

基于光纤二维材料集成器件的脉冲激光器及外场调控(特邀)

毛梦涛, 陈锦辉, 丁梓轩, 徐 飞

(南京大学 现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210093)

摘 要: 脉冲光纤激光器在加工、光通信、生物医学、非线性研究等领域有很大的应用前景, 所以得到了广泛的关注。为了得到脉冲激光输出需要使用饱和吸收体, 其中二维材料具有独特的光电特性, 在光学和光电器件中已经有很多的应用, 尤其是二维材料具备良好的饱和吸收, 制备工艺简单, 易与光纤系统集成, 工作波长宽等特点, 被广泛地应用于脉冲光纤激光器。文中回顾了二维材料和光纤的集成方式以及相应的脉冲光纤激光器的输出特性, 并且对这类脉冲光纤激光器进行了外场调控的研究。

关键词: 二维材料; 可饱和吸收; 光纤脉冲激光器

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0803003

Pulsed laser based on two-dimensional material optical fiber integrated device and external control (*invited*)

Mao Mengtao, Chen Jinhui, Ding Zixuan, Xu Fei

(College of Engineering and Applied Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Pulsed fiber lasers have raised extensive attentions for their great application prospects in material processing and fabrication, optical communications, biomedical fields and research of nonlinearity. Saturable absorbers (SA) are used to obtain pulsed laser, two-dimensional materials have unique optical and electrical properties, which have many applications in the fields of optical and optoelectronic devices. In particular, they are widely used in pulsed fiber lasers, due to the features including saturable absorption, simple preparation process, easy integration with optical fiber systems, wide operating wavelength. This article reviews the pulsed fiber laser applications based on the integration of two-dimensional materials and optical fibers, and dicusses the external field controls of such pulsed fiber lasers.

Key words: two-dimensional materials; saturable absorption; pulsed fiber laser

收稿日期: 2018-04-11; 修订日期: 2018-05-14

基金项目: 科技部重点研发计划(2017YFC1403803); 国家自然科学基金面上项目(61475069)

作者简介: 毛梦涛(1993-), 男, 硕士生, 主要从事光纤激光器方面的研究。Email: mtmaonju@163.com

导师简介: 徐飞(1978-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电器件及系统方面的研究。Email: feixu@nju.edu.cn

0 引言

脉冲光纤激光器由于其技术优势日益在科研和工业界中得到了广泛关注,并且已经拥有较多的应用场景。

在 1960 年左右第一台激光器被 Maiman 等人发明后,激光器就一直处于很热门的研究状态。近些年尤其是光纤激光器发展非常迅速,也引起了各界的诸多关注。光纤激光器早在 1961 年就由 E. Snitzer 发明,但是由于当时光纤传输损耗较大,在一段时间内光纤激光器并没有得到很大的发展。直到高锟等人提出了低损耗光纤波导的时候,光纤激光器才逐步进入了发展阶段。光纤激光器对比固体激光器和气体激光器有独特的性质:插损小、光斑质量好、结构紧凑等。随着掺镱光纤的设计和制造水平的发展,高功率输出很容易实现^[1],光纤激光器被大规模地应用于工业加工中。光纤激光器在工业应用中可以用于金属、电介质等材料的切割、打标、焊接、清洗等工艺。随着对加工工艺要求的提升,对脉冲输出的光纤激光器的需求也同步提升。光纤激光器也被应用于医学成像。由于光纤激光器拥有光斑质量好、效率高、便携等特性,它在医学诊断和治疗中有很大的潜在应用,特别是在光学相干层析(OCT)中用作成像的光源^[2]。中红外波段的激光对于生物凝血有很大的作用,所以采用新型的掺杂光纤产生中红外的光纤激光器在生物医学领域也引起了很多研究者的兴趣^[3]。此外,光纤激光器尤其是脉冲光纤激光器由于其具有很高的峰值功率常被用于研究非线性光学过程,例如四波混频、受激拉曼散射、光学倍频等以及利用这些非线性过程产生新的光源^[4-5]。以上所举的应用场景只是光纤激光器应用和研究的一部分内容,光纤激光器还有更多的应用场景和更大的研究前景。目前光纤激光器的研究方向主要有:更多的波长(紫外、中红外等波段的激光)、更窄的脉宽、更高的平均功率和峰值功率以及可调谐性能等。

脉冲激光器是光纤激光器中非常重要的一个类别,光纤激光器得到脉冲的方式多种多样,可以使用饱和吸收体、非线性偏振旋转、非线性光纤环形镜等方式。其中饱和吸收体易于获得稳定脉冲,并且易于量产制备,所以饱和吸收体成为了光纤激光器最重

要的产生脉冲激光的方式之一。原则上说大多数光学吸收材料可以在它们的共振波长范围内用作饱和吸收体,实际上在过去的研究中确实已经有很多饱和吸收体被发明,包括染料、粒子掺杂的晶体、金属纳米粒子和半导体器件等。这些饱和吸收材料一般都存在着一些问题,例如响应时间不够快速、无法承受高功率、带宽窄、损耗较大、非线性小、没有办法低成本制备和难以与光纤系统集成等问题。现在的脉冲激光器特别是锁模激光器使用最多的饱和吸收体是半导体可饱和吸收镜(SESAM),这种饱和吸收体已经有很成熟的商业化产品。SESAM 的性能是可控的,这种饱和吸收体主要是利用成熟的半导体工艺去制备,缺陷控制和生长工艺都很重要,所以 SESAM 的性能参数是可以通过在设计和生产过程中调节的。正是由于这种在设计和生产过程中可控的特点,SESAM 是目前最成熟的饱和吸收器件,被广泛地应用于光纤和半导体激光器的脉冲输出。但是 SESAM 也有很明显的问题,它的制备工艺非常复杂,涉及到很多要求严格的工艺步骤,从而 SESAM 的生产成本非常昂贵。此外因为 SESAM 需要以半导体材料为基础,从而 SESAM 的工作带宽较窄,通常小于 100 nm,并且 SESAM 能够工作的波长范围比较窄,一般是 800~2 000 nm 之间。正是因为传统的饱和吸收体存在着一系列的原缺陷,所以科学家们发明了非线性偏振旋转、非线性光纤环形镜等方案去替代传统的饱和吸收体,但是这些方法对于外界的环境变化非常敏感,技术难度高,所以也很难进行大规模的应用。

自从 2004 年英国科学家 A. K. Geim 和 K. S. Novoselov 采用胶带机械剥离方法得到少层甚至单层石墨烯材料^[6],二维材料的研究便得到研究者广泛关注。以石墨烯为代表的二维材料可以实现从可见到近红外甚至远红外、太赫兹的超宽谱吸收和优异的非线性饱和吸收特性,可作为饱和吸收体,这样就很好的解决了上述传统饱和吸收体存在的问题,因此被广泛应用于脉冲光纤激光器。此外二维材料因为轻薄的特点很容易与光纤系统集成,并且二维材料的种类众多,可以产生出不同性能的激光输出。二维材料的制备工艺相对于传统的饱和吸收体也更加简单,所以二维材料的成本也远远低于 SESAM,这意味着二维材料会有很大的商业化前景;此外,二

