

特邀综述

基于二维纳米材料的超快脉冲激光器*

王聪¹⁾ 刘杰^{1)†} 张晗^{2)‡}

1) (山东师范大学物理与电子科学学院, 济南 250014)

2) (深圳大学物理与光电工程学院, 深圳 518060)

(2019年5月17日收到; 2019年6月21日收到修改稿)

石墨烯以其独特的光电特性打开了二维纳米材料的大门, 随后拓扑绝缘体、过渡金属硫化物、黑磷等二维材料相继被报道, 这些材料由于具有良好的非线性光学特性, 可用作被动饱和吸收体来产生脉冲激光. 本文总结了近年来基于二维材料的光纤激光器和固体激光器的研究状况, 从激光器的中心波长、脉宽、重复频率、脉冲能量和输出功率等基本参数对发展现状进行了阐述, 最后进行了总结和展望.

关键词: 二维材料, 光纤激光器, 固体激光器**PACS:** 81.07.Bc, 42.55.Wd, 42.55.Xi**DOI:** 10.7498/aps.68.20190751

1 引言

超短脉冲激光在工业、军事等领域具有较大的需求, 并可用于激光微加工^[1]、太赫兹产生^[2]、光成像^[3]和超连续谱产生^[4]. 目前, 工业上主要以光纤激光器和固体激光器为主, 光纤激光器结构简单、成本低、稳定性好, 固体激光器输出能量大、峰值功率高、光束质量好, 两种激光器均具有各自的优势, 可根据现实需要进行选择. 目前, 获得超短脉冲激光的方式主要有两种: 一种是在谐振腔中插入饱和吸收体^[5], 另一种是利用光纤中的非线性效应(非线性偏振旋转或非线性放大环形镜)^[6]. 在商业系统领域, 普遍使用的饱和吸收体是半导体饱和吸收镜(semiconductor saturated absorption mirror, SESAM), 在过去的几十年间, SESAM得到了迅速发展, 实现了商业化, 并在光纤激光器、固体激光器和薄片激光器等领域均有应用. 然而, SESAM需要通过特定的设计, 才能实现特定波段锁模, 并

且无法实现宽波段锁模, 损伤阈值低, 成本高, 制备流程复杂, 这些缺点限制了SESAM的发展. 对于采用非线性偏振旋转效应实现的激光器, 容易受光纤波动的影响, 无法实现自适应脉冲产生, 因此, 探索新型饱和吸收体来实现超短脉冲激光, 仍是一个值得研究的课题.

近几年, 二维材料的出现使得超快激光器得到了迅速的发展, 二维材料指的是原子层状材料, 它的厚度可以为单层或者几层, 具有较强的层内共价键和较弱的层间范德瓦耳斯力, 在没有层间相互作用的干扰下, 电子的运动局限在二维系统内, 这导致二维材料具有许多新颖的电学特性和光学特性. 二维材料中, 石墨烯是最先被发现的单原子层材料, 具有非凡的力、热、电、光等特性, 在鲍桥梁教授和张晗教授的不断努力下, 首次实现了基于石墨烯的超快脉冲激光^[5], 由此打开了二维材料和超快激光器相结合的大门, 为超短脉冲激光技术发展注入了新的活力和动力. 随后, 拓扑绝缘体(topology insulators, TIs)、过渡金属硫化物(transition metal

* 国家自然科学基金(批准号: 61875138)、国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 61705140)和中国博士后科学基金(批准号: 2018M643165)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jieliu@sdsu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: h Zhang@szu.edu.cn



刘杰, 山东师范大学物理与电子科学学院教授、博导. 主要从事固体激光器件与技术、非线性光学等方面的研究.



张晗, 深圳大学特聘教授、博士生导师. 主要从事超快光纤激光器、非线性光学、新型二维材料光电器件等方面的研究. 现已发表 SCI 论文百余篇, 引用次数超过 19000 次, 高引用论文 46 篇. 2018 年获得教育部自然二等奖.

dichalcogenides, TMDs)、黑磷 (black phosphorus, BP)、类黑磷材料、MXene 和钙钛矿等二维材料被相继报道 (图 1^[7]), 促进了超快激光的发展, 取得了许多突出的成就.

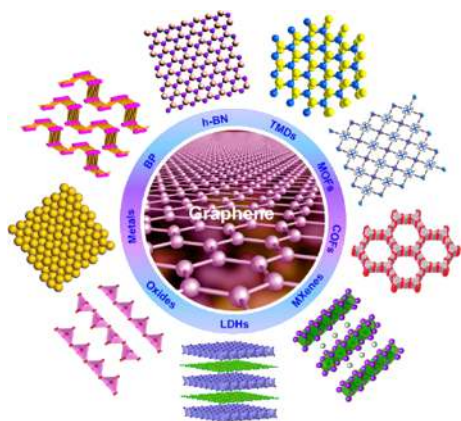


图 1 不同类型的二维纳米材料示意图^[7]

Fig. 1. Schematic illustration of different kinds of typical ultrathin two-dimensional nanomaterials^[7].

本文首先报道了二维材料的制备技术、非线性特性测量技术以及二维材料与腔体的耦合方式, 然后总结了基于二维材料的锁模和调 Q 激光器的激光特性, 并对激光器的工作波长、重复频率和脉冲宽度等性能指标进行了讨论, 最后探讨了基于二维材料的超快激光器的发展趋势并给出了相关结论, 有理由相信, 在二维材料的推动下, 超快激光技术的发展将呈现出良好的前景.

2 二维材料的简介、制备、非线性测试、耦合方法

2.1 二维材料的光电特性

石墨烯是最先被发现的二维材料, 它是一种

扁平的单层碳原子, 紧密排列成二维蜂窝状晶格, 是碳元素的同素异形体, 是石墨的基本组成部分 (图 2(a)^[8]). 单层石墨烯对入射的弱光有 2.3% 的吸收, 在室温下的电子迁移率高达 $15000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 由于石墨烯具有非线性光学特性和零带隙结构 (图 2(b)^[8]), 石墨烯能在可见光到红外波段实现宽带光响应. 2004 年, 石墨烯通过机械剥离法成功制得^[9], 并迅速成为最有潜力的光电子材料. 由于石墨烯具有宽带吸收、超快响应和饱和吸收等特性, 在 2009 年首次应用于锁模激光器^[5], 从此拉开了二维材料和超快激光相结合的大门.

TMDs 是一种半导体材料, 其通式为 MX_2 , 其中 M 是过渡金属元素, 例如 Mo, W; X 是氧属元素, 例如 S, Se, Te. TMDs 的每一层可看成是三明治结构, 两层 X 元素夹着一层 M 元素, 层与层之间通过范德瓦耳斯力相互作用在一起, 其种类较为丰富, 目前已报到的有 MoS_2 , WS_2 , MoSe_2 , WSe_2 , MoTe_2 , WTe_2 等. 图 2(c) 和图 2(d) 表示的是 MoS_2 的原子结构和带隙结构^[8], 在体态下, 它们是一种具有间接带隙的半导体, 当材料为单层状态时, 能带变为直接带隙. 目前, 实验上已证明 TMDs 的带隙可通过控制材料的层数来进行调节, 这一特性拓宽了 TMDs 在光电子学的应用领域. 2013 年, 过渡金属硫化物 MoS_2 首次应用于超快激光.

TIs 是一种狄拉克材料, 目前已报到的有 Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 和 Sb_2Te_3 , 它们在体态上是绝缘体, 带隙为 0.2—0.3 eV, 但表面是无能隙的, 可导电, TIs 的带隙可通过改变厚度和制成异质结的方式进行调节, 图 2(e) 和图 2(f) 展示了 Bi_2Se_3 二维材料的晶体结构和能带结构^[10]. 另外, TIs 还具有宽带吸收特性, 在 2012 年, 拓扑绝缘体 (Bi_2Te_3) 作为饱和吸收体首次应用于超快激光^[11], 从此以后其他的 TIs 也纷纷被发现, 并应用于各个波段的超快激光.

BP 是一种直接带隙半导体, 在 1960s 年首次合成^[12], 近几年, 单层 BP 被成功制备^[13], 由于其具有带隙可调、高载流子迁移率、各向异性等特性, 引起社会各界的广泛关注, 通过改变 BP 的层数, 可控制其带隙 (0.3—2.2 eV). 图 2(g) 和图 2(h) 表示的是 BP 的原子结构和带隙结构^[8], BP 的带隙填补了石墨烯和 TMDs 之间的空白. 2015 年, 在 1550 nm 波段, BP 首次应用于锁模激光器^[14].

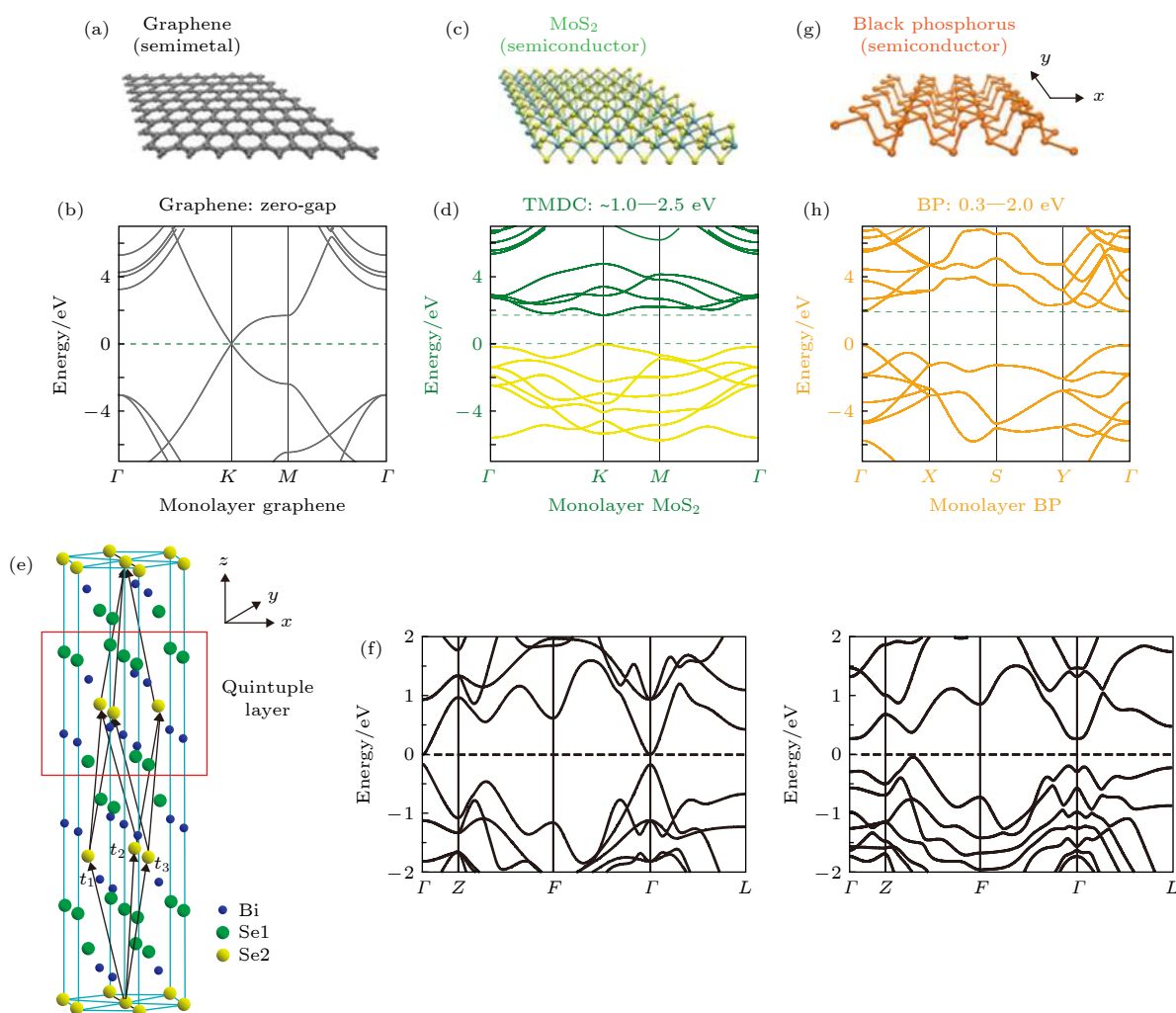


图 2 石墨烯 (a), (b)^[8], MoS₂ (c), (d)^[8], Bi₂Se₃ (e), (f)^[10]和 BP (g), (h)^[8]的原子结构和带隙结构

Fig. 2. Atomic structures and band structures of graphene (a), (b)^[8], MoS₂ (c), (d)^[8], Bi₂Se₃ (e), (f)^[10] and BP (g), (h)^[8]. Reprinted by permission from Ref. [8]. Copyright 2014 Nature Publishing Group. Reprinted by permission from Ref. [10]. Copyright 2009 Nature Publishing Group.

