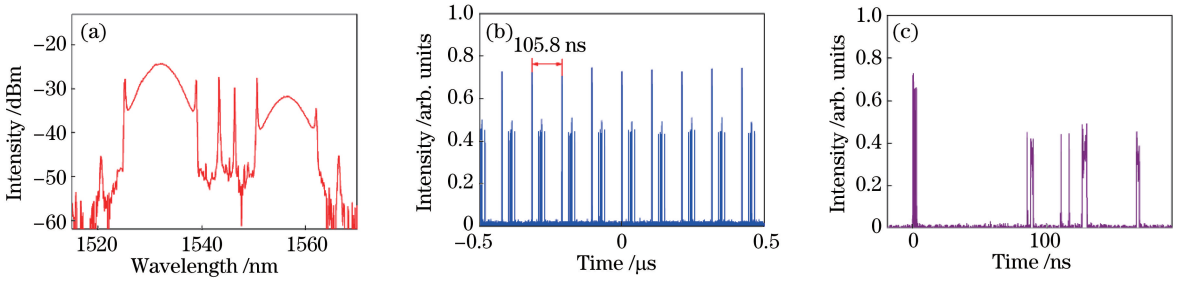


图 5 双波长脉冲簇状态。(a)光谱;(b)脉冲序列;(c)单组脉冲簇

Fig. 5 Dual-wavelength pulse cluster operation. (a) Spectrum; (b) pulse train; (c) single pulse cluster

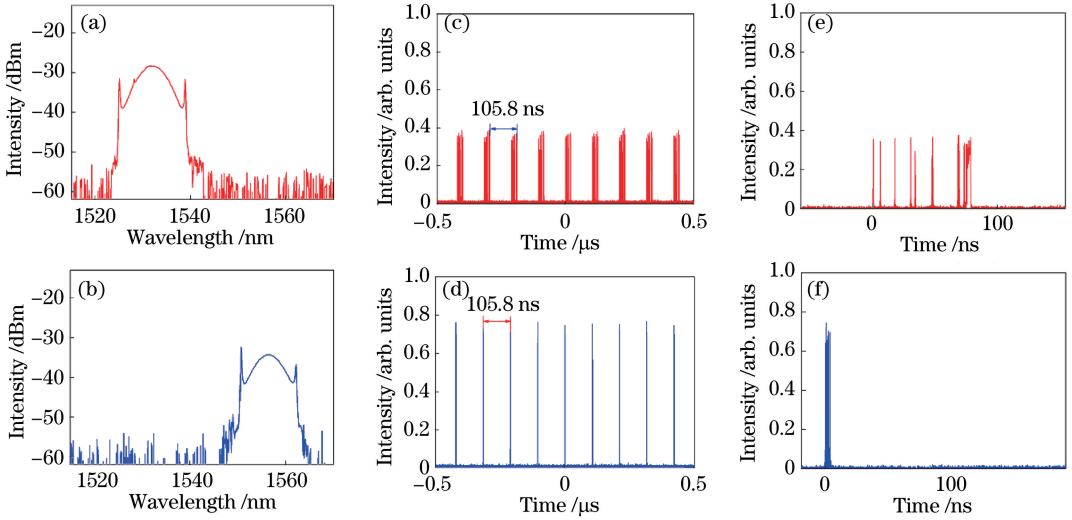


图 6 双波长脉冲簇滤波结果。(a)(b)光谱;(c)(d)脉冲序列;(e)(f)单个脉冲簇

Fig. 6 Wavelength resolved dual-wavelength pulse cluster. (a)(b) Spectra; (c)(d) pulse train; (e)(f) single pulse cluster

长脉冲簇的状态下脉冲簇的形式并不稳定,所以造成滤波前后脉冲簇内脉冲个数和脉冲宽度略有不同。

5 结 论

报道了在基于微纳光纤沉积 BPQDs 的光子器件的掺铒光纤激光器中获得的单、双波长脉冲簇现象: 1)单波长脉冲簇情况下,每簇脉冲中包含 9 个脉冲,脉冲强度基本一致,但脉冲之间间隔不等;2)双波长脉冲簇情况下,每个波长的光谱分别对应一套脉冲簇序列,两套脉冲簇序列的强度和间隔均不相同。研究结果有助于加深对多波长光纤激光器及脉冲簇动力学的理解,同时也表明新型二维纳米材料 BPQDs 具有优良的非线性光学特性,有望在超快激光和非线性光学领域中发挥更大的应用价值。

参 考 文 献

[1] Novoselov K, Geim A, Morozov S, *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306 (5696): 666-669.

[2] Bao Q, Zhang H, Wang Y, *et al.* Atomic layer graphene as saturable absorber for ultrafast pulsed laser[J]. Advanced Functional Materials, 2009, 19(19): 3077-3083.