维材料的工作带宽也超过了传统的饱和吸收体,并且由于不同的二维材料吸收特性不同,二维材料可以应用到紫外,中红外等特殊波段的脉冲光纤激光器中。

二维材料易于光纤系统集成,是脉冲光纤激光器饱和吸收体的重要选择。此外,目前工业和科研界对输出状态可调控的激光器的需求越来越大。文中从以上两点出发介绍了二维材料应用于脉冲光纤激光器以及外场调控激光输出状态的最新进展。

1 脉冲光纤激光器

众所周知,光纤激光器的实现方式有多种,根据激光腔结构的设计可以分为环形腔光纤激光器、F-P 腔光纤激光器、 δ 腔光纤激光器、8 字腔光纤激光器以及 θ 腔光纤激光器等。而采用不同的增益光纤可以得到不同波长的激光输出,比如掺铒光纤应用于 1 550 nm 波段的激光增益,掺镱光纤应用于 1 064 nm 波段,掺铥光纤应用于 2 μm 波段的激光增益等。

根据激光输出的形式,光纤激光器又可分为连续激光输出和脉冲激光输出,文中的重点是脉冲光纤激光器。脉冲光纤激光器不同于连续光输出的激光器,脉冲输出的激光器是以分立的脉冲形式进行输出,由于脉冲的能量是由平均功率除以重复频率得到,从而可以通过降低重复频率获得高的脉冲能量,这在实际应用中具有很大意义,例如激光焊接、激光清洗等领域需要高的脉冲能量。另外脉冲激光输出还有一个重要的性能参数就是峰值功率,这个性能参数对于非线性效应的研究是非常重要的。

脉冲光纤激光器产生脉冲的技术主要有两种,分别是调 Q 和锁模。调 Q 光纤激光器是通过调节激光谐振腔中的 Q 值来产生脉冲输出。激光腔的 Q 值可以表示为:

$$Q=2\pi\nu_0\left(\frac{\text{腔内存储能量}}{\text{每秒损耗能量}}\right)=2\pi\nu_0\frac{W}{\delta Wc/nL} \quad (1)$$

式中: W 为腔内储存的能量; δW 为光在激光腔中单次传输的损耗; n 为介质折射率; L 为激光腔的腔长。通常是在激光谐振腔中添加一个 Q 开关器件,这个 Q 开关器件是一个周期性的可调衰减器,在最初进行泵浦时提高腔内的损耗,即提高振荡阈值,这样激光上能级可以积累大量的反转粒子数,当积累的反转粒子数达到饱和状态时,降低腔内的损耗,这时候腔内的 Q 值提高,激光腔内迅速建立起激光振荡,

从而输出峰值功率很高的激光脉冲。获得调 Q 脉冲的方式有主动调 Q 和被动调 Q,主动调 Q 是加入电光调制器、声光调制器等方法引入衰减器,而被动调 Q 通常是加入饱和吸收体,例如二维材料通常作为被动调 Q 的一种饱和吸收体被广泛研究。

除了调 Q 脉冲之外,锁模脉冲是在连续激光器中加入锁模器件使模式之间的相位间隔恒定。连续激光器是一个自由运转的激光输出,是多纵模输出的。因为这些模式的振幅与相位都是不固定的,所以激光的输出是所有模式的无规则叠加,假设有 $2M+1$ 个模式,总光场可以表示为:

$$E(t)=\sum_{k=-M}^ME_k\cos(\omega_k t+\phi_k) \quad (2)$$

其中, $\phi_k-\phi_{k-1}\neq$ 常数。

当在激光腔内加入锁模器件使得相位差为常数时,总的输出光场可以表示为:

$$E(t)=\sum_{k=-M}^ME_0\cos[(\omega_0+k\Delta\omega t)+\phi_0+k\Delta\phi] \quad (3)$$

利用三角函数关系可以将公式(3)表示为:

$$E(t)=E_0\frac{\sin\left[\frac{1}{2}(2M+1)(\Delta\omega t+\Delta\phi)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}(\Delta\omega t+\Delta\phi)\right]}\cos(\omega_0 t+\phi_0) \quad (4)$$

上式在满足 $\Delta\omega t+\Delta\phi=2m\pi$ 时取极大值,锁模状态下得到的光强是连续输出情况下的 $2M+1$ 倍,脉宽约等于所有频率线宽的倒数。锁模激光器是获得窄脉宽、高峰值功率、高重复频率的好方法。和调 Q 激光器类似,获得锁模激光的方式也分为主动锁模和被动锁模,主动锁模是加入电光调制器和声光调制器进行相位锁定,而被动锁模就是加入饱和吸收体,比如 SESAM 或者碳纳米管等。因为二维材料拥有一系列优异的非线性饱和吸收性能,所以二维材料也被广泛应用于光纤激光锁模。

2 二维材料

有一些材料是在二维平面内有序排列,在第三个维度堆叠而成的层状材料。当层状材料的厚度薄至其物理极限时会产生不同于层状材料本身的物理特性,将这种材料称为二维材料。

二维材料一般结构有序,在二维平面内生长并且第三个维度很薄。二维材料有一些特殊的电学、光电、电化学、生物等物理性质。

二维材料制备的方法主要有机械剥离法、液相剥离法、化学气相沉积等。

随着二维材料被广泛研究,二维材料也被用于激光光路产生脉冲激光。二维材料被用于脉冲光纤激光器主要是由于其可饱和吸收特性。饱和吸收是非线性吸收中的一种^[7],二维材料的可饱和吸收特性是指当入射光功率提高到一定阈值,

材料对光的吸收会从线性变成非线性,功率越强,吸收减小,透过率增加。

如图 1 所示当入射光功率较小时,价带电子吸收光子并跃迁到导带能级上,载流子会逐渐冷却并弛豫下来,此时材料对于光的吸收是线性的。当入射光光强逐渐增大,费米能级中的电子能态被填满,该入射光强就是饱和强度,由于泡利不相容原理,此时带间跃迁被阻断了,那么光子就可以无损通过,此时光子透过率会增加。

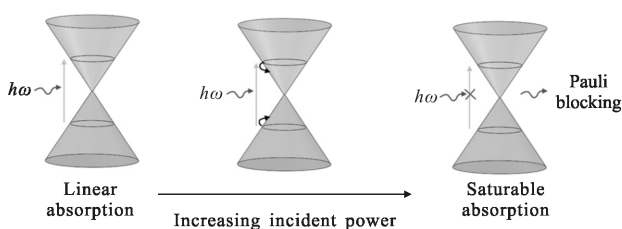


图 1 光学饱和吸收示意图

Fig.1 Schematic of optical saturable absorption

二维材料的可饱和吸收特性可以用二能级系统来解释,具体的表达式如下^[8-9]:

$$\alpha = \frac{\Delta\alpha}{1+I/I_s} + \alpha_{\text{linear}} \quad (5)$$

$$T = 1 - \frac{\Delta T}{1+I/I_s} \quad (6)$$

公式(5)和公式(6)分别代表了二维材料的吸收和透过曲线, α 和 T 分别代表了吸收系数和透过率; I_s 代表了饱和光强; α_{linear} 代表了线性吸收系数。

饱和吸收的测量方式一般有 Z 扫描法^[10-11]和平衡双探头测试法^[12]。在光纤集成器件中,通常采用平衡双探头测试法,如图 2 所示,该方法易于搭建,可以很容易将二维材料与光纤的集成器件加入到光路中。利用超快激光器输出,通过一个光纤衰减器调节光强的大小,再通过一个 1:1 的光纤耦合器,两路光分别通过普通光纤和带有饱和吸收体的一路再进入到光功率计进行探测,缓慢增加输入光功率并记录