2.2 二维材料的制备方法

目前, 制备二维材料主要有两种方法: 自上而下法和自下而上法(图 3)。自上而下法通过破坏二维材料层间的范德瓦耳斯力来制备单层或少层的二维纳米材料, 包括机械剥离法、液相剥离法等方法。自下而上法是通过化学手段在分子级别形成二维纳米材料, 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、脉冲激光沉积法等。在超快激光应用方面, 广泛应用的二维材料制备方法是机械剥离法、液相剥离法和化学气相沉积法, 接下来会对这三种方法进行重点介绍。

自 Geim 和 Novoselov 发现石墨烯以来^[9], 机械剥离法被广泛的应用, 并将其用来制备 TIs^[15]和 BP^[16]。机械剥离法是用胶带将块状材料剥离成

单层或少层的纳米材料, 这种方法易操作, 也较为容易获得高质量和低缺陷的纳米材料, 该方法适合用于基础研究领域, 它的短板在于产量有限, 而二维材料的产量也是一个较为重要的考虑因素。对于液相剥离法来说, 它是一种物理方式, 通过利用高强度的超声来产生微气泡, 并不断破坏材料层间的范德瓦耳斯力, 然后再通过离心方式来去除未剥离的纳米材料, 来制备单层或少层二维纳米材料, 这是一种有效且可行的方法, 但是单层、大尺寸的纳米材料产量相对较低。化学气相沉积法是合成高质量二维材料一种重要的方法, 通常来说, 把所需的气态或粉末状的反应物置于反应室, 在特定的化学反应和合适的条件下, 便可获得二维材料。当把基底放入反应室, 二维材料可直接在基底上进行生长。相比于液相剥离法和机械剥离法, 通过化学气

相沉积法制备的二维材料, 它们的层数可以通过调整反应参数来进行控制^[17], 质量和产量均有了一定的保证, 有望用于商业化生产二维材料, 但其成本和制备流程需要进一步优化.

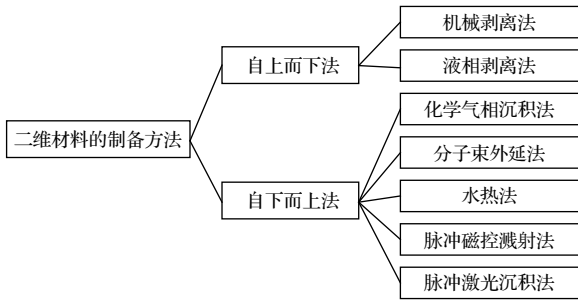


图 3 二维材料的制备方法

Fig. 3. Fabrication methods of two-dimensional materials.

2.3 二维材料的非线性测试

二维材料的非线性光学特性在光子学和光电子学具有较大的潜力, 特别是利用材料的饱和吸收特性来实现超短脉冲激光. 目前, 许多二维材料被用作饱和吸收体来实现锁模激光, 例如石墨烯、TIs、TMDs 和 BP. 饱和吸收体有 3 个重要的参数, 分别是调制深度 (α_s)、饱和强度 (I_{sat}) 和非饱和损耗 (α_{ns}), 通过以下公式便可描述吸收系数 (α) 和光强 (I) 的关系^[5]:

$$\alpha(I) = \alpha_{\text{ns}} + \frac{\alpha_s}{1 + I/I_{\text{sat}}}$$

对于二维材料非线性光学特性的测量手段, 主要有以下两种方式: Z-scan 测量法和双臂测量法. Z-scan 测量法的实验装置如图 4(a) 所示^[18], 一个皮秒或飞秒光源被一个分束器分成两路: 测量光路

和参考光路, 在参考光路, 通过探测器 (detector2) 来测量光强, 在测量光路, 脉冲光被透镜聚焦到待测样品上, 待测样品安装在一个平移台上, 可沿着光的方向前后移动. 样品在移动的过程中, 在样品上的脉冲光的光斑也会随着变化, 从而造成能量密度的变化, 透过样品后的光通过探测器 (detector1) 来测量. 在探测器 (detector1) 前若没有光圈, 这种方法被称为开孔 Z-scan 测量, 否则, 便是闭孔 Z-scan 测量. 双臂测量法^[19]的实验装置如图 4(b) 所示, 类似光纤型开孔 Z-scan 测量装置, 所有的光被局限在光纤内, 脉冲光通过一个衰减器 attenuator 之后, 被分束分成两路: 参考光路和测量光路. 脉冲光通过待测样品后, 测量光路的光功率用功率计进行测量. 调节脉冲光源的输入功率, 可改变光与材料相互作用的强度.

2.4 耦合方法

二维材料作为饱和吸收体用于固体激光器和光纤激光器, 需要经过特殊的耦合设计使得光与材料相互作用. 对于固体激光器, 二维材料可制成透射式饱和吸收体和反射式饱和吸收体, 二维材料可通过旋涂、滴涂或者化学气相生长的方式置于石英基底上, 光可以穿过材料和基底, 这种方式被称为透射式 (图 5(a)). 当二维材料置于高反镜上, 会对入射光进行反射, 这种方式称为反射式 (图 5(b)). 对于光纤激光器, 材料和腔体耦合方法较多, 可根据现实需要进行选择. 首先, 二维材料可以和高分子聚合物混合制成薄膜, 将其放置在两跳纤接头的中间, 这称之为三明治结构 (图 5(c)). 利用薄膜组成的三明治结构, 薄膜的热损伤和热稳定性是影响

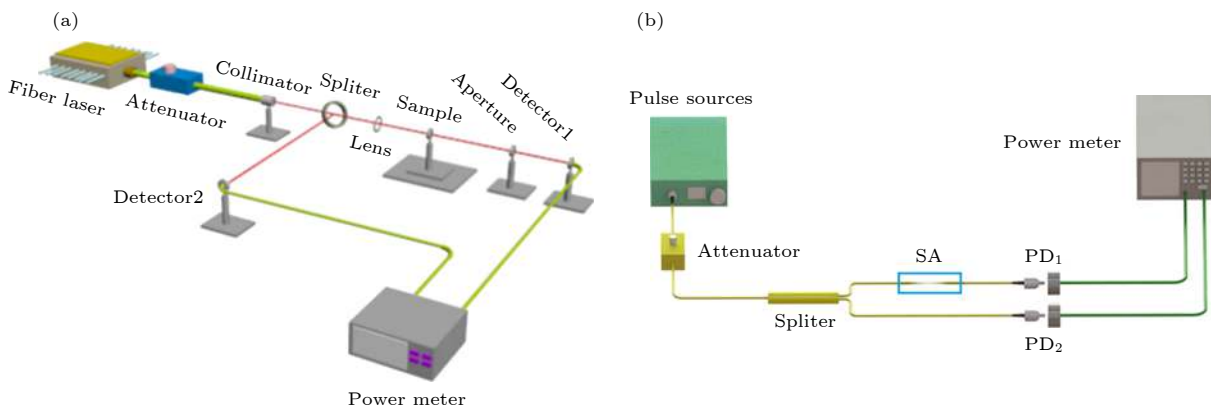


图 4 (a) Z-scan 法实验装置^[18]; (b) 双臂测量法实验装置^[19]

Fig. 4. (a) Schematic of the Z-scan measurement setup with permission from Ref. [18] © The Optical Society. (b) Schematic of the two-arm measurement setup. Reprinted by permission from Ref. [19]. Copyright 2017 Nature Publishing Group.

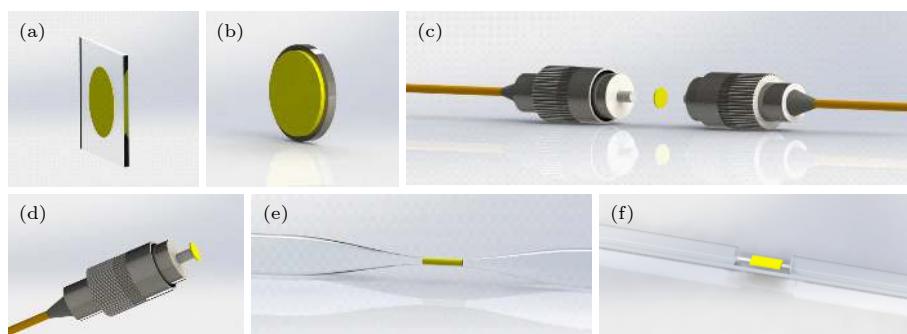


图 5 二维材料的耦合方式 (a) 二维材料转移至石英片上; (b) 二维材料转移至高反镜上; (c) 三明治结构, 二维材料转移至光纤端面 (d)、锥形光纤 (e) 和 D 型光纤 (f)

Fig. 5. Incorporation schemes for two-dimensional materials: (a) Transferring two-dimensional materials on quartz; (b) transferring two-dimensional materials on high reflection mirror; (c) sandwiching structure; transferring or depositing SA on (d) fiber end, (e) tapered fiber and (f) D-typed fiber.

激光性能的两个重要的因素. 另外, 通过机械剥离法或化学气相沉积法生长的二维材料, 可通过湿法转移或者干法转移, 将材料转移到光纤接头的端面, 也可制成三明治结构 (图 5(d)). 另外, 液相剥离法制备的纳米片溶液可通过光沉积法将二维材料沉积在锥形光纤 (图 5(e))、D 型光纤 (图 5(f)) 和光纤端面, 从而实现光与物质的相互作用.

3 基于二维材料的脉冲激光器

3.1 基于二维材料的光纤脉冲激光器

表 1 总结了基于石墨烯、TIs、TMDs 和 BP 二维材料的锁模光纤激光器的脉冲特性^[14–16,20–100]. 从表 1 可以看出, 材料的制备方式主要以三种方式为主: 化学气相沉积法、机械剥离法和液相剥离法. 光纤激光器的波段范围主要集中在 1 和 1.5 μm , 也有部分中心波长在 2 μm , 在 3 μm 波段的光纤激光器还没有被报道, 这可能与光纤器件的发展有关, 例如, 目前的光纤对 3 μm 波段具有较大的损耗. 通过对表 1 的激光性能进行总结发现: 基于二维材料的锁模光纤激光器的脉宽主要集中在 0–2 ps, 重复频率和脉冲能量主要集中在 0–100 MHz (图 6(a)). 目前, 基于二维材料的超快激光器最短脉宽是 29 fs^[20], 强度自相关曲线如图 6(b) 所示, 这是由 Purdie 等在 2015 年利用石墨烯饱和吸收体实现的输出功率约为 52 mW, 脉冲能量为 2.8 nJ 的超短脉冲激光. 基于二维材料的超快激光器最大重复频率是 3.27 GHz, 是由 Koo 等^[21]在 2016 年利用 MoSe₂/PVA 饱和吸收体实现的谐波锁模, 图 6(c) 是 212 阶谐波锁模脉冲串, 单个脉冲对应

的自相关曲线如图 6(d) 所示, 脉宽为 798 fs.

