

文章编号 2095-1531(2018)01-0018-13

# 新型二维材料在固体激光器中的应用研究进展

公爽, 田金荣\*, 李克轩, 郭于鹤洋, 许昌兴, 宋晏蓉  
(北京工业大学应用数理学院, 北京 100124)

**摘要:** 本文主要介绍了二维可饱和吸收体材料在固体激光器中的应用与研究进展。简要介绍了新型二维材料的性质和优点。以石墨烯、拓扑绝缘体、过渡金属硫化物和黑磷等新型二维材料为例分析了它们在固体激光器中实现调Q或锁模的过程,展示了二维材料在脉冲固体激光研究中的重要应用前景。二维材料与固体激光器的结合,可进一步推进二维材料的研究,有望开发出大量新型固体激光器件并且作为基础光源应用于多个领域,推动相关领域的发展。

**关键词:** 二维材料; 固体激光器; 可饱和吸收体; 脉冲激光

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20181101.0018

## Advances in new two-dimensional materials and its application in solid-state lasers

GONG Shuang, TIAN Jin-rong\*, LI Ke-xuan, GUOYU He-yang, XU Chang-xing, SONG Yan-rong  
(College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

\* Corresponding author, E-mail: jrtian@bjut.edu.cn

**Abstract:** The applications and advances of new two-dimensional materials as saturable absorbers in solid-state lasers are introduced in this paper. The characteristics and advantages of two-dimensional materials are briefly summarized. Taking the new two-dimensional materials such as graphene, topological insulator, transition metal dichalcogenides and black phosphorus as examples, the Q-switched and mode-locked processes in solid-state lasers are analyzed, which reveals the promising future of new-type two-dimensional materials for the applications in the research of pulsed solid-state lasers. The combination of solid-state lasers and two-dimensional materials can further improve the research of two-dimensional materials and is expected to develop a large number of new solid-state lasers and used as a base light source in many areas to promote the developments of related fields.

**Key words:** two-dimensional materials; solid-state lasers; saturable absorbers; pulsed laser

收稿日期: 2017-09-05; 修订日期: 2017-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 61575011); 北京工业大学基础研究基金项目(No. X3006111201501)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61575011); Basic Research Foundation of Beijing University of Technology(No. X3006111201501)

## 1 引言

脉冲激光因具有脉冲宽度窄、光谱范围宽、峰值功率高和脉冲能量大等优点,使其在工业材料加工、光通信、生物医学、激光雷达、激光点火、非线性光学等领域有着广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。例如,在工业加工领域,脉冲激光与材料作用时间极短,材料不易产生热畸变,可大幅度提高加工精度。产生脉冲激光的主要技术手段是调 $Q$ 或锁模。其中被动调 $Q$ 或锁模因为操作简单,成本较低,得到了普遍应用<sup>[5]</sup>。被动调 $Q$ 或锁模的实现需要可饱和吸收体,其基本特点是随光强的增加,光的损耗反而下降,因此可以实现激光的脉冲输出。对可饱和吸收体的探索是激光物理及激光技术的重要研究内容,并且实用的可饱和吸收体已经广泛应用于各种类型的激光器。传统的光学可饱和吸收体包括有机染料(Organic dyes)<sup>[6]</sup>、彩色滤光片(Color filter glasses)<sup>[7]</sup>、掺杂离子晶体(Ion-doped crystals)<sup>[8]</sup>、半导体可饱和吸收镜(Semiconductor saturable absorber, SESAM)<sup>[9]</sup>等。其中有机染料、掺杂离子晶体由于固有缺陷,应用已经较少。而 SESAM 工作稳定,损耗小,已实现商业化生产,并在固体激光器及光纤激光器中广泛使用。但是 SESAM 的设计并不容易,其生长工艺依赖于分子束外延或金属有机气相外延技术,成本较高、制备工艺复杂,调制深度和恢复时间不易控制,并且单片 SESAM 的调谐波长有限,不能满足宽波段调谐的要求,从而限制了它的应用。

碳纳米管是 SESAM 之后最早应用的新型可饱和吸收材料。2003 年日本的 S. Y. Set 等人<sup>[10]</sup>首次以碳纳米管为可饱和吸收材料成功实现掺铒光纤激光器锁模运转。此后单壁碳纳米管(Single-walled carbon nanotubes, SWCNT)作为可饱和吸收体已经成功的应用于固体激光器<sup>[10-13]</sup>与光纤激光器<sup>[14]</sup>。SWCNT 的优点是响应时间短( $<800$  fs),工作波段宽(300 ~ 2 300 nm),偏振不敏感。缺点是其带宽由单壁碳纳米管径限制,其宽带可饱和吸收特性依靠混合不同的管径的单壁碳纳米管,管状结构不易吸附成膜,且单壁碳纳

米管之间的强范德华力造成相当大的散射损耗<sup>[12]</sup>。

理想的可饱和吸收体应具备以下优点:工作波段宽、损伤阈值高、恢复时间快、制备工艺简单、成本低。由于可饱和吸收体的性质对脉冲激光器的性能有重要影响,因此寻找性能优良的新型可饱和吸收体非常重要。

近年来,石墨烯、拓扑绝缘体、过渡金属硫化物、黑磷等新型二维材料因其良好的力学、光学、电学性能引起了研究者极大的兴趣。人们开始尝试将其作为可饱和吸收体应用在激光器中,光纤激光器结构小巧,性能稳定,不易受到外界干扰,但是光纤的芯径有限,强度较高就会损伤可饱和吸收体。而在固体激光器中光斑大小可以自由调节,可以输出较大功率的脉冲激光,对新型可饱和吸收