下输出光功率,最终拟合曲线可以得出材料的饱和吸收和调制深度。

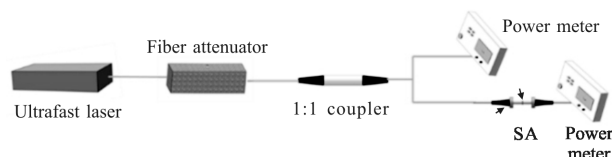


图 2 光学可饱和吸收的测量装置

Fig.2 Measuring setup of optical saturable absorption

2.1 石墨烯

二维材料种类众多,其中石墨烯是非常重要的。石墨烯是第一个被发现的二维材料,2004 年,英国曼彻斯特大学的 Novoselov 用机械剥离的方法首次制备了石墨烯^[6]。石墨烯从结构上可以理解为单原子层厚度的石墨,碳原子以 sp^2 杂化轨道在平面内组成六边形的蜂窝状结构。

石墨烯价带和导带会聚在一点上,石墨烯狄拉克点附近的电子态非常少,所以石墨烯也被称作半金属材料或零带隙半导体材料,石墨烯这种特殊的能带结构使得石墨烯很容易受到外界磁场、电场、掺杂物的影响,并且石墨烯对于光谱的吸收横跨了红外和紫外波段^[13-17]。

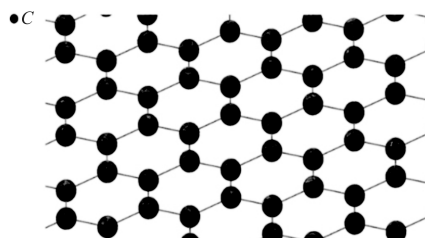


图 3 石墨烯结构示意图

Fig.3 Structure of graphene

2.2 拓扑绝缘体

拓扑绝缘体在凝聚态物理学吸引了很多研究者的关注^[18-21],层状拓扑绝缘材料表面或者边缘具有金属特性,带隙是与石墨烯带隙结构相似的狄拉克锥结构。

2012 年,Bernard 首次证明了 Bi_2Te_3 拓扑绝缘体具有光学饱和吸收特性^[22]。目前来说,体块的单晶材料,比如 Bi_2Te_3 、 Bi_2Se_3 、 Sb_2Te_3 都被证实在体块时拥有很小的带隙,在边缘和表面具有无带隙金属态。拓扑绝缘体同时具有很宽的工作波长带宽,并且拓扑

绝缘体拥有很大的三阶非线性系数。

2.3 过渡金属硫化物

过渡金属硫化物一般化学式为 MX_2 ($M=Mo, W$; $X=S, Se, Te$)。层状硫化物的晶格结构是两层硫族原子中间夹杂着一层金属原子。

MoS_2 是过渡金属硫化物中被研究比较多的一种材料^[12,23-24], 体块 MoS_2 拥有间接带隙, MoS_2 的带隙宽度会随着层数减小而增大, 体块 MoS_2 的带隙宽度为 1.29 eV, 当层数减小到单层时, MoS_2 变为直接带隙, 带隙宽度增大到 1.90 eV。

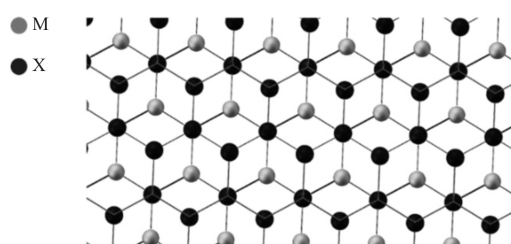


图 4 过渡金属硫化物结构示意图

Fig.4 Structure of transition-metal dichalcogenides

过渡金属硫化物的可饱和吸收特性可以应用于脉冲激光器,除了可饱和吸收特性以外,层状的过渡金属硫化物也具有较强的表面二阶非线性效应。

2.4 黑磷

2014 年,单层黑磷被发现^[25],是继石墨烯之后的又一种单原子二维材料。

层状的黑磷材料结构和石墨类似,层内是通过共价键结合,每个磷原子和邻近的三个磷原子通过共价键连接,层与层之间是通过范德瓦尔斯力连接,最终形成了有褶皱的蜂窝状的结构。

块状黑磷的带隙为 0.3 eV,随着层数减小,黑磷的带隙会增加,单层黑磷纳米片的带隙为 2 eV 左右。单层黑磷的直接带隙和高的电子迁移率使得黑磷适合被用作光电材料。黑磷的宽带可饱和吸收特性使得少层黑磷适合用于产生脉冲激光。

3 二维材料与光纤的集成方式

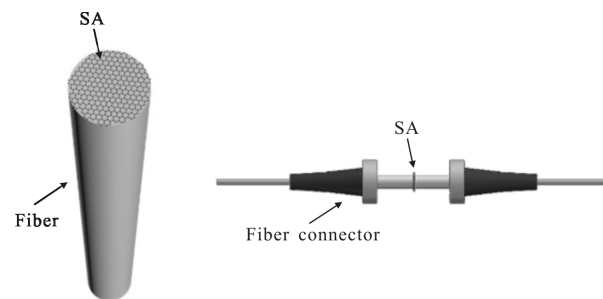
二维材料种类繁多,不同材料具有各自独特的光电特性,更重要的是二维材料本身机械强度较高、柔韧性好,可以方便与零维、一维、二维和三维材料结合,复合材料结构可能会得到新的光物理特性和新的功能器件。因此,对于光纤激光器的研究者来

说,将二维材料与光纤结合,取二维材料之长,补光纤之短,成为近几年的研究热点。二维材料和光纤的集成方式能够简单地分成三类——端面、侧面、立体。不同的集成方式需要使用不同的工艺技术,不同的集成方式也具有不同的器件特性。

3.1 端面集成

由于二维材料轻薄的特性,并且光纤种类繁多,可以进行各种加工,所以二维材料非常适合与光纤系统集成,将二维材料转移到端面的操作比较简单,并且二维材料很容易在端面上铺平。因为二维材料比较薄,所以光的透过率比较高,插损也比较小。但是因为二维材料较薄,所以当二维材料集成在端面时,与光场的作用距离比较短,从而由二维材料引起的效应会比较微弱。

二维材料可以集成在切平的光纤端面上,也可以集成在光纤跳线头上,如图 5 所示,可以根据二维材料的特性,以及实验的要求进行转移。其集成方法大同小异,如果是一整块的二维材料,可以将其漂浮在水面,直接用光纤头直接蘸粘。如果是粉状二维材料,则可将溶液滴到光纤头再加热处理。本课题组将 MoS_2 转移到跳线端面上,调制深度能够达到 29% 左右^[26]。



(a) 光纤端面集成二维材料 (b) 跳线端面集成二维材料
(a) Fiber tip integration (b) Fiber connector tip integration

图 5 端面集成方式示意图

Fig.5 Schematic of tip integration

3.2 侧面集成

二维材料与光纤侧面集成,主要分为两种方式,一种是二维材料和 D 型光纤侧面集成^[27-30],另一种是二维材料和微光纤侧面集成^[12,31-33]。利用 D 型光纤或者微光纤的倏逝场和二维材料相互作用,见图 6。