对于石墨烯二维材料, 超快光纤激光器主要集中在 1.5 μm 波段, 对 2 和 3 μm 波段的研究还较少. 利用石墨烯作为饱和吸收体实现的谐波锁模激光, 最高的重复频率是 2.22 GHz^[22]. 对于 TIs 材料, Liu 等利用脉冲激光沉积方法制备了拓扑绝缘体 Sb₂Te₃ 材料, 通过非线性偏振转化被动锁模实现了中心波长在 1542 nm 的 70 fs 和 95.4 MHz 的脉冲激光, 这是基于 TIs 的脉宽最短光纤激光器^[23]. Yan 等^[24]利用拓扑绝缘体 Bi₂Te₃ 实现了脉宽为 320 fs 的锁模脉冲激光, 通过进一步调整腔内偏振态, 获得了重复频率为 2.95 GHz, 输出功率为 45.3 mW 的谐波孤子锁模脉冲激光. 基于 TMDs 的超快激光, 获得的最小脉宽和最大重复频率为 200 fs 和 3.27 GHz^[21]. 对于二维材料 BP, 制备方法以液相剥离法为主, Jin 等^[25]利用喷墨打印技术制备的 BP 饱和吸收体, 实现了长期稳定的全光纤飞秒激光, 脉宽和中心波长分别为 102 fs 和 1555 nm. 谐波锁模可实现 GHz 的重复频率, 调查发现, 基于 BP 的谐波锁模目前还没有被报道. 除了以上的二维材料, 近几年也出现了新的二维材料, 例如铋烯^[101]、铋烯、MXene、钙钛矿, 它们均在超快激光领域展现出自己各自的优势. MXene 材料种类较多, 目前在实验上已经成功制备的已有 30 多种. John 等^[102]利用 Ti₃CN MXene 实现了 660 fs 的超快激光, 重复频率为 15.4 MHz, 波长为 1557 nm; Jiang 等^[103]测试了 Ti₃C₂T_x MXene 在 800–1800 nm 波段的非线性光响应和非线性吸收系数, 将该材料作为饱和吸收体, 在通信波段实现了脉宽为 159 fs, 重复频率为 7 MHz 的超快激光

表 1 基于石墨烯、TIs、TMDs、BP 的锁模光纤激光器的性能总结
Table 1. Performance summary of mode-locked fiber lasers based on graphene, TIs, TMDs and BP.

Material type	Fabrication method	λ/nm	Pulse width	Repetition rate	Energy	Ref.	
G	G	CVD	1069.8	580 ps	0.9 MHz	0.41 nJ	[26]
		CVD	1559.12	432.47 fs	25.51 MHz	0.09 nJ	[27]
		CVD	1565.3	148 fs	101 MHz	15 pJ	[28]
		CVD	1545	88 fs	21.15 MHz	71 pJ	[29]
		CVD	1531.3	1.21 ps	1.88 MHz	—	[30]
		CVD	1559.34	345 fs	54.28 MHz	38.7 pJ	[31]
		CVD	1561	1.23 ps	2.54 MHz	—	[32]
		CVD	1576	415 fs	6.84 MHz	7.3 nJ	[33]
		LPE	1550	29 fs	18.67 MHz	2.8 nJ	[20]
		ME	1567	220 fs	15.7 MHz	83 pJ	[34]
		—	1554	168 fs	63 MHz	55 pJ	[35]
		ME	1560	900 fs	2.22 GHz	—	[22]
		—	1560	992 fs	0.49 GHz	—	[36]
		LPE	1525—1559	1 ps	8 MHz	125 pJ	[37]
		CVD	1945	205 fs	58.87 MHz	220 pJ	[38]
		—	2060	190 fs	20.98 MHz	2.55 nJ	[39]
CVD	2780	42 ps	25.4 MHz	0.7 nJ	[40]		
GO	—	1556.5	615 fs	17.09 MHz	—	[41]	
Graphene-Bi ₂ Te ₃	CVD	1565.6	1.17 ps	6.91 MHz	—	[42]	
TIs	Bi ₂ Se ₃	PM	1031.7	46 ps	44.6 MHz	0.76 nJ	[43]
		PM	1600	360 fs	35.45 MHz	24.3 pJ	[44]
		PM	1557.5	660 fs	12.5 MHz	0.14 nJ	[45]
		LPE	1571	579 fs	12.54 MHz	127 pJ	[46]
		LPE	1559	245 fs	202.7 MHz	37 nJ	[47]
		HM	1610	0.7 ns	640.9 MHz	481 pJ	[48]
		PM	1557—1565	1.57 ps	1.21 MHz	—	[49]
		LPE	1567/1568	22 ps	8.83 MHz	1.1 nJ	[50]
		ME	1057.82	230 ps	1.44 MHz	0.6 nJ	[51]
		HM	1064.47	960 ps	1.11 MHz	—	[52]
		ME	1547	600 fs	15.11 MHz	53 pJ	[53]
		PLD	1560.8	286 fs	18.55 MHz	0.03 nJ	[54]
		HM	1557	1100 fs	8.635 MHz	29 pJ	[55]
		PLD	1562.4	320 fs	2.95 GHz	—	[24]
		—	1557.4	3.42 ps	388 MHz	—	[56]
		ME	1935	795 fs	27.9 MHz	36 pJ	[57]
—	1909.5	1.26 ps	21.5 MHz	—	[58]		
Sb ₂ Te ₃	Sb ₂ Te ₃	LPE	1556	449 fs	22.13 MHz	39.6 pJ	[59]
		ME	1564	125 fs	22.4 MHz	44.6 pJ	[60]
		ME	1561	270 fs	34.58 MHz	0.03 nJ	[61]
		DFT	1568.6	195 fs	33 MHz	0.27 nJ	[62]
		ME	1565	128 fs	22.32 MHz	45 pJ	[15]
		MS	1558	167 fs	25.38 MHz	0.21 nJ	[63]
		PLD	1542	70 fs	95.4 MHz	—	[23]

表 1 (续) 基于石墨烯、TIs、TMDs、BP 的锁模光纤激光器的性能总结
 Table 1 (continued). Performance summary of mode-locked fiber lasers based on graphene, TIs, TMDs and BP.

Material type	Fabrication method	λ/nm	Pulse width	Repetition rate	Energy	Ref.	
WS ₂	MS	1560	288 fs	41.4 MHz	0.04 pJ	[64]	
	LPE	1550	595 fs	—	—	[65]	
	PLD	1560	220 fs	—	—	[66]	
	LPE	1561/1563	369/563	24.93/20.39 MHz	70/136 pJ	[67]	
	CVD	1565	332 fs	31.11 MHz	14 pJ	[68]	
	PLD	1559.7	452 fs	1.04 GHz	10.9 pJ		
	PLD	1558.54	585—605 fs	8.83 MHz	1.14 nJ	[66]	
	LPE	1941	1.3 ps	34.8 MHz	172 pJ	[69]	
TMDs	MoS ₂	HM	1054.3	800 ps	7 MHz	1.3 nJ	[70]
		HM	1569.5	710 fs	12.09 MHz	0.147 nJ	[71]
		ME	1550	200 fs	14.53 MHz	—	[72]
		PLD	1561	246 fs	101.4 MHz	1.2 nJ	[73]
		LPE	1573.7	630 fs	27.1 MHz	0.141 nJ	[74]
		HM	1556.8	3 ps	2.5 GHz	2 pJ	[75]
		LPE	1530.4	1.2 ps	125 MHz	344 pJ	[76]
		LPE	1555.6	737 fs	3.27 GHz	7 pJ	[21]
	LPE	1535—1565	0.96—7.1 ps	12.99 MHz	—	[77]	
	MS	1915.5	1.25 ps	18.72 MHz	—	[78]	
	WSe ₂	CVD	1557.4	163.5 fs	63.13 MHz	451 pJ	[79]
		CVD	1863.96	1.16 ps	11.36 MHz	2.9 nJ	[80]
MoSe ₂	LPE	1912	920 fs	18.21 MHz	—	[81]	
SnS ₂	LPE	1062.66	656 ps	39.33 MHz	57 pJ	[82]	
	LPE	1562.01	623 fs	29.33 MHz	41 pJ	[83]	
ReS ₂	CVD	1564	1.25 ps	3.43 MHz	—	[84]	
	LPE	1558.6	1.6 ps	5.48 MHz	73 pJ	[85]	
BP	ME	1085.5	7.54 ps	13.5 MHz	5.93 nJ	[86]	
	LPE	1030.6	400 ps	46.3 MHz	0.70 nJ	[87]	
	LPE	1555	102 fs	23.9 MHz	0.08 nJ	[25]	
	LPE	1562	1236 fs	5.426 MHz	—	[88]	
	LPE	1549—1575	280 fs	60.5 MHz	—	[89]	
	ME	1560.7	570 fs	6.88 MHz	0.74 nJ	[16]	
	LPE	1559.5	670 fs	8.77 MHz	—	[90]	
	ME	1558.7	786 fs	14.7 MHz	0.11 nJ	[91]	
	ME	1571.4	946 fs	5.96 MHz	—	[14]	
	ME	1560.5	272 fs	28.2 MHz	2.3 nJ	[92]	
	LPE	1532—1570	940 fs	4.96 MHz	1.1 nJ	[93]	
	LPE	1562.8	291 fs	10.36 MHz	—	[94]	
	LPE	1562	635 fs	12.5 MHz	—	[95]	
	LPE	1555	687 fs	37.8 MHz	—	[96]	
	LPE	1561.7	882 fs	5.47 MHz	—		
	LPE	1533	—	20.82 MHz	0.07 nJ	[97]	
	ME	1910	739 fs	36.8 MHz	0.05 nJ	[98]	
	LPE	1898	1580 fs	19.2 MHz	440 pJ	[99]	
	LPE	2094	1300 fs	290 MHz	0.39 nJ	[100]	

注: LPE, liquid-phase exfoliation; CVD, chemical vapor deposition; ME, mechanical exfoliation; MS, magnetron sputtering; PLD, pulsed laser deposition; HM, hydrothermal method; DFT, direct fusion technique; PM, polyol method; G, graphene; GO, graphene oxide.

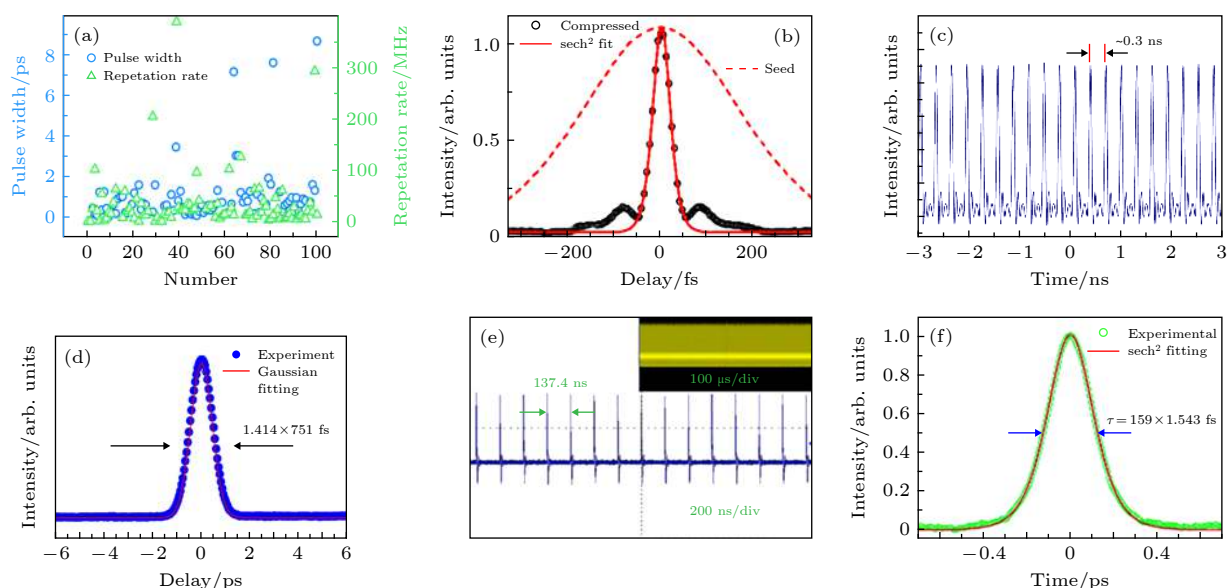


图 6 (a) 光纤激光器的脉宽和重复频率分布图; (b) 种子源和压缩脉冲的自相关曲线^[20]; (c), (d) 212 阶谐波锁模脉冲输出序列和自相关曲线^[21]; (e), (f) 锁模脉冲序列和自相关曲线^[103]

Fig. 6. (a) Scattergram of pulse width and repetition rate of fiber lasers. (b) Intensity autocorrelation trace, fitted with a sech^2 profile. Both seed and compressed traces are normalized to 1. Selected from Ref. [20]. (c) Measured oscilloscope traces of the 212th-harmonic-output optical pulses with permission from Ref. [21] © The Optical Society. (d) Measured autocorrelation traces of the output pulses at the maximum harmonic order with permission from Ref. [21] © The Optical Society. (e) Typical oscilloscope pulse trains of mode-locking. Reprinted by permission from Ref. [103]. Copyright 2018 Wiley-VCH Verlag. (f) Autocorrelation trace with a sech^2 fitting. Reprinted by permission from Ref. [103]. Copyright 2018 Wiley-VCH Verla.