[3] Zhang H, Virally S, Bao Q, *et al.* Z-scan measurement of the nonlinear refractive index of graphene[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 1856-1858.

[4] 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.

[5] Sun Z, Hasan T, Torrisi F, *et al.* Graphene mode-locked ultrafast laser[J]. ACS Nano, 2010, 4(2): 803-810.

[6] 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.

- [7] Luo Z, Zhou M, Weng J, *et al.* Graphene-based passively Q-switched dual-wavelength erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3709-3711.
- [8] Martinez A, Fuse K, Yamashita S. Mechanical exfoliation of graphene for the passive mode-locking of fiber lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(12): 121107.
- [9] Novoselov K S, Fal'ko V I, Colombo L, *et al.* A roadmap for graphene[J]. *Nature*, 2012, 490(7419): 192-200.
- [10] Yamashita S. A tutorial on nonlinear photonic applications of carbon nanotube and graphene[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 427-447.
- [11] Coleman J N, Lotya M, O' Neill A, *et al.* Two-dimensional nanosheets produced by liquid exfoliation of layered materials[J]. *Science*, 2011, 331(6017): 568-571.
- [12] Wang Q H, Kalantar-Zadeh K, Kis A, *et al.* Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(11): 699-712.
- [13] Zhang H, Lu S B, Zheng J, *et al.* Molybdenum disulfide(MoS_2) as a broadband saturable absorber for ultra-fast photonics[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7249-7260.
- [14] Liu H, Luo A P, Wang F Z, *et al.* Femtosecond pulse Erbium-doped fiber laser by a few-layer MoS_2 saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4591-4594.
- [15] Wang S, Yu H, Zhang H, *et al.* Broadband few-layer MoS_2 saturable absorbers[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(21): 3538-3544.
- [16] Zhang M, Howe R, Woodward R, *et al.* Solution processed MoS_2 -PVA composite for sub-bandgap mode-locking of a wideband tunable ultrafast Er: fiber laser[J]. *Nano Research*, 2014, 8(5): 1522-1534.
- [17] Wu K, Zhang X Y, Wang J, *et al.* 463-MHz fundamental mode-locked fiber laser based on few-layer MoS_2 saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1374-1377.
- [18] Mao D, Zhang S, Wang Y, *et al.* WS_2 saturable absorber for dissipative soliton mode locking at 1.06 and 1.55 μm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 27509-27519.
- [19] Yan P G, Liu A J, Chen Y S, *et al.* Microfiber-based WS_2 -film saturable absorber for ultra-fast photonics[J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(3): 479-489.
- [20] Wang K, Wang J, Fan J, *et al.* Ultrafast saturable absorption of two-dimensional MoS_2 nanosheets[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(10): 9260-9267.
- [21] Li L, Yu Y, Ye G J, *et al.* Black phosphorus field-effect transistors[J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(5): 372-377.
- [22] Liu H, Neal A T, Zhu Z, *et al.* Phosphorene: an unexplored 2D semiconductor with a high hole mobility[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(4): 4033-4041.
- [23] Tran V, Soklaski R, Liang Y, *et al.* Layer-controlled band gap and anisotropic excitons in few-layer black phosphorus [J]. *Physical Review B*, 2014, 89(23): 817-824.
- [24] Hanlon D, Backes C, Doherty E, *et al.* Liquid exfoliation of solvent-stabilized few-layer black phosphorus for applications beyond electronics[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 9563.
- [25] Lu S B, Miao L L, Guo Z N, *et al.* Broadband nonlinear optical response in multi-layer black phosphorus: an emerging infra-red and mid-infrared optical material[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11183-11194.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Sotor J, Sobon G, Kowalczyk M, *et al.* Ultrafast thulium-doped fiber laser mode locked with black phosphorus[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(16): 3885-3888.
- [29] 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.
- [30] Sun Z, Xie H, Tang S, *et al.* Ultrasmall black phosphorus quantum dots: synthesis and use as photothermal agents [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2015, 54(39): 11526-11530.
- [31] Xu Y, Wang Z, Guo Z, *et al.* Solvothermal synthesis and ultrafast photonics of black phosphorus quantum dots[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(8): 1223-1229.
- [32] Wang Z T, Xu Y H, Dhanabalan S C, *et al.* Black phosphorus quantum dots as an efficient saturable absorber for bound soliton operation in an erbium doped fiber laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 1-10.

-
- [33] 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.
- [34] Kerse C, Kalaycioglu H, Elahi P, *et al.* Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses[J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 84-88.
- [35] Zheng X, Chen R Z, Shi G, *et al.* Characterization of nonlinear properties of black phosphorus nanoplatelets with femtosecond pulsed Z-scan measurements[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3480-3483.
- [36] 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.
- [37] Liu X M, Soliton formation and evolution in passively mode-locked lasers with ultralong anomalous-dispersion fibers[J]. *Physical Review A*, 2011, 84(2): 023835.