二维材料和光纤侧面集成可以大大增加二维材料和光的作用距离,但是当二维材料和侧面结合时容易引入比较大的插损。微光纤与二维材料结合时,

当微光纤腰区直径越细,其表面倏逝场越大,与二维材料的结合就越强,但是微光纤腰区直径越细,在与二维材料结合时的插损也会增加,所以需要选取好的扫火拉伸参数,选取最合适的微光纤直径与二维材料结合。

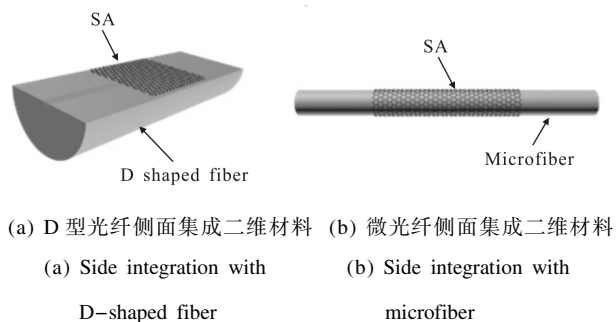


图 6 侧面集成方式示意图

Fig.6 Schematic of side integration

3.3 立体集成

立体集成是一种集成化更高的方法,但是立体集成器件难度较高并且插损比较大,所以立体集成器件的尝试不是很多。笔者所在课题组能够制备微光纤螺旋环-石墨烯器件^[34-46],将微光纤绕多圈在 PMMA 棒上,PMMA 棒上已经预先包裹了二维材料,结构如图 7 所示。先将光纤拉细,然后对 PMMA 棒进行预处理,首先在 PMMA 棒上覆盖上一层特氟龙,再在特氟龙上转移一层二维材料。然后将微光纤拉制的区域绕在预先处理过的 PMMA 棒上。由于弱耦合的作用,光场会耦合到相邻的微光纤中进行干涉谐振,如图 7 所示,在这个结构中,光有两个传播的方向,一个是沿着光纤传播,另一个方向是在微光纤之间传播^[45]。光在腔内谐振,并且微光纤有倏逝场,所以光场和二维材料的作用距离会大大增加。

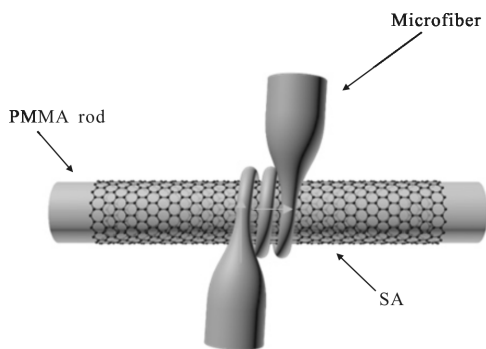


图 7 立体集成方式示意图

Fig.7 Schematic of three-dimensional integration

在这个结构中,微光纤的直径需要控制,因为微光纤的直径会直接影响整个结构的损耗和耦合强度;另外,两环之间的距离也需要控制,两环之间距离过大会造成耦合太弱甚至没有耦合。

测试微光纤螺旋环-石墨烯器件的饱和吸收曲线,采用平衡双探头测试方法(图 2)。饱和吸收如图 8 所示,这个饱和吸收器件由于使用了比较粗的微光纤,调制深度在 2%左右^[35],通过优化光纤直径和二维材料表面质量,可以大幅度提高。

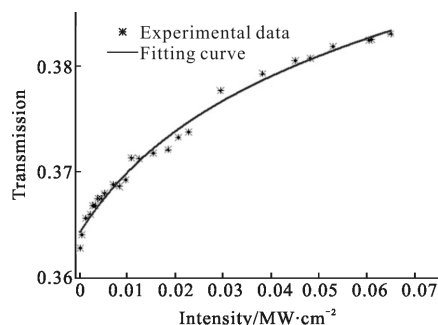


图 8 微光纤螺旋环-石墨烯器件饱和吸收谱^[35]

Fig.8 Nonlinear absorption of this device^[35]

4 集成器件在激光器中的应用

上一节介绍的二维材料-光纤集成器件可以应用于激光腔内,利用二维材料的饱和吸收特性可以产生脉冲激光,另外由于不同的集成器件具有不同特性,比如偏振特性等,应用于激光腔内时可以起到调节的作用效果,以下从三种集成方式的器件出发讨论基于各种器件的脉冲激光器及其输出特性。

4.1 基于端面集成器件的脉冲激光器

端面集成是比较容易实现的一种方式,所以许多研究组进行了大量的尝试。根据不同的二维材料进行区分有石墨烯^[7,47-58]、拓扑绝缘体^[59-66]、过渡金属硫化物^[9,27,67-73]、黑磷^[74-78]。

本课题组对二维材料光纤端面集成进行了一些尝试^[26],利用激光环形腔结构,将少层液相剥离的 MoS₂ 集成在跳线端面作为饱和吸收器件,饱和吸收器件制备方式如图 9 所示。

首先将 1 g 体块 MoS₂ 晶体加入到 50 mL 反应釜中,反应釜中加入 10 mL 正丁基锂的正己烷溶液。在 100 °C 下持续加热反应釜 4 h,把加热后的溶液转移到 50 mL 的三颈瓶中,在 25 °C 和氮气氛围下磁力搅

拌 48 h。将收集得到的掺锂的二硫化钼粉末通过正己烷漂洗去除多余的正丁基锂,把粉末加入到600 mL的去离子水中然后超声 4h 得到 MoS₂ 薄片。然后进行 15 min 的离心,最后通过去离子水漂洗 3~5 次,将上清液分散到 500 mL 去离子水中最后超声得到 MoS₂ 纳米片溶液,然后将 MoS₂ 纳米片溶液滴到光纤跳线端面,加热成膜。

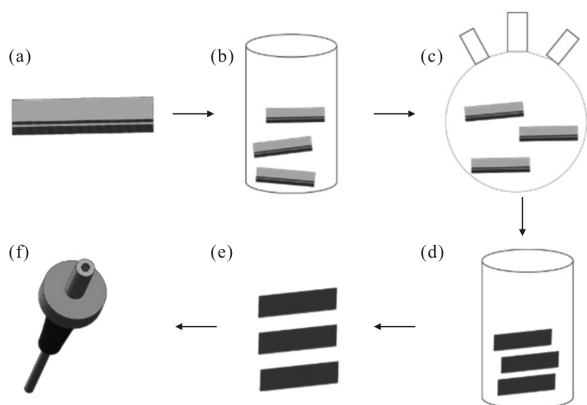


图 9 MoS₂ 饱和吸收器件制备流程

Fig.9 Fabrication of MoS₂ SA

通过平衡双探头测量法得到该器件的调制深度在 29%。激光器光路如图 10 所示,采用 980 nm 激光光源泵浦,通过 980/1 550 nm 波分复用器接入环路,采用掺铒光纤(EDF)长度为 7.5 m,随后再连接二硫化钼饱和吸收体,饱和吸收体与一个偏振控制器连接用来调节环路偏振状态,通过一个光隔离器,最后接入一个自制的微光纤耦合器,耦合器的腰区直径大约在 10 μm,为了避免出现激光多波长输出的情况,耦合器的自由光谱程(FSR)要大于增益带宽的宽度,1 550 nm 处的有效分光比例为 2.5:1,将分光比较高的一个输出端接入环形腔,分光比较低的一个输出端作为激光输出端。