(图 6(e) 和图 6(f)). Guo 等^[104]采用声化学剥离法制备的铋烯纳米片,首次实现了 193 fs 的锁模飞秒脉冲激光. Song 等^[105]通过开孔 Z-扫描测量了铋烯的非线性光响应,并实现了 550 fs 锁模脉冲激光.总之,基于二维材料的锁模激光器可以在宽波段调制,具有高重频,通过进一步优化吸收体和腔参数,可获得更好的激光性能.

基于二维材料的调 Q 光纤激光器的脉宽虽然不能达到飞秒量级,但可以获得较高的脉冲能量,从而满足一些特定需求,调 Q 技术类似于锁模技术,在腔内插入一个饱和吸收体可实现调 Q 或锁模状态,对于会实现哪种状态,这与腔的设计和饱和吸收体的特性有关.表 2 总结了目前基于不同二维材料的调 Q 光纤激光器的发展状况^[14,106–152].从表 2 可知,基于石墨烯、TIs、TMDs 和 BP 的最大脉冲能量分别为 8.34, 3.99, 1.18, 7.7 μJ .在可见光波段,采用 TIs, TMDs 和 BP 吸收体实现了波长为 600 nm 的调 Q 光纤激光器,锁模光纤激光器在可见光波段还需进一步探索.在 2–3 μm 波段,基于二维材料的调 Q 光纤激光器报道得相对较少,这与光纤器件的发展有较大关系,而在固体激光器中,该波段的固体激光器相继被报道,下文中会详

细介绍.在调 Q 激光器中,最短的脉宽为 800 ps,是由 Liu 等^[106]利用 $\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 作为增益光纤,石墨烯作为饱和吸收体,采用全光纤环形腔,实现了亚微秒脉宽,111 kHz 重复频率的调 Q 脉冲激光.

3.2 基于二维材料的固体脉冲激光器

固体激光器通常由自由空间腔体组成,腔体主要是由反射镜和固体增益介质构成,具有功率高、光束质量好的特点.目前,固体激光器在工业制造、基础研究和军事等领域具有广泛的应用.与光纤激光器相比,脉冲固体激光器发展较早,早期,基于 SESAM、纳米材料的脉冲固体激光器已有相关的报道,近年来二维材料的出现,再次促进了固体激光器的发展.上述的二维材料除了在光纤激光器中被广泛研究,在固体激光器领域也展现出各自的优势.目前,已有各种各样的增益介质和饱和吸收体相结合实现脉冲激光,在可见光波段常用的增益介质有 $\text{Pr}:\text{LuLiF}_4$, $\text{Pr}:\text{GdLiF}_4$, $\text{Pr}:\text{LiYF}_4$; 在 1 μm 波段的增益介质有 $\text{Nd}:\text{YAG}$, $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$, $\text{Nd}:\text{YLF}$, $\text{Nd}:\text{Mg}:\text{LiTaO}_3$, $\text{Nd}:\text{GYSGG}$, $\text{Nd}:\text{LYSO}$, $\text{YVO}_4/\text{Nd}:\text{YVO}_4$, $\text{Nd}:\text{YVO}_4$, $\text{Nd}:\text{Lu}_2\text{O}_3$, $\text{Nd}:\text{YVO}_4$, $\text{Nd}:\text{YVO}_4$, $\text{Yb}:\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)$, $\text{Yb}:\text{CYA}$, $\text{Yb}:\text{CYB}$, $\text{Yb}:$

表 2 基于石墨烯、TIs、TMDs、BP 的调 Q 光纤激光器的性能总结
 Table 2. Performance summary of Q -switched fiber lasers based on graphene, TIs, TMDs and BP.

Material type	Fabrication methods	λ	Pulse width	Repetition rate	Energy	Ref.	
G	—	1075 nm	70 ns	257 kHz	46 nJ	[107]	
	—	1192.6 nm	800 ps	111 kHz	0.44 μ J	[106]	
	G	CVD	1560 nm	2.06 μ s	73.06 kHz	93.7 nJ	[108]
		HM	1561 nm	4.0 μ s	27.2 kHz	29 nJ	[109]
	G	LPE	1555 nm	2 μ s	103 kHz	40 nJ	[110]
		—	2.78 μ m	2.9 μ s	37.2 kHz	1.67 μ J	[111]
		—	1558 nm	2.3 μ s	123.5 kHz	1.68 nJ	[112]
	GO	CVD	1044 nm	1.7 μ s	215 kHz	8.37 μ J	[113]
		—	2032 nm	3.8 μ s	45 kHz	6.71 μ J	[114]
		LPE	604 nm	494 ns	187.4 kHz	3.1 nJ	[115]
TIs	LPE	635 nm	244 ns	454.5 kHz	22.3 nJ	[116]	
	LPE	1.06 μ m	1.95 μ s	29.1 kHz	17.9 nJ	[117]	
	Bi ₂ Se ₃	HM	1562.27 nm	1.6 μ s	53.7 kHz	0.08 nJ	[118]
		PM	1.5 μ m	13.4 μ s	12.88 kHz	13.3 nJ	[119]
	Bi ₂ Te ₃	LPE	1.55 μ m	2.54 μ s	212 kHz	—	[120]
		LPE	1530.3 nm	24 μ s	40.1 kHz	39.8 nJ	[121]
		LPE	1.98 μ m	4.18 μ s	26.8 kHz	313 nJ	[122]
		ME	1559 nm	4.88 μ s	21.24 kHz	89.9 nJ	[123]
	Sb ₂ Te ₃	SM	1557.5 nm	3.71 μ s	49.40 kHz	2.8 μ J	[124]
		LPE	1.5 μ m	13 μ s	12.82 kHz	1.5 μ J	[125]
ME		1.56 μ m	2.81 μ s	42.8 kHz	12.7 nJ	[126]	
Sb ₂ Te ₃	MS	1530—1570 nm	400 ns	338 kHz	18 nJ	[127]	
SnS ₂	—	1532.7 nm	510 ns	233 kHz	40 nJ	[128]	
TMDs	LPE	604 nm	602 ns	118.4 kHz	5.5 nJ	[129]	
	LPE	635 nm	200 ns	512 kHz	28.7 nJ	[130]	
	LPE	1030—1070 nm	2.88 μ s	89 kHz	126 nJ	[131]	
	HM	1.56 μ m	3.2 μ s	91.7 kHz	17 nJ	[132]	
	TEM	1550—1575 nm	6 μ s	22 kHz	150 nJ	[133]	
	MoS ₂	CVD	1529—1570 nm	1.92 μ s	114.8 kHz	8.2 nJ	[134]
		LPE	1519—1567 nm	3.3 μ s	43.47 kHz	160 nJ	[135]
		PLD	1549.8 nm	660 ns	131 kHz	152 nJ	[136]
		CVD	1549.9 nm	1.66 μ s	173 kHz	27.2 nJ	[137]
		LPE	1550 nm	9.92 μ s	41.45 kHz	184 nJ	[138]
MoS ₂	LPE	1.06 μ m	5.8 μ s	28.9 kHz	32.6 nJ	[139]	
	—	1.56 μ m	5.4 μ s	27 kHz	63.2 nJ		
	—	2.03 μ m	1.76 μ s	48.1 kHz	1 μ J		
TMDs	WS ₂	LPE	604 nm	435 ns	132.2 kHz	6.4 nJ	[129]
	WS ₂	CVD	1027—1065 nm	1.65 μ s	97 kHz	—	[140]
	WS ₂	LPE	1030 nm	3.2 μ s	36.7 kHz	13.6 nJ	[141]
	WS ₂	LPE	1.5 μ m	0.71 μ s	134 kHz	19 nJ	[142]
	WS ₂	LPE	1558 nm	1.1 μ s	97 kHz	179 nJ	[141]
	WS ₂	LPE	1547.5 nm	958 ns	120 kHz	44 nJ	[143]
	WS ₂	LPE	1550 nm	3.966 μ s	77.92 kHz	1.2 μ J	[138]

表 2 (续) 基于石墨烯、TIs、TMDs、BP 的调 Q 光纤激光器的性能总结
Table 2 (continued). Performance summary of Q-switched fiber lasers based on graphene, TIs, TMDs and BP.

Material type	Fabrication methods	λ	Pulse width	Repetition rate	Energy	Ref.	
TDMs	LPE	635.4 nm	240 ns	555 kHz	11.1 nJ	[130]	
		1060 nm	2.8 μ s	60 kHz	116 nJ		
	MoSe ₂	LPE	1566 nm	4.8 μ s	35.4 kHz	825 nJ	[144]
			1924 nm	5.5 μ s	21.8 kHz	42 nJ	
	LPE	1550 nm	4.04 μ s	66.8 kHz	369 nJ	[138]	
	WSe ₂	LPE	1550 nm	4.06 μ s	85.36 kHz	485 nJ	[138]
	WSe ₂	LPE	1560 nm	3.1 μ s	49.6 kHz	33.2 nJ	[145]
TiSe ₂	CVD	1530 nm	1.12 μ s	154 kHz	75 nJ	[146]	
BP	LPE	635 nm	383 ns	409.8 kHz	27.6 nJ	[147]	
	ME	1064.7 nm	2.0 μ s	76 kHz	17.8 nJ	[148]	
	ME	1.0 μ m	1.16 μ s	58.73 kHz	2.09 nJ	[149]	
	LPE	1.5 μ m	1.36 μ s	82.64 kHz	148 nJ	[150]	
	ME	1561 nm	2.96 μ s	34.32 kHz	194 nJ	[151]	
	ME	1562.8 nm	10.32 μ s	15.78 kHz	94.3 nJ	[14]	
	LPE	1912 nm	731 μ s	113.3 kHz	632 nJ	[152]	

注: SM, solvothermal method; TEM, thermal evaporation method.

GAB, Yb:CLGGG, Yb:KLuW, Yb:LuPO₄, Yb:LuYAG, Yb:KGW, Nd:GGG; 在 1.3—1.6 μ m 波段的增益介质有 Nd:YVO₄, Nd:YAG, Nd:YLF, Nd:GGG, Nd:YGG, Nd:GdVO₄, Nd:LuAG, Nd:YLF, Er:YAG, Er:LuYAG, Er:Yb:glass, Cr:YAG, Nd, Lu:CaF₂; 在 2 μ m 波段的增益介质有 Ho:YAG, Tm:YAG, Tm:Y:CaF₂, Tm:Ho:YGG, Tm:CLNGG, Tm:KLuW, Tm:CYAO, Tm:Ho:YAP, Tm:LuAG, Tm:YAP, Tm:LuAG, Tm:Ho:YAG, Tm:CaYAlO₄, Tm:GdVO₄, Tm:CLNGG; 在 3 μ m 波段的增益介质有 Tm:YAP, Ho:ZBLAN, Er:CaF₂, Er:SrF₂, Er, Pr:CaF₂, Er:Y₂O₃, Ho, Pr:LLF. 固体激光器在可见光到中红外波段均实现了激光振荡, 这说明二维材料在固体激光领域具有较大的前景.

表 3 总结了基于石墨烯、TIs、TMDs 和 BP 二维材料的超快固体激光器的性能^[153–179]. 可以看出, 目前基于二维材料的超快固体激光还是以石墨烯为主, BP 次之, 基于其他二维材料的超快激光报道还较少, 这种现象可能与材料的制备技术有关, 通过化学气相沉积法制备出的石墨烯具有大尺寸、良好的均匀性、层数可控等特点, 这便于实现固体激光器锁模. 除了化学气相沉积法, 在固体激光器领域, 液相剥离法也是一种普遍常用的手段, 通过超声、离心等方式获得层数少、尺寸大的二维

纳米材料. 不难看出, 二维材料的制备技术对超快固体激光器的发展具有积极的促进作用.