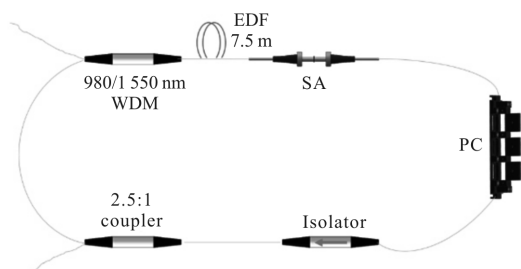


图 10 MoS₂ 调 Q 激光器光路图

Fig.10 Light path of Q-Switch fiber laser based on MoS₂

利用 980 nm 激光器泵浦,当泵浦光功率达到 60 mW 时,得到了如下的调 Q 脉冲,如图 11 所示,通过光电探测器接入示波器得到稳定的时间脉冲序列,通过频谱仪测量得到峰-谷的对比度大于 40 dB。

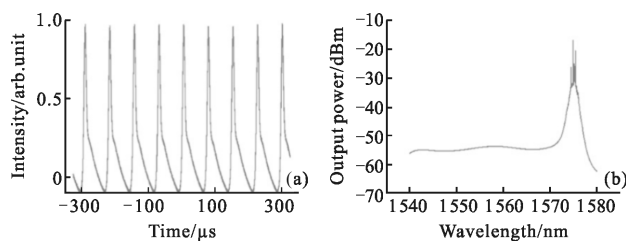


图 11 MoS₂ 调 Q 激光器输出性能图^[26]

Fig.11 Output property of Q-switch laser based on MoS₂^[26]

4.2 基于侧面集成器件的脉冲激光器

二维材料与光纤侧面集成主要利用的是 D 型光纤和微光纤的倏逝场和二维材料作用从而提高饱和和吸收调制深度。侧面集成的器件光场和二维材料的作用距离长,相对端面集成而言侧面集成器件散热性更好,容易得到高功率脉冲输出,并且通过特定的方法可以达到大规模生产的要求。

许多课题组都对侧面集成器件脉冲激光器进行了尝试,根据所采用的二维材料的不同主要分为石墨烯^[28-29]、过渡金属硫化物^[12,27,31,79]、黑磷^[80-81]、拓扑绝缘体^[30,32-33,82-83]。

韩国亚洲大学的 Lee 等利用 D 型光纤侧面和石墨烯集成器件作为锁模器件加入到激光腔中,得到了脉宽为 423 fs,重复频率为 30.9 MHz,中心波长在 1 609 nm,平均功率为 3.1 mW 的锁模脉冲输出^[29]。

华南师范大学的罗志超等人利用黑磷和微光纤倏逝场相互作用制备了锁模器件,得到了脉宽为 940 fs,重复频率为 4.96 MHz,中心波长在 1 566.5 nm,平均功率为 5.6 mW 的锁模脉冲输出^[80]。

4.3 基于立体集成器件的脉冲激光器

立体集成可以大大提升二维材料和光场的作用距离,但是立体集成器件存在着插损较大,制备工艺难度高的缺点。笔者所在课题组对立体集成器件应用于脉冲光纤激光器进行了尝试。

利用第三节提到的微光纤螺旋环-石墨烯器件作为饱和吸收器件接入激光环形腔^[35],980 nm 激光器泵浦通过 980/1 550 nm 波分复用器接入环形腔,采用 7 m EDF 作为增益介质,后通过隔离器,微光纤

螺旋环-石墨烯器件位于两个偏振控制器中间,偏振控制器后加入 220 m 的单模光纤后通过 9:1 的光纤耦合器,分光比较低的一端作为激光输出端。

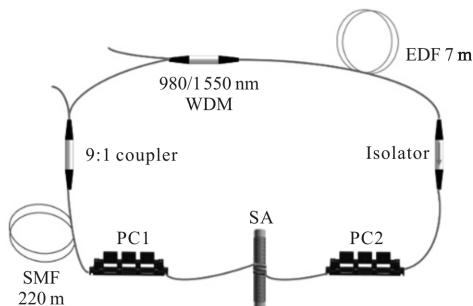
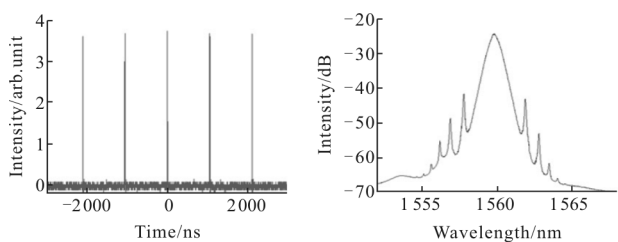


图 12 立体集成激光器光路

Fig.12 Fiber laser based on three-dimensional equipment

三维结构的微光纤螺旋环-石墨烯器件是具有偏振特性的饱和吸收器件。当泵浦光功率为 72 mW 时,通过调节偏振控制器可以得到调 Q 脉冲,脉冲的重复频率是 4.8 kHz,脉冲宽度为 40 μs,此时获得的调 Q 激光的激光输出是双波长输出,中心波长分别为 1 542.1 nm 和 1 559.5 nm,如图 13(e)~(f)所示。保持泵浦光的功率不变,继续调节偏振控制器可以得到锁模脉冲,锁模脉冲的重复频率为 940 kHz,锁模脉冲激光的中心波长是 1 559.5 nm,从频谱图来看,激光的信噪比大于 50 dB,放大时域图可以得到

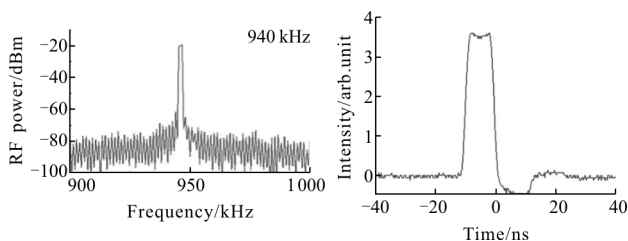


(a) 时域光脉冲序列图

(b) 光谱图

(a) Time domain pulse train

(b) Optical spectrum

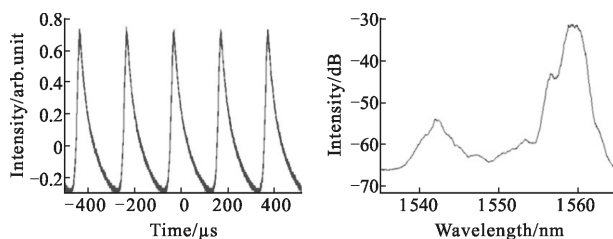


(c) 频谱图

(d) 时域脉冲形状图

(c) Frequency spectrum

(d) Time domain pulse shape



(e) 调 Q 时域光脉冲序列图

(f) 调 Q 光谱图

(e) Time domain Q-switch pulse train (f) Q-switch optical spectrum

图 13 基于立体集成器件激光器输出性能图^[35]

Fig.13 Output property of laser based on 3D device^[35]

脉冲的形状是矩形波,脉宽约为 8.5 ns,如图 13(a)~(d)所示。课题组利用微光纤螺旋环-石墨烯器件器件,通过改变偏振控制器获得了调 Q 激光和锁模激光输出状态的切换。