基于二维材料的超快固体激光器主要集中在 1 μ m 波段, 在可见光波段和中红外波段也有所进展. 2017 年, Zhang 等^[153]利用 MoS₂ 饱和吸收体, 在可见光 522, 607 和 639 nm 波段实现了皮秒级的超快激光, 这一报道加快了二维材料在可见光波段实现超快光子学的步伐. 对于中红外 3 μ m 波段, 由于水对该波段具有较强的吸收和增益介质特殊的能级结构等特性, 在 3 μ m 波段实现连续锁模是较为困难的. 在 2016 年, Li 等^[179]利用增益光纤和空间光结合的方式, 实现了 3 μ m 波段的锁模, 如图 7(a) 所示, 他们利用液相剥离法制备出 BP 材料, 并对 BP 材料进行了非线性光学测试, 结果表明调制深度为 41.2%, 非饱和通量为 7.6%, 饱和强度为 3.767 MW/cm² (图 7(b)), 图 7(c) 是实现锁模激光的装置图, 增益光纤采用的是商用的双包层 Ho³⁺/Po³⁺共掺氟化光纤, 长度为 7.1 m, 对抽运光的吸收效率可超过 90%, 光纤的高增益特性便于实现高腔内脉冲能量, 这有利于实现连续光锁模. 对比表 1 和表 3 不难发现, 基于二维材料的锁模固体激光器相对于光纤激光器报道较少, 这主要是由于在固体激光器中, 二维材料直接插入腔内, 光与材料直接相互作用, 受限于目前的材料制备手段, 基于二维材料的超快固体激光器具有一定的挑

表 3 基于石墨烯、TIs、TMDs、BP 的锁模固体激光器的性能总结
Table 3. Performance summary of mode-locked solid-state lasers based on graphene, TIs, TMDs and BP.

Material	Fabrication method	Integration substrate	Bulk laser crystal	Center wavelength	Pulse width	Repetition rate	Output power	Ref.
G	CVD	Quartz	Ti:Sapphire	800 nm	63 fs	99.4 MHz	480 mW	[154]
	LPE	Quartz	Yb:YAG	1064 nm	4 ps	88 MHz	100 mW	[155]
	CVD	GM	Yb:YCOB	1.0 μm	152 fs	—	—	[156]
	CVD	Quartz	Yb:SC ₂ SiO ₅	1062.8 nm	14 ps	90.7 MHz	480 mW	[157]
	VEM	Quartz	Nd:YVO ₄	1064 nm	8.8 ps	84 MHz	3.06 W	[158]
	CVD	Sapphire	Yb:KGW	1032 nm	325 fs	66.3 MHz	1.78 W	[159]
	LPE	DM	Nd:GdVO ₄	1064 nm	16 ps	43 MHz	360 mW	[160]
	CVD	Glass	Yb:Y:CaF ₂	1051 nm	4.8 ps	60 MHz	370 mW	[161]
	CVD	Glass	Yb:Y ₂ SiO ₅	1042.6 nm	883 fs	87 MHz	1 W	[162]
	LPE	DM	Yb:KGW	1031.1 nm	428 fs	86 MHz	504 mW	[163]
	LPE	DM	Nd:GdVO ₄	1.34 μm	11 ps	100 MHz	1.29 W	[164]
	CVD	Quartz	Cr:YAG	1516 nm	91 fs	—	100 mW	[165]
	CVD	GM	Tm:CLNGG	2.0 μm	354 fs	—	NA	[156]
	CVD	DM	Tm:CLNGG	2014.4 nm	882 fs	95 MHz	60 mW	[166]
	LPE	Quartz	Tm:YAP	2023 nm	<10 ps	71.8 MHz	268 mW	[167]
	CVD	HRM	Cr:ZnS	2400 nm	41 fs	108 MHz	250 mW	[168]
	CVD	HRM	Tm:CLNGG	2018 nm	729 fs	98.7 MHz	178 mW	[169]
CVD	Quartz	Tm:YAP	1988 nm	—	62.38 MHz	256 mW	[170]	
GO	VEM	Quartz	Nd:GdVO ₄	1064 nm	4.5 ps	70 MHz	1.1 W	[171]
	VEM	Quartz	Yb:Y ₂ SiO ₅	1059 nm	763 fs	94 MHz	700 mW	[172]
Bi ₂ Te ₃	SCCA	Sapphire	Nd:YVO ₄	1064 nm	8 ps	0.98 GHz	180 mW	[173]
MoS ₂	PLD	Quartz	Pr:GdLiF ₄	522 nm	46 ps	101.4 MHz	10 mW	[153]
MoS ₂ /G	PLD	HRM	Yb:KYW	1037.2 nm	236 fs	41.84 MHz	550 mW	[174]
MoS ₂ /GO	LPE	DM	Nd:GdVO ₄	1064 nm	17 ps	1.02 GHz	508 mW	[175]
BP	LPE	DM	Nd:GdVO ₄	1064 nm	6.1 ps	140 MHz	460 mW	[176]
	LPE	HRM	Yb,Lu:CALGO	1053.4 nm	272 fs	63.3 MHz	820 mW	[177]
	LPE	Quartz	Nd:GdVO ₄	1.34 μm	9.24 ps	58.14 MHz	350 mW	[178]
	LPE	—	Ho,Pr:ZBLAN	2.8 μm	8.6 ps	13.98 MHz	87.8 mW	[179]

注: VEM, vertical evaporation method; SCCA, spin coating–coreduction approach; DM, dielectric mirror; HRM, high reflective mirror.

战和难度, 对于光纤激光器, 光纤和材料耦合的方式多种多样, 可有效实现超快脉冲激光, 因此, 通过将光纤和空间光结合的方式, 既能满足光与二维材料相互作用, 又能实现高功率超快激光输出. 采用该方式的挑战主要在于实现空间光和光纤的完美耦合, 减少不必要的损耗, 从而能够实现激光振荡. 固体锁模激光器的最大输出功率为 87.8 mW, 最大的脉冲能量为 6.28 nJ, 中心波长和谱宽分别为 2866 nm 和 4.35 nm, 重复频率为 13.987 MHz, 脉宽为 8.6 ps (图 7(d)) [179]. 目前, 基于二维材料的超快固体激光器的最短脉宽是 41 fs, 这是由 Tolstik 等 [168] 利用石墨烯饱和吸收镜实现的超短脉

冲激光, 中心波长和谱线宽度分别为 2.4 μm 和 190 nm, 脉宽、脉冲能量、平均输出功率和重复频率分别为 41 fs, 2.3 nJ, 250 mW 和 108 MHz. 2015 年, Zhao 等 [175] 通过 MoS₂/graphene 异质结材料, 并搭建 V-型谐振腔, 实现了重复频率高达 1 GHz 的锁模激光, 这是目前最大的重复频率.

表 4 总结了在 2—3 μm 波段, 基于石墨烯、TIs、TMDs 和 BP 二维材料的调 Q 固体激光器的性能 [111, 179–214]. 不难看出, 相对于表 3 中的锁模激光器, 2—3 μm 调 Q 激光器研究成果较多, 材料的制备手段以液相剥离法为主, 这再次表明, 实现锁模脉冲激光对材料要求较高. 由于石墨烯、TMDs

和 BP 具有宽带吸收特性, 他们均在 2—3 μm 波段实现了调 Q 激光, 基于这三种材料, 调 Q 激光获

得的最短脉宽分别为 157, 220 和 181 ns. 随着近几年新材料的不断出现, 铋稀、铋烯和 MXene 等

表 4 在 2—3 μm 波段下, 基于石墨烯、TIs、TMDs、BP 的调 Q 固体激光器的性能总结

Table 4. Performance summary of Q -switched solid-state lasers based on graphene, TIs, TMDs and BP at the wavelength of 2–3 μm .

Material	Fabrication method	Integration substrate	Bulk laser crystal	Center wavelength	Pulse width	Repetition rate	Output power	Ref.		
G	—	Quartz	Ho:YAG	2097 nm	2.6 μs	64 kHz	264 mW	[180]		
	—	Quartz	Tm:LGGG	2003 nm	1.29 μs	43.9 kHz	140 mW	[181]		
	EG	SiC	Cr:ZnSe	2.4 μm	157 ns	169 kHz	256 mW	[182]		
	CVD	CaF ₂	Er:Y ₂ O ₃	2.7 μm	296 ns	44.2 kHz	114 mW	[183]		
	—	HRM	Er:ZBLAN	2.78 μm	2.9 μs	37 kHz	62 mW	[111]		
	CVD	Quartz	Er:CaF ₂	2.8 μm	1.3 μs	62.7 kHz	172 mW	[184]		
	CVD	Sapphire	Ho,Pr:LLF	2.95 μm	937 ns	55.7 kHz	172 mW	[185]		
	LPE	HRM	Ho:ZBLAN	3.0 μm	1.2 μs	92 kHz	102 mW	[186]		
GO	LPE	—	Tm:Y:CaF ₂	1969 nm	1.32 μs	20.2 kHz	400 mW	[187]		
	LPE	Quartz	Tm:YLF	1928 nm	1.0 μs	38 kHz	379 mW	[188]		
TIs	Bi ₂ Te ₃	LPE	Quartz	Tm:LuAG	2023.6 nm	620 ns	118 kHz	2.03 W	[189]	
		HEM	CaF ₂	Ho:ZBLAN	2.979 μm	1.4 μs	81.96 kHz	327 mW	[190]	
	Bi ₂ Te ₃ /G	SM	SiO ₂	Tm:YAP Er:YSGG	1980 nm 2796 nm	238 ns 243 ns	108 kHz 88 kHz	2.34 W 110 mW	[191]	
TMDs	MoS ₂	PLD	Quartz	Tm:Ho:YGG	2.1 μm	410 ns	149 kHz	206 mW	[192]	
		PLD	GM	Tm:CLNGG	1979 nm	4.8 μs	110 kHz	62 mW	[193]	
		LPE	DM	Tm:CYAO	1850 nm	0.5 μs	84.9 kHz	490 mW	[194]	
		LPE	Glass	Tm,Ho:YAP	2129 nm	435 ns	55 kHz	275 mW	[195]	
		LPE	YAG	Er:Lu ₂ O ₃	2.84 μm	335 ns	121 kHz	1.03 W	[196]	
	WS ₂	CVD	YAG	Ho,Pr:LLF	2.95 μm	621 ns	85.8 kHz	70 mW	[197]	
		—	—	Tm:GdVO ₄	1902 nm	0.8 μs	49.1 kHz	100 mW	[198]	
		MoS ₂ /BP	LPE	SAMs	Tm:YAP	1993 nm	488 ns	86 kHz	3.6 W	[199]
		ReS ₂	LPE	Sapphire	Er:YSGG	2.8 μm	324 ns	126 kHz	104 mW	[200]
			LPE	YAG	Er:SrF ₂	2.79 μm	508 ns	49 kHz	580 mW	[201]
BP	WS ₂	TD	SiO ₂	Tm:LuAG	2.0 μm	660 ns	62 kHz	1.08 W	[202]	
		SGM	HRM	Ho ³⁺ /Pr ³⁺ :ZBLAN	2.86 μm	1.73 μs	131 kHz	48 mW	[203]	
	LPE	YAG	Ho,Pr,LLF	2.95 μm	654 ns	90.4 kHz	82 mW	[204]		
	BP	ME	Quartz	Tm:Ho:YAG	2.1 μm	636 ns	122 kHz	27 mW	[205]	
LPE		Quartz	Tm:YAP	1988 nm	1.8 μs	19.3 kHz	151 mW	[206]		
LPE		DM	Tm:YAP	1969 nm	181 ns	81 kHz	3.1 W	[207]		
ME		HRM	Tm:YAG	2 μm	3.12 μs	11.6 kHz	38 mW	[208]		
LPE		—	Ho:ZBLAN	2.9 μm	2.4 μs	62.5 kHz	309 mW	[179]		
LPE		DM	Cr:ZnSe	2.4 μm	189 ns	176 kHz	36 mW	[209]		
LPE		—	Er:CaF ₂	2.8 μm	955 ns	41.9 kHz	178 mW	[210]		
LPE		GM	Tm:CaYAlO ₄	1.93 μm	3.1 μs	17.7 kHz	12 mW	[211]		
LPE		GM	Er:Y ₂ O ₃	2.72 μm	4.5 μs	12.6 kHz	6 mW	[211]		
LPE		Silicon	Er:SrF ₂	2.79 μm	702 ns	77 kHz	180 mW	[212]		
LPE	—	Er:ZBLAN	2.8 μm	1.2 μs	63 kHz	485 mW	[213]			
LPE	Silicon	Er:CaF ₂	2.8 μm	955 ns	41.9 kHz	178 mW	[210]			
LPE	CaF ₂	Ho,Pr:LLF	2.95 μm	194 ns	159 kHz	385 mW	[214]			

注: SGM, sulfidation grown method; GM, gold mirror.