5 基于二维材料光纤集成器件激光器的外场调控

目前不管是工业还是科研对于状态可切换、性能可调谐的激光器需求都非常大,所以国内外的研究者对激光器的外场调控做了很多的研究。

石墨烯材料作为二维材料中非常重要的一种,光电特性可以通过外场环境调控,石墨烯的费米狄拉克分布可以表示为:

$$f_d(E) = \frac{1}{e^{(E-E_f)/k_B T} + 1} \quad (7)$$

式中: E_f 为费米能级; k_B 代表了玻耳兹曼常数; T 为电子的温度。

带间吸收常数 α_{inter} 可以表示为:

$$\alpha_{inter} = \frac{\int_{-\pi/\omega}^{+\pi/\omega} J_{inter}(t) \cdot E(t) dt}{(2\pi/\omega) I_0} \quad (8)$$

式中: $J_{inter}(t)$ 为带间电流密度,根据公式(8)可知带间吸收会随着费米能级和温度的变化而变化,所以可以通过调控石墨烯的费米能级和温度调控石墨烯的可饱和和吸收特性。

韩国亚洲大学的 Lee 等利用 D 型光纤侧面集成二维材料的器件^[29],在器件上加上了金属电极和离子液体,并把这个侧面集成器件加入到了激光环形腔中。当外界施加 -1.05 V 的门电压时得到脉宽为 423 fs,重频为 30.9 MHz 的锁模脉冲,增加门电压,光透过率减小同时调制深度增加,当门电压为 -0.18 V

时,激光输出切换为调 Q 脉冲,脉宽为 3.5 μs ,重频为 25.4 kHz。通过改变外加电压调节石墨烯费米能级实现了激光输出状态的切换。

笔者课题组也进行了尝试^[84]:如图 14 所示,在光纤端面制备两个电极,然后在电极上覆盖一层石墨烯,可以将两个电极通入电流,电流经过石墨烯薄膜会产生欧姆热,从而增加石墨烯的温度,研究表明石墨烯温度的改变可以有效调谐其饱和吸收特性。值得一提的是,由于光纤端面空间局域效应,石墨烯薄膜可以作为高效的电加热器。

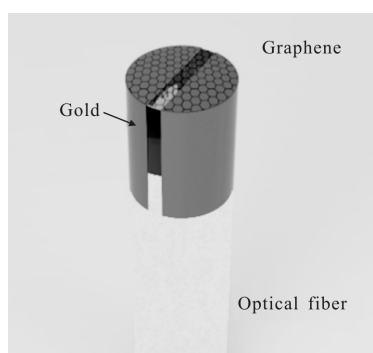


图 14 光纤端面石墨烯金属集成器件

Fig.14 Schematic of graphene-gold-fiber facet integration

激光光路同样采用了环形腔结构,通过 980/1 550 nm 的波分复用器引入 980 nm 的泵浦激光,利用了 1.2 m 高掺杂的 EDF,通过光隔离器和偏振控制器后与光纤端面器件连接,饱和吸收器件通过两个电极和电流源连接,最后通过 9:1 的光纤耦合器实现激光输出。

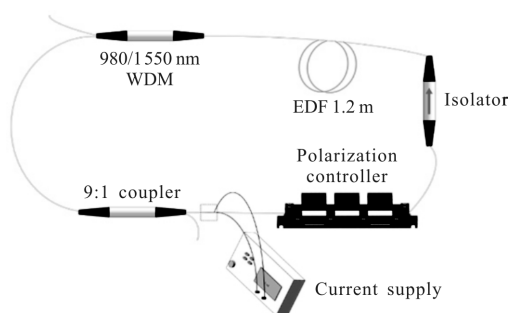
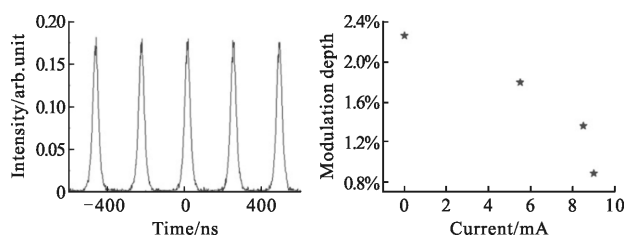


图 15 端面集成器件激光器

Fig.15 Fiber laser based on fiber integrated device

制备的二维材料光纤集成器件接入到环形腔中的整个插损是 14.6%,当外加电流为 0 时,二维材料光纤集成器件的调制深度是 2.3%,随着外加电流的

增加,器件相应的调制深度也下降,当电流增加到 9 mA 时,调制深度下降到 0.9%。器件调制深度和外加电流的关系都反应在图 16(b)中。当不施加外加电流,通过 980 nm 激光泵浦时,这个结构的激光环形腔在二维材料光纤端面集成器件的可饱和吸收作用下可以得到锁模激光的输出,图 16(a)就是得到的稳定的时域脉冲序列信号。图 16(c)是得到的脉冲激光的光谱图,激光的中心波长在 1 570 nm 左右,激光光谱的半高全宽是 0.61 nm。频谱图如图 16(d)所示,中心频率为 4.2 MHz,信噪比大于 75 dB。增加外加电流可以发现锁模脉冲越来越不稳定,直到将外加电流加到 9 mA,时域图已经完全看不到脉冲序列,也就是激光输出不再是锁模脉冲了。图 17 的外加电流分别是 6、8、9 mA。所以通过这样一种外加电流调制的方法,可以得到一个输出状态可切换的锁模脉冲激光器。

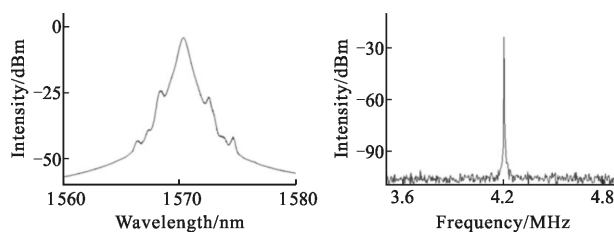


(a) 时域光脉冲序列图

(b) 调制深度-电流关系

(a) Time domain pulse train

(b) Relation between modulation depth and electric current



(c) 光谱图

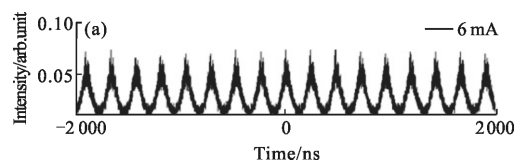
(d) 频谱图

(c) Optical spectrum

(d) Frequency spectrum

图 16 基于光纤石墨烯端面集成激光器输出性能图^[84]

Fig.16 Output property of laser based on graphene integrated fiber device^[84]



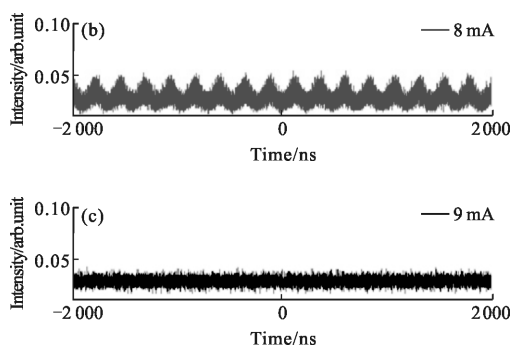


图 17 基于光纤石墨烯端面集成激光器输出性能图^[24]

Fig.17 Output property of laser based on graphene integrated fiber device^[24]

以上工作是对二维材料集成器件的调控，实际上，也可以对激光腔中的其他器件进行外场调控。笔者课题组对 MoS₂ 端面集成的调 Q 激光器进行了应力的外场调节并通过电机的位移给耦合器施加应力，耦合器的光谱会发生变化，耦合器可以作为激光腔的可调谐滤波器使用。当施加应力时，耦合器的光谱会发生蓝移，相应的激光的输出光谱就会发生蓝移，如图 18 所示。耦合器的应变范围从 0%~3.8% 时调 Q 激光能够保持稳定的输出，激光的输出波长从 1 575 nm 蓝移到 1 550 nm，激光的输出波长的应变灵敏度约为 5.5 nm/1%应变。通过外场应力调节得到了波长可调控的调 Q 脉冲激光输出。

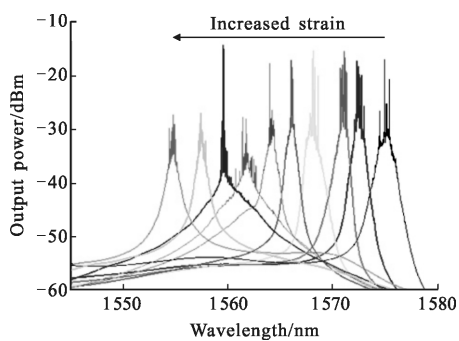


图 18 调 Q 激光器波长-应力变化图^[25]

Fig.18 Wavelength-strain shift of Q-switch laser^[25]

6 结 论

文中主要描述了基于二维材料光纤集成器件的脉冲激光器，二维材料轻薄的特性使得二维材料易与光纤系统集成，集成的方式多种多样。二维材料的可饱和吸收特性，外场可调控性能使得二维材料可

以用于光纤脉冲激光的产生和输出状态调控。但是二维材料也存在着可重复性、稳定性差等问题，并且二维材料在脉冲光纤激光器中的外场调控研究进行得并不多。所以二维材料在脉冲光纤激光器中的应用仍然具备很大的研究前景和很大的提升空间。

参考文献：

- [1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited] [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.
- [2] Takubo Y, Yamashita S. High-speed dispersion-tuned wavelength-swept fiber laser using a reflective SOA and a chirped FBG [J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 5130-5139.
- [3] Sumiyoshi T, Sekita H, Arai T, et al. High-power continuous-wave 3- and 2- μm cascade Ho³⁺: ZBLAN fiber laser and its medical applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, 5(4): 936-943.
- [4] Han Y G, Lee S B. Flexibly tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser based on four-wave mixing effect in dispersion-shifted fibers[J]. *Optics Express*, 2005, 13(25): 10134-10139.
- [5] Hajireza P, Forbrich A, Zemp R. In-vivo functional optical-resolution photoacoustic microscopy with stimulated Raman scattering fiber-laser source [J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(2): 539.
- [6] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666.
- [7] Bao Q, Han Z, Yu W, et al. Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers [J]. *Advanced Functional Materials*, 2009, 19(19): 3077-3083.
- [8] Garmire E. Resonant optical nonlinearities in semiconductors [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 6(6): 1094-1110.
- [9] Zhang H, Lu S B, Zheng J, et al. Molybdenum disulfide (MoS₂) as a broadband saturable absorber for ultra-fast photonics [J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7249-7260.
- [10] Ijaz S, Mahendru A, Sanderson D. Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 26(4): 760-769.
- [11] Boggess T, Bohnert K, Mansour K, et al. Simultaneous measurement of the two-photon coefficient and free-carrier cross section above the bandgap of crystalline silicon [J].

- IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, 22(2): 360–368.
- [12] Du J, Wang Q, Jiang G, et al. Ytterbium-doped fiber laser passively mode locked by few-layer Molybdenum Disulfide (MoS_2) saturable absorber functioned with evanescent field interaction [J]. *Sci Rep*, 2014, 4(4): 6346.
- [13] Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene [J]. *Nature Materials*, 2007, 6(3): 183.
- [14] Lee C, Wei X, Kysar J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene [J]. *Science*, 2008, 321(5887): 385–388.
- [15] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene [J]. *Nature*, 2005, 438(7065): 197.
- [16] Stankovich S, Dikin D A, Piner R D, et al. Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide [J]. *Carbon*, 2007, 45(7): 1558–1565.
- [17] Zhang Y, Tan Y W, Stormer H L, et al. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene [J]. *Nature*, 2005, 438(7065): 201–204.
- [18] Fu L, Kane C L, Mele E J. Topological insulators in three dimensions [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98 (10): 106803.
- [19] Qi X L, Zhang S C. Topological insulators and superconductors [J]. *Review of Modern Physics*, 2010, 83(4): 175–179.
- [20] Yi C, Jg A, Jh C, et al. Experimental realization of a three-dimensional topological insulator, Bi_2Te_3 [J]. *Science*, 2009, 325(5937): 178.
- [21] Zhang H, Liu C X, Qi X L, et al. Topological insulators in Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 with a single Dirac cone on the surface [J]. *Nature Physics*, 2009, 5(6): 438–442.
- [22] Bernard F, Zhang H, Gorza S P, et al. Towards mode-locked fiber laser using topological insulators [C]//Proceedings of The Nonlinear Photonics, F, 2012.
- [23] Yin Z, Li H, Li H, et al. Single-layer MoS_2 phototransistors [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(1): 74–80.
- [24] Wang K, Wang J, Fan J, et al. Ultrafast saturable absorption of two-dimensional MoS_2 nanosheets [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(10): 9260.
- [25] Li L, Yu Y, Ye G J, et al. Black phosphorus field-effect transistors [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(5): 372.
- [26] Chen J H, Deng G Q, Yan S C, et al. Microfiber-coupler-assisted control of wavelength tuning for Q-switched fiber laser with few-layer molybdenum disulfide nanoplates [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3576–3579.
- [27] Dong M, Wang Y, Ma C, et al. WS_2 mode-locked ultrafast fiber laser [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(7965): 7965.
- [28] 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): 183.
- [29] Lee E J, Sun Y C, Jeong H, et al. Active control of all-fibre graphene devices with electrical gating [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6851.
- [30] Jung M, Lee J, Koo J, et al. A femtosecond pulse fiber laser at 1935 nm using a bulk-structured Bi_2Te_3 topological insulator [J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7865.
- [31] Liu M, Zheng X W, Qi Y L, et al. Microfiber-based few-layer MoS_2 saturable absorber for 2.5 GHz passively harmonic mode-locked fiber laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 22841–22846.
- [32] Yan P, Lin R, Ruan S, et al. A 2.95 GHz, femtosecond passive harmonic mode-locked fiber laser based on evanescent field interaction with topological insulator film [J]. *Optics Express*, 2015, 23(1): 154–164.
- [33] 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.
- [34] Chen Y, Ming Y, Guo W, et al. Temperature characteristics of microfiber coil resonators embedded in Teflon [C]// Communications and Photonics Conference and Exhibition, 2011 ACP Asia, F, 2012.
- [35] Li C, Chen J H, Yan S C, et al. A fiber laser using graphene-integrated 3-D microfiber coil [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 1–7.
- [36] Xu F, Brambilla G. Demonstration of a refractometric sensor based on optical microfiber coil resonator [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(10): 5742.
- [37] Xu F, Brambilla G. Demonstration of a refractometric sensor based on optical microfiber coil resonator [C]//Lasers and Electro-Optics, 2008 and 2008 Conference on Quantum Electronics and Laser Science CLEO/QELS, 2008.
- [38] Xu F, Brambilla G. Embedding optical microfiber coil resonators in Teflon [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(15): 2164–2166.
- [39] Xu F, Brambilla G. Manufacture of 3-D microfiber coil resonators [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19 (19): 1481–1483.
- [40] Xu F, Brambilla G, Feng J, et al. Mathematical model for manufacturing microfiber coil resonators [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(4): 044001.
- [41] Xu F, Horak P, Brambilla G. Optical microfiber coil