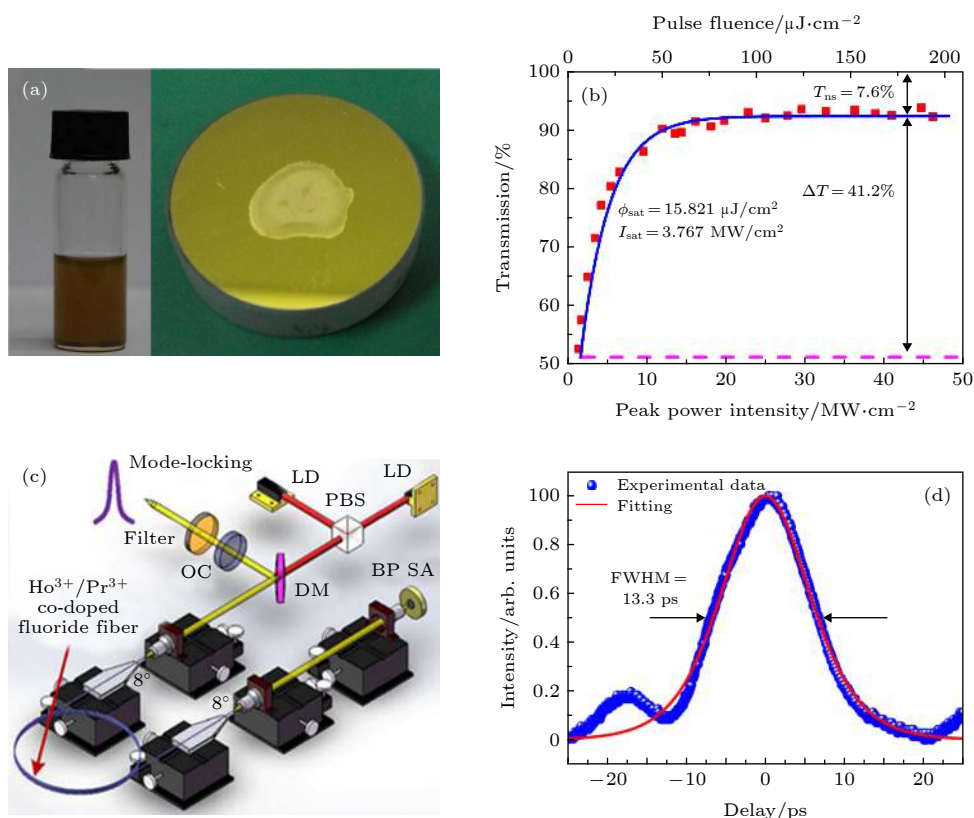


图 7 (a) 黑磷纳米片溶液; (b) 黑磷饱和吸收体的非线性曲线; (c) $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺的被动锁模光纤激光器; (d) 锁模脉冲的自相关曲线^[179]

Fig. 7. (a) Layered BP solution; (b) nonlinear transmission of BP SA; (c) passively mode-locked $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ co-doped fluoride fiber laser; (d) autocorrelation trace of the mode-locked pulses. Reprinted by permission from Ref. [179]. Copyright 2016 Nature Publishing Group.

二维材料也纷纷被用于固体激光器, 2018年, Liu等^[215]利用Bi纳米片实现了中红外全固态调Q激光, 重复频率和脉宽分别为56.2 kHz和980 ns. 同年, 山东师范大学刘杰教授课题组, 利用MXene饱和吸收体分别在1和2 μm 波段实现了调Q脉冲激光^[216,217], 证明了MXene具有宽带吸收调制特性.

4 总结与展望

本文总结了近年来基于二维材料脉冲激光器的研究进展. 对于二维材料, 讨论了材料的特性、制备方法和测试方法. 二维材料以其独特的光学特性成为一种重要的光学材料, 在开发宽带饱和吸收材料方面具有巨大的潜力. 能否有一种材料从广泛的材料中脱颖而出, 仍是一个待讨论的话题, 这其中包括了材料的可靠性和可重复性、是否可以在光学基片上生长大面积均匀的材料(最好不需要转移)、非线性光学特性能否被精确和灵活地控制, 材料能

否承受在各个波长和脉宽下的高强度激光. 就目前来看, 虽然各种二维材料已经满足了部分要求, 但并不是所有的标准都在一种特定的材料中得到满足, 例如, 基于化学气相法生长的石墨烯具有大面积、可靠生长的优点, 然而, 精确控制层数的难题和相对较弱的光与物质相互作用, 限制了它在强吸收和大调制深度方面的发展潜力. 因此, 在发展和探索新型二维材料方面, 仍具有较大的挑战性.

对于脉冲激光器, 本文归纳了基于二维材料的光纤激光器和固体激光器的激光性能, 对目前的相关工作进行了详细总结, 并对这些激光器中的优良性能进行了重点描述, 例如光纤锁模激光器的锁模可达640 MHz, 谐波锁模可达3.27 GHz, 超快固体激光器的最短脉宽是41 fs, 并且, 在可见光到中红外波段均实现了超快激光. 到目前为止, 基于二维材料的脉冲激光器的研究已有10年的时间, 二维材料成功用于各种锁模/调Q激光器(光纤、固体、薄片和波导), 未来的发展可能是不断提高脉冲激光器的输出性能和宽带响应范围. 通过对腔体进

行优化设计、生长高质量的二维材料, 激光性能仍具有较大的上升空间. 由于二维材料具有宽带吸收特性, 在可见光波段到红外波段均有光响应, 激光器可进一步向更短波长或更长波长扩展. 其中, 石墨稀、TIs、TMDs 和 BP 的带隙分别为 0 eV, 0—0.7 eV, 1—2.5 eV 和 0.35—2 eV, 对应的载流子寿命分别为小于 200 fs, 0.3—2 ps, 约 1—3 ps 和 360 fs. 波长 400 nm 的光子对应的光子能量是 3.1 eV, 大于石墨烯、TMDs、TIs 和 BP 的带隙, 可以被这些材料所吸收调制. 波长为 4000 nm 的光子所对应的光子能量是 0.3 eV, 这要大于石墨烯和拓扑绝缘体的带隙, 目前, 基于二维材料的超快光纤脉冲激光器, 最短波长和最长波长分别为 1 μm 和 2.78 μm , 对于固体激光器, 实现的最短波长和最长波长分别为 522 nm 和 2.8 μm , 波长为 4 μm 的超快激光器未见报道, 随着激光增益介质和相关光学器件的发展, 石墨烯和 TIs 有望作为 4 μm 波段激光器的饱和吸收体. 另外, 现代的材料工程技术可以通过异质结构、掺杂等方式来改变现有二维材料的带隙, 使得各种材料适用于超快激光器, 这也为发现具有独特光电特性的二维材料提供了可能.

综上所述, 基于二维材料的超快光子学已经成为一个高度活跃的研究领域, 在该领域中, 人们投入了大量的精力来研究脉冲激光器的输出特性, 例如平均功率、脉宽、重复频率和脉冲能量. 由于二维材料除了具有饱和吸收特性外, 还具有较大的非线性折射率, 可用于光调制器^[218]和波长转换器. 期望在未来的几十年里, 基于二维材料的非线性光学器件迅速发展, 为人类社会的进步作出贡献.

参考文献

- [1] Gattass R R, Mazur E 2008 *Nat. Photonics* **2** 219
- [2] Dominik S, Christopher M M, Christian S, Mark S S 2010 *Opt. Lett.* **35** 3799
- [3] Shuo T, Jian L, Tatiana B K, Chen Z, Bruce J T 2009 *J. Biomed. Opt.* **14** 030508
- [4] Sobon G, Klimczak M, Sotor J, Krzemppek K, Pysz D, Stepień R 2013 *Opt. Mater. Express* **4** 7
- [5] Bao Q, Zhang H, Wang Y, Ni Z, Yan Y, Shen Z 2009 *Adv. Funct. Mater.* **19** 3077
- [6] Krzemppek K, Sobon G, Kaczmarek P, Abramski K M 2013 *Laser Phys. Lett.* **10** 105103
- [7] Zhang H 2015 *ACS Nano*. **9** 9451
- [8] Xia F, Wang H, Xiao D, Dubey M, Ramasubramaniam A 2014 *Nat. Photonics*. **8** 899
- [9] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V 2004 *Science* **306** 666
- [10] Zhang H, Liu C, Qi X, Dai X, Fang Z, Zhang S 2009 *Nat. Phys.* **5** 438
- [11] Zhao C, Zhang H, Qi X, Chen Y, Wang Z, Wen S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 211106
- [12] Brown A, Rundqvist S 1965 *Acta Crystallogr.* **19** 684
- [13] Wang X, Lan S 2016 *Adv. Opt. Photonics* **8** 618
- [14] Chen Y, Jiang G, Chen S, Guo Z, Yu X, Zhao C, et al. 2015 *Opt Express* **23** 12823
- [15] Sotor J, Sobon G, Abramski K M 2014 *Opt. Express* **22** 13244
- [16] Ahmed M, Latiff A, Arof H, Harun S 2016 *Laser Phys. Lett.* **13** 095104
- [17] Xia H, Li H, Lan C, Li C, Zhang X, Zhang S 2014 *Opt. Express* **22** 17341
- [18] Guo B 2018 *Chin. Opt. Lett.* **16** 20004
- [19] Du J, Zhang M, Guo Z, Chen J, Zhu X, Hu G 2017 *Sci. Rep.* **7** 42357
- [20] Purdie D G, Popa D, Wittwer V J, Jiang Z, Bonacchini G, Torrisi F, et al. 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 253101
- [21] Koo J, Park J, Lee J, Jhon Y, Lee J 2016 *Opt. Express* **24** 10575
- [22] Sobon G, Sotor J, Abramski K 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 161109
- [23] Liu W, Pang L, Han H, Tian W, Chen H, Lei M 2016 *Sci. Rep.* **6** 19997
- [24] Yan P, Lin R, Ruan S, Liu A, Chen H 2015 *Opt. Express* **23** 154
- [25] Jin X, Hu G, Zhang M, Hu Y, Albrow-Owen T, Howe R 2018 *Opt. Express* **26** 12506
- [26] Zhao L, Tang D, Zhang H, Wu X, Bao Q, Loh K 2010 *Opt. Lett.* **35** 3622
- [27] Huang P, Lin S, Yeh C, Kuo H, Huang S, Lin G 2012 *Opt. Express* **20** 2460
- [28] Tarka J, Boguslawski J, Sobon G, Pasternak I, Przewłoka A, Strupinski W 2017 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **23** 60
- [29] Sotor J, Pasternak I, Krajewska A, Strupinski W, Sobon G 2015 *Opt. Express* **23** 27503
- [30] Liu X, Yang H, Cui Y, Chen G, Yang Y, Wu X 2016 *Sci. Rep.* **6** 26024
- [31] Sobon G, Sotor J, Pasternak I, Krajewska A, Strupinski W, Abramski K 2015 *Opt. Mater. Express* **5** 2884
- [32] Bao Q, Zhang H, Ni Z, Wang Y, Polavarapu L, Shen Z 2010 *Nano Res.* **4** 297
- [33] Zhang H, Tang D, Zhao L, Bao Q, Loh K 2009 *Opt. Express* **17** 17630
- [34] Steinberg D, Zapata J, Thoroh de Souza E, Saito L 2018 *J. Lightwave Technol.* **36** 1868
- [35] Tarka J, Sobon G, Boguslawski J, Sotor J, Jagiello J, Aksienionek M 2014 *Opt. Mater. Express* **4** 1981
- [36] Meng Y, Zhang S, Li X, Li H, Du J, Hao Y 2012 *Laser Phys. Lett.* **9** 537
- [37] Sun Z, Popa D, Hasan T, Torrisi F, Wang F, Kelleher E 2010 *Nano Research* **3** 653
- [38] Sotor J, Boguslawski J, Martynkien T, Mergo P, Krajewska A, Przewłoka A 2017 *Opt. Lett.* **42** 1592
- [39] Pawliszewska M, Martynkien T, Przewłoka A, Sotor J 2018 *Opt. Lett.* **43** 38
- [40] Zhu G, Zhu X, Wang F, Xu S, Li Y, Guo X 2016 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **28** 7
- [41] Ko S, Lee J, Koo J, Joo B, Gu M, Lee J 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 3776
- [42] Wang Z, Mu H, Yuan J, Zhao C, Bao Q, Zhang H 2017 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **23** 195