- resonator refractometric sensor [J]. *Optics Express*, 2007, 15(12): 7888.
- [42] Xu F, Horak P, Brambilla G. Optimized design of microcoil resonators [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(6): 1561–1567.
- [43] Xu F, Horak P, Brambilla G. Conical and biconical ultra-high -Q optical-fiber nanowire microcoil resonator [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(4): 570–573.
- [44] Xu F, Horak P, Brambilla G. A simplified way to manufacture high-Q microfiber coil resonators by controlling the input/output coupling [C]//The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, F, 2007.
- [45] Xu F, Wang Q, Zhou J F, et al. Dispersion study of optical nanowire microcoil resonators [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(4): 1102–1106.
- [46] Yan S, Zheng B, Chen J, et al. Optical electrical current sensor utilizing a graphene-microfiber-integrated coil resonator [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 42(5): 57.
- [47] 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.
- [48] Popa D, Sun Z, Hasan T, et al. Graphene Q-switched, tunable fiber laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(7): 435.
- [49] Sun Z, Hasan T, Torrisi F, et al. Graphene mode-locked ultrafast laser [J]. *Acs Nano*, 2010, 4(2): 803–810.
- [50] 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): 51.
- [51] Bao Q, Zhang H, Ni Z, et al. Monolayer graphene as a saturable absorber in a mode-locked laser [J]. *Nano Research*, 2011, 4(3): 297–307.
- [52] Ferrari A C, Popa D, Kelleher E J R, et al. Tm-doped fiber laser mode-locked by graphene-polymer composite [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 25077.
- [53] 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): 831.
- [54] Sobon G, Sotor J, Abramski K M. Passive harmonic mode-locking in Er-doped fiber laser based on graphene saturable absorber with repetition rates scalable to 2.22 GHz [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(16): 3077–3083.
- [55] Sun Z, Popa D, Hasan T, et al. A stable, wideband tunable, near transform-limited, graphene-mode-locked, ultrafast laser [J]. *Nano Research*, 2010, 3(9): 653–660.
- [56] 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): 51.
- [57] Zhang H, Tang D Y, Zhao L M, et al. Large energy mode locking of an erbium-doped fiber laser with atomic layer graphene [J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 17630–17635.
- [58] Zhao L M, Tang D Y, Zhang H, et al. Dissipative soliton operation of an ytterbium-doped fiber laser mode locked with atomic multilayer graphene [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3622–3624.
- [59] Chen Y, Zhao C, Chen S, et al. Large energy, wavelength widely tunable, topological insulator Q-switched erbium-doped fiber laser [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 315–322.
- [60] Lin Y H, Yang C Y, Lin S F, et al. Soliton compression of the erbium-doped fiber laser weakly started mode-locking by nanoscale p-type Bi₂Te₃ topological insulator particles [J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(5): 055107.
- [61] Luo A P, Zhao C J, Zhang H, et al. Femtosecond pulse generation from a topological insulator mode-locked fiber laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6868–6873.
- [62] Luo Z, Huang Y, Weng J, et al. 1.06 μm Q-switched ytterbium-doped fiber laser using few-layer topological insulator Bi₂Se₃ as a saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29516–29522.
- [63] Sotor J, Sobon G, Macherzynski W, et al. Harmonically mode-locked Er-doped fiber laser based on a Sb₂Te₃ topological insulator saturable absorber [J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(5): 055102.
- [64] Yu Z, Song Y, Tian J, et al. High-repetition-rate Q-switched fiber laser with high quality topological insulator Bi₂Se₃ film [J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11508.
- [65] 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): 118.
- [66] Zhao C, Zou Y, Chen Y, et al. Wavelength-tunable picosecond soliton fiber laser with Topological Insulator: Bi₂Se₃ as a mode locker [J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27888–27895.
- [67] Chen B, Zhang X, Wu K, et al. Q-switched fiber laser based on transition metal dichalcogenides MoS₂, MoSe₂, WS₂, and WSe₂ [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26723–26737.
- [68] Lan C, Li C, Xia H, et al. Ultrafast erbium-doped fiber laser mode-locked by a CVD-grown molybdenum disulfide

- (MoS₂) saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2014, 22(14): 17341–17348.
- [69] Zhang M, Howe R C, Woodward R I, et al. Solution processed MoS₂-PVA composite for sub-bandgap mode-locking of a wideband tunable ultrafast Er: fiber laser [J]. *Nano Research*, 2015, 8(5): 1522–1534.
- [70] Woodward R I, Kelleher E J, Hower R C, et al. Tunable Q-switched fiber laser based on saturable edge-state absorption in few-layer molybdenum disulfide (MoS₂) [J]. *Optics Express*, 2014, 22(25): 31113–31122.
- [71] Liu H, Luo A P, Wang F Z, et al. Femtosecond pulse erbium-doped fiber laser by a few-layer MoS₂ saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4591–4594.
- [72] Huang Y, Luo Z, Li Y, et al. Widely-tunable, passively Q-switched erbium-doped fiber laser with few-layer MoS₂ saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25258–25266.
- [73] Luo Z, Wu D, Xu B, et al. Two-dimensional material-based saturable absorbers: towards compact visible-wavelength all-fiber pulsed lasers [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(2): 1066.
- [74] 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.
- [75] Mu H, Lin S, Wang Z, et al. Pulsed lasers: black phosphorus-polymer composites for pulsed lasers (advanced optical materials 10/2015) [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(10): 1447–1453.
- [76] 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.
- [77] Sotor J, Sobon G, Macherzynski W, et al. Black phosphorus saturable absorber for ultrashort pulse generation [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(5): 440–449.
- [78] Yu H, Zheng X, Yin K, et al. Nanosecond passively Q-switched thulium/holmium-doped fiber laser based on black phosphorus nanoplatelets [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(2): 603.
- [79] Yeom D I, Jeong H, Oh K, et al. Mode-locking of Er-doped fiber laser using a multilayer MoS₂ thin film as a saturable absorber in both anomalous and normal dispersion regimes [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 23732–23742.
- [80] 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.
- [81] Park K, Lee J, Lee Y T, et al. Black phosphorus saturable absorber for ultrafast mode-locked pulse laser via evanescent field interaction [J]. *Annalen Der Physik*, 2015, 527(11–12): 770–776.
- [82] Sotor J, Sobon G, Abramski K M. Sub-130 fs mode-locked Er-doped fiber laser based on topological insulator [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13244.
- [83] Sotor J, Sobon G, Grodecki K, et al. Mode-locked erbium-doped fiber laser based on evanescent field interaction with Sb₂Te₃ topological insulator [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(25): 3077–3083.
- [84] Li C, Chen J H, Wang W S, et al. Manipulation of nonlinear optical properties of graphene bonded fiber devices by thermally engineering fermi-dirac distribution [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(21): 10.1002/adom.201700630.