- [43] Dou Z, Song Y, Tian J, Liu J, Yu Z, Fang X 2014 *Opt. Express* **22** 24055
- [44] Li K, Song Y, Yu Z, Xu R, Dou Z, Tian J 2015 *Laser Phys. Lett.* **12** 105103
- [45] Liu H, Zheng X, Liu M, Zhao N, Luo A, Luo Z 2014 *Opt. Express* **22** 6868
- [46] Xu Y, Xie H, Jiang G, Miao L, Wang K, Tang S 2017 *Opt. Commun.* **395** 55
- [47] Gao L, Zhu T, Huang W, Luo Z 2015 *IEEE Photonics J.* **7** 3300108
- [48] Meng Y, Semaan G, Salhi M, Niang A, Guesmi K, Luo Z 2015 *Opt. Express* **23** 23053
- [49] Zhao C, Zou Y, Chen Y, Wang Z, Lu S, Zhang H 2012 *Opt. Express* **20** 27888
- [50] Guo B, Yao Y, Yang Y, Yuan Y, Wang R, Wang S 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 063108
- [51] Chi C, Lee J, Koo J, Lee J 2014 *Laser Phys.* **24** 105106
- [52] Yan P, Lin R, Chen H, Zhang H, Liu A, Yang H 2015 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **27** 264
- [53] Lee J, Koo J, Jhon Y, Lee J 2014 *Opt. Express* **22** 6165
- [54] Yan P, Lin R, Ruan S, Liu A, Chen H, Zheng Y 2015 *Sci. Rep.* **5** 8690
- [55] Mao D, Jiang B, Gan X, Ma C, Chen Y, Zhao C 2015 *Photonics Res.* **3** A43
- [56] Liu M, Zhao N, Liu H, Zheng X, Luo A, Luo Z 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 983
- [57] Jung M, Lee J, Koo J, Park J, Song Y, Lee K 2014 *Opt. Express* **22** 7865
- [58] Yin K, Zhang B, Li L, Jiang T, Zhou X, Hou J 2015 *Photonics Res.* **3** 72
- [59] Boguslawski J, Sotor J, Sobon G, Tarka J, Jagiello J, Macherzynski W 2014 *Laser Phys. Lett.* **24** 105111
- [60] Shaw L, Sotor J, Sobon G, Boguslawski J, Tarka J, Abramski K 2015 *Fiber Lasers XII: Technology, Systems, and Applications* **9344** 93441Z
- [61] Sotor J, Sobon G, Grodecki K, Abramski K 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 251112
- [62] Boguslawski J, Sobon G, Zybala R, Mars K, Mikula A, Abramski K 2015 *Opt. Express* **23** 29014
- [63] Boguslawski J, Sobon G, Zybala R, Sotor J 2015 *Opt. Lett.* **40** 2786
- [64] Liu M, Liu W, Pang L, Teng H, Fang S, Wei Z 2018 *Opt. Commun.* **406** 72
- [65] Wu K, Zhang X, Wang J, Li X, Chen J 2015 *Opt. Express* **23** 11453
- [66] Guo B, Yao Y, Yan P, Xu K, Liu J, Wang S 2016 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **28** 323
- [67] Khazaiezhad R, Kassani S, Jeong H, Park K, Kim B, Yeom D 2015 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **27** 1581
- [68] Khazaiezhad R, Hosseinzadeh Kassani S, Jeong H, Yeom D 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 3550
- [69] Jung M, Lee J, Park J, Koo J, Jhon Y, Lee J 2015 *Opt. Express* **23** 19996
- [70] Zhang H, Lu S, Zheng J, Du J, Wen S, Tang D 2014 *Opt. Express* **22** 7249
- [71] Liu H, Luo A, Wang F, Tang R, Liu M, Luo Z 2014 *Opt. Lett.* **39** 4591
- [72] Aiub E, Steinberg D, Thoroh de Souza E, Saito L 2017 *Opt. Express* **25** 10546
- [73] Liu W, Pang L, Han H, Bi K, Lei M, Wei Z 2017 *Nanoscale* **9** 5806
- [74] Ahmed M, Latiff A, Arof H, Ahmad H, Harun S 2016 *Opt. Laser Technol.* **82** 145
- [75] Liu M, Zheng X, Qi Y, Liu H, Luo A, Luo Z 2014 *Opt. Express* **22** 22841
- [76] Wang Y, Mao D, Gan X, Han L, Ma C, Xi T 2015 *Opt. Express* **23** 205
- [77] Zhang M, Howe R, Woodward R, Kelleher E, Torrisi F, Hu G 2015 *Nano Research* **8** 1522
- [78] Wang J, Jiang Z, Chen H, Li J, Yin J, Wang J 2017 *Opt. Lett.* **42** 5010
- [79] Liu W, Liu M, Ouyang Y, Hou H, Ma G, Lei M, et al. 2018 *Nanotechnology* **29** 174002
- [80] Wang J, Lu W, Li J, Chen H, Jiang Z, Wang J 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **24** 1100706
- [81] Lee J, Koo J, Jhon Y, Lee J 2017 *Opt. Mater. Express* **7** 2968
- [82] Li J, Zhao Y, Chen Q, Niu K, Sun R, Zhang H 2017 *IEEE Photonics J.* **9** 1506707
- [83] Niu K, Sun R, Chen Q, Man B, Zhang H 2018 *Photonics Res.* **6** 72
- [84] Cui Y, Lu F, Liu X 2017 *Sci. Rep.* **7** 40080
- [85] Mao D, Cui X, Gan X, Li M, Zhang W, Lu H 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **24** 1100406
- [86] Hisyam M, Rusdi M, Latiff A, Harun S 2017 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **23** 1100205
- [87] Song H, Wang Q, Zhang Y, Li L 2017 *Opt. Commun.* **394** 157
- [88] Mao D, Li M, Cui X, Zhang W, Lu H, Song K 2018 *Opt. Commun.* **406** 254
- [89] Chen Y, Chen S, Liu J, Gao Y, Zhang W 2016 *Opt. Express* **24** 13316
- [90] Song Y, Chen S, Zhang Q, Li L, Zhao L, Zhang H 2016 *Opt. Express* **24** 25933
- [91] Li D, Jussila H, Karvonen L, Ye G, Lipsanen H, Chen X 2015 *Sci. Rep.* **5** 15899
- [92] Sotor J, Sobon G, Macherzynski W, Paletko P, Abramski K 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 051108
- [93] Luo Z, Liu M, Guo Z N, Jiang X, Luo A P, Zhao C 2015 *Opt. Express* **23** 20030
- [94] Liu M, Jiang X, Yan Y, Wang X, Luo A, Xu W 2018 *Opt. Commun.* **406** 85
- [95] Xu Y, Jiang X, Ge Y, Guo Z, Zeng Z, Xu Q 2017 *J. Mater. Chem. C* **5** 3007
- [96] Zhang S, Zhang X, Wang H, Chen B, Wu K, Wang K 2016 *Opt. Mater. Express* **6** 3159
- [97] Yun L 2017 *Opt. Express* **25** 32380
- [98] Sotor J, Sobon G, Kowalczyk M, Macherzynski W, Paletko P, Abramski K 2015 *Opt. Lett.* **40** 3885
- [99] Yu H, Zheng X, Yin K, Cheng X, Jiang T 2015 *Appl. Opt.* **54** 10290
- [100] Pawliszewska M, Ge Y, Li Z, Zhang H, Sotor J 2017 *Opt. Express* **25** 16916
- [101] Chai T, Li X, Feng T, Guo P, Song Y, Chen Y 2018 *Nanoscale* **10** 17617
- [102] Jhon Y, Koo J, Anasori B, Seo M, Lee J, Gogotsi Y 2017 *Adv. Mater.* **29** 1702496
- [103] Jiang X, Liu S, Liang W, Luo S, He Z, Ge Y 2018 *Laser Photonics Rev.* **12** 1700229
- [104] Guo B, Wang S, Wu Z, Wang Z, Wang D, Huang H 2018 *Opt. Express* **26** 22750
- [105] Song Y, Liang Z, Jiang X, Chen Y, Li Z, Lu L 2017 *2D Mater.* **4** 045010
- [106] Liu S, Zhu X, Zhu G, Balakrishnan K, Zong J, Wiersma K 2015 *Opt. Lett.* **40** 147
- [107] Liu J, Wu S, Yang Q, Wang P 2011 *Opt. Lett.* **36** 4008

- [108] Wang R, Liu Y, Jiang M, Xu X, Wu H, Tian Y 2017 *Opt. Quant. Electron.* **49** 137
- [109] Ahmad H, Aidit S, Ooi SI, Rezayi M, Tiu Z 2017 *Laser Phys.* **27** 150302
- [110] Popa D, Sun Z, Hasan T, Torrisi F, Wang F, Ferrari A 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 073106
- [111] Wei C, Zhu X, Wang F, Xu Y, Balakrishnan K, Song F 2013 *Opt. Lett.* **38** 3233
- [112] Mansoor A, Ahmed Hamida B, Eltaif T, Ismail E, Kadir N, Khan S 2018 *J. Opt. Commun.* **39** 307
- [113] Yu Z, Song Y, Dong X, Li Y, Tian J, Wang Y 2013 *Appl. Opt.* **52** 7127
- [114] Liu C, Ye C, Luo Z, Cheng H, Wu D, Zheng Y 2013 *Opt. Express* **21** 204
- [115] Lin H, Li W, Lan J, Guan X, Xu H, Cai Z 2017 *Appl. Opt.* **56** 802
- [116] Wu D, Cai Z, Zhong Y, Peng J, Weng J, Luo Z 2015 *IEEE Photon Technol. Lett.* **27** 2379
- [117] Luo Z, Huang Y, Weng J, Cheng H, Lin Z, Xu B 2013 *Opt. Express* **21** 29516
- [118] Gao L, Huang W, Zhang J D, Zhu T, Zhang H, Zhao C 2014 *Appl. Opt.* **53** 5117
- [119] Chen Y, Zhao C, Huang H, Chen S, Tang P, Wang Z 2013 *J. Lightwave Technol.* **31** 2857
- [120] Li W, Zou J, Huang Y, Wang K, Du T, Jiang S 2018 *Photonics Res.* **6** C29
- [121] Sun L, Lin Z, Peng J, Weng J, Huang Y, Luo Z 2014 *Sci. Rep.* **4** 4794
- [122] Luo Z, Liu C, Huang Y, Wu D, Wu J, Xu H 2014 *IEEE Sel. Top. Quant.* **20** 0902708
- [123] Koo J, Lee J, Lee J 2017 *J. Lightwave Technol.* **35** 2175
- [124] Yan K, Lin J, Zhou Y, Gu C, Xu L, Wang A 2016 *Appl. Opt.* **55** 3026
- [125] Chen Y, Zhao C, Chen S, Du J, Tang P, Jiang G 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **20** 315
- [126] Koo J, Lee J, Chi C, Lee J 2014 *J. Opt. Soc. Am. B.* **31** 2157
- [127] Yan P, Chen H, Li K, Guo C, Ruan S, Wang J, et al. 2016 *IEEE Photonics J.* **8** 1500506
- [128] Niu K, Chen Q, Sun R, Man B, Zhang H 2017 *Opt. Mater. Express* **7** 3934
- [129] Li W, Peng J, Zhong Y, Wu D, Lin H, Cheng Y 2016 *Opt. Mater. Express* **6** 2031
- [130] Luo Z, Wu D, Xu B, Xu H, Cai Z, Peng J 2016 *Nanoscale* **8** 1066
- [131] Woodward R, Kelleher E, Howe R, Hu G, Torrisi F, Hasan T 2014 *Opt. Express* **22** 31113
- [132] Wei R, Zhang H, Hu Z, Qiao T, He X, Guo Q 2016 *Nanotechnology* **27** 305203
- [133] Chen J, Deng G, Yan S, Li C, Xi K, Xu F 2015 *Opt. Lett.* **40** 3576
- [134] Xia H, Li H, Lan C, Li C, Du J, Zhang S 2015 *Photonics Res.* **3** A92
- [135] Huang Y, Luo Z, Li Y, Zhong M, Xu B, Che K 2014 *Opt. Express* **22** 25258
- [136] Ren J, Wang S, Cheng Z, Yu H, Zhang H, Chen Y 2015 *Opt. Express* **23** 5607
- [137] Li H, Xia H, Lan C, Li C, Zhang X, Li J 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 69
- [138] Chen B, Zhang X, Wu K, Wang H, Wang J, Chen J 2015 *Opt. Express* **23** 26723
- [139] Luo Z, Huang Y, Zhong M, Li Y, Wu J, Xu B 2014 *J. Lightwave Tech.* **32** 4077
- [140] Lin J, Hu Y, Chen C, Gu C, Xu L 2015 *Opt. Express* **23** 29059
- [141] Zhang M, Hu G, Hu G, Howe RC, Chen L, Zheng Z 2015 *Sci. Rep.* **5** 17482
- [142] Kassani S, Khazaiezhad R, Jeong H, Nazari T, Yeom D 2015 *Opt. Mater. Express* **5** 373
- [143] Lin J, Yan K, Zhou Y, Xu L, Gu C, Zhan Q 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 191108
- [144] Woodward R, Howe R, Runcorn T, Hu G, Torrisi F, Kelleher E 2015 *Opt. Express* **23** 20051
- [145] Chen B, Zhang X, Guo C, Wu K, Chen J, Wang J 2016 *Opt. Eng.* **55** 081306
- [146] Liu W, Liu M, Lei M, Fang S, Wei Z 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **24** 0901005
- [147] Wu D, Cai Z, Zhong Y, Peng J, Cheng Y, Weng J 2017 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **23** 7
- [148] Huang K, Lu B, Li D, Qi X, Chen H, Wang N 2017 *Appl. Opt.* **56** 6427
- [149] Rashid1 F, Azzuhri1 S, Salim M, Shaharuddin R, Ismail1 M, Ismail1 M 2016 *Laser Phys. Lett.* **13** 085102
- [150] Zhao R, He J, Su X, Wang Y, Sun X, Nie H 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **24** 0900405
- [151] Mu H, Lin S, Wang Z, Xiao S, Li P, Chen Y 2015 *Adv. Opt. Mater.* **3** 1447
- [152] Yu H, Zheng X, Yin K, Cheng X, Jiang T 2016 *Opt. Mater. Express* **6** 603
- [153] Zhang Y, Yu H, Zhang R, Zhao G, Zhang H, Chen Y 2017 *Opt. Lett.* **42** 547
- [154] Baek I, Lee H, Bae S, Hong B, Ahn Y, Yeom D 2012 *Appl. Phys. Express* **5** 032701
- [155] Tan W, Su C, Knize R, Xie G, Li L, Tang D 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 031106
- [156] Ma J, Xie G, Lv P, Gao W, Yuan P, Qian L 2014 *Sci. Rep.* **4** 5016
- [157] Cai W, Jiang S, Xu S, Li Y, Liu J, Li C 2015 *Opt. Laser Technol.* **65** 1
- [158] Feng C, Wang Y, Liu J, Tsang Y, Song Y, Yu Z 2013 *Opt. Commun.* **298** 168
- [159] Xu S, Man B, Jiang S, Feng D, Gao S, Chen C 2014 *Opt. Lett.* **39** 2707
- [160] Xu J, Li X, Wu Y, Hao X, He J, Yang K 2011 *Opt. Lett.* **36** 1948
- [161] Zhu H, Liu J, Jiang S, Xu S, Su L, Jiang D 2015 *Opt. Laser Technol.* **75** 83
- [162] Zhu H, Zhao L, Liu J, Xu S, Cai W, Jiang S 2016 *Opt. Eng.* **55** 081304
- [163] Xu J, Li X, He J, Hao X, Wu Y, Yang Y 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 261107
- [164] Xu J, Li X, Wu Y, He J, Liu S, Hao X 2012 *Opt. Letter* **37** 2652
- [165] Davide D, Ugolotti E, Schmidt A, Petrov V, Griebner U, Agnesi A 2013 *Opt. Lett.* **38** 1745
- [166] Xie G, Ma J, Lv P, Gao W, Yuan P, Qian L 2012 *Opt. Mater. Express* **2** 878
- [167] Liu J, Wang Y, Qu Z, Zheng L, Su L, Xu J 2012 *Laser Phys. Lett.* **9** 15
- [168] Tolstik N, Sorokin E, Sorokina I 2014 *Opt. Express* **22** 5564
- [169] Ma J, Xie G, Lv P, Gao W, Yuan P, Qian L 2012 *Opt. Lett.* **37** 2085
- [170] Wan H, Cai W, Wang F, Jiang S, Xu S, Liu J 2015 *Opt. Quant. Electron.* **48** 11
- [171] Wang Y, Qu Z, Liu J, Tsang Y 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 3259

- [172] Zhu H, Cai W, Wei J, Liu J, Zheng L, Su L 2015 *Opt. Laser Technol.* **68** 120
- [173] Wang Y, Sung W, Su X, Zhao Y, Zhang B, Wu C 2018 *IEEE Photonics J.* **10** 1504110
- [174] Sun X, Zhang B, Li Y, Luo X, Li G, Chen Y 2018 *ACS Nano* **12** 11376
- [175] Zhao G, Hou J, Wu Y, He J, Hao X 2015 *Adv. Opt. Mater.* **3** 937
- [176] Zhang B, Lou F, Zhao R, He J, Li J, Su X 2015 *Opt. Lett.* **40** 3691
- [177] Su X, Wang Y, Zhang B, Zhao R, Yang K, He J 2016 *Opt. Lett.* **41** 1945
- [178] Sun X, Nie H, He J, Zhao R, Su X, Wang Y 2017 *Opt. Express* **25** 20025
- [179] Li J, Luo H, Zhai B, Lu R, Guo Z, Zhang H 2016 *Sci. Rep.* **6** 30361
- [180] Zhao T, Wang Y, Chen H, Shen D 2014 *Appl. Phys. B* **116** 947
- [181] Hou J, Jia Z, Zhang B, Yin Y, Ning J, Mu W 2016 *IEEE Photonics Tech. L.* **28** 825
- [182] Wang Z, Chen X, He J, Xu X, Zhang B, Yang K 2015 *IEEE J. Quant. Elect.* **51** 7000105
- [183] Guan X, Zhan L, Zhu Z, Xu B, Xu H, Cai Z 2018 *Appl. Opt.* **57** 371
- [184] Li C, Liu J, Jiang S, Xu S, Ma W, Wang J 2016 *Opt. Mater. Express* **6** 1570
- [185] Nie H, Zhang P, Zhang B, Yang K, Zhang L, Li T 2017 *Opt. Lett.* **42** 699
- [186] Zhu G, Zhu X, Balakrishnan K, Norwood R A, Peyghambarian N 2013 *Opt. Mater. Express* **3** 1365
- [187] Zhang C, Liu J, Fan X, Peng Q, Guo X, Jiang D 2018 *Opt. Laser Technol.* **103** 89
- [188] Zu Y, Zhang C, Wu Y, Liu J, Liu J, Wang Y 2018 *Chin. Opt. Lett.* **16** 020013
- [189] Liu X, Yang K, Zhao S, Li T, Qiao W, Zhang H 2017 *Photonics Res.* **5** 461
- [190] Li J, Luo H, Wang L, Zhao C, Zhang H, Li H 2015 *Opt. Lett.* **40** 3659
- [191] You Z, Sun Y, Sun D, Zhu Z, Wang Y, Li J 2017 *Opt. Lett.* **42** 871
- [192] Wang S, Yu H, Zhang H, Wang A, Zhao M, Chen Y 2014 *Adv. Mater.* **26** 3538
- [193] Kong L, Xie G, Yuan P, Qian L, Wang S, Yu H 2015 *Photonics Res.* **3** A47
- [194] Lan J, Zhang X, Zhou Z, Xu B, Xu H, Cai Z 2017 *IEEE Photonics Tech. L.* **29** 515
- [195] Luan C, Zhang X, Yang K, Zhao J, Zhao S, Li T 2017 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **23** 66
- [196] Fan M, Li T, Zhao S, Li G, Ma H, Gao X 2016 *Opt. Lett.* **41** 540
- [197] Zhang S, Liu X, Guo L, Fan M, Lou F, Gao P 2017 *IEEE Photonics Tech. L.* **29** 2258
- [198] Ge P, Liu J, Jiang S, Xu Y, Man B 2015 *Photonics Res.* **3** 256
- [199] Xue Y, Xie Z, Ye Z, Hu X, Xu J, Zhang H 2018 *Chin. Opt. Lett.* **16** 020018
- [200] Su X, Nie H, Wang Y, Li G, Yan B, Zhang B 2017 *Opt. Lett.* **42** 3502
- [201] Fan M, Li T, Zhao J, Zhao S, Li G, Yang K 2018 *Opt. Lett.* **43** 1726
- [202] Luan C, Yang K, Zhao J, Zhao S, Song L, Li T 2016 *Opt. Lett.* **41** 3783
- [203] Wei C, Luo H, Zhang H, Li C, Xie J, Li J 2016 *Laser Phys. Lett.* **13** 105108
- [204] Guo L, Li T, Zhang S, Wang M, Zhao S, Yang K 2017 *Opt. Mater. Express* **7** 2090
- [205] Zhang R, Zhang Y, Yu H, Zhang H, Yang R, Yang B 2015 *Adv. Opt. Mater.* **3** 1787
- [206] Chu Z, Liu J, Guo Z, Zhang H 2016 *Opt. Mater. Express* **6** 2374
- [207] Zhang H, He J, Wang Z, Hou J, Zhang B, Zhao R 2016 *Opt. Mater. Express* **6** 2328
- [208] Xie Y, Kong L, Qin Z, Xie G, Zhang J 2016 *Opt. Eng.* **55** 081307
- [209] Wang Z, Zhao R, He J, Zhang B, Ning J, Wang Y 2016 *Opt. Express* **24** 1598
- [210] Li C, Liu J, Guo Z, Zhang H, Ma W, Wang J 2018 *Opt. Commun.* **406** 158
- [211] Kong L, Qin Z, Xie G, Guo Z, Zhang H, Yuan P 2016 *Laser Phys. Lett.* **13** 045801
- [212] Liu J, Liu J, Guo Z, Zhang H, Ma W, Wang J 2016 *Opt. Express* **24** 30289
- [213] Qin Z, Xie G, Zhang H, Zhao C, Yuan P, Wen S 2015 *Opt. Express* **23** 24713
- [214] Nie H, Zhang P, Zhang B, Xu M, Yang K, Sun X 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **24** 1600205
- [215] Wang C, Wang Y, Jiang X, Xu J, Huang W, Zhang F 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1900060
- [216] Liu J, Huang H, Zhang F, Zhang Z, Liu J, Zhang H 2018 *Photonics Res.* **6** 762
- [217] Zu Y, Zhang C, Guo X, Liang W, Liu J, Su L 2019 *Laser Phys. Lett.* **16** 015803
- [218] Feng X, Ding B, Liang W, Zhang F, Ning T, Liu J 2018 *Laser Phys. Lett.* **15** 085805

INVITED REVIEW

Ultrafast pulse lasers based on two-dimensional nanomaterials*

Wang Cong¹⁾ Liu Jie^{1)†} Zhang Han^{2)‡}1) (*School of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China*)2) (*College of Optoelectronics Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

(Received 17 May 2019; revised manuscript received 21 June 2019)

Abstract

Ultrafast pulse laser has been widely used in many fields, such as optical communications, military and materials processing. Semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) serving as a saturable absorber is an effective way to obtain ultrafast pulse laser with ps-level pulse width. The SESAM needs specially designing to meet different wavelength operations. And the low damage threshold and high fabrication cost of SESAM hinder its development. Exploring novel materials is becoming a hot topic to overcome these drawbacks and obtain ultrafast laser with excellent performance. The discovery of graphene opens the door for two-dimensional nanomaterials due to the unique photoelectric properties of layered materials. Subsequently, two-dimensional (2D) materials such as topological insulators, transition metal sulfides, and black phosphorus are reported. These materials are used as saturable absorber to obtain a pulsed laser. In this paper, we summarize the research status of fiber lasers and solid-state lasers based on 2D materials in recent years. The development status of the lasers in terms of central wavelength, pulse width, repetition frequency, pulse energy and output power are discussed. Finally, the summary and outlook are given. We believe that nonlinear optical devices based on 2D materials will be rapidly developed in the future several decades

Keywords: two-dimensional materials, fiber lasers, solid-state lasers**PACS:** 81.07.Bc, 42.55.Wd, 42.55.Xi**DOI:** [10.7498/aps.68.20190751](https://doi.org/10.7498/aps.68.20190751)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61875138), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61705140), and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2018M643165).

† Corresponding author. E-mail: hzhang@szu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: hzhang@szu.edu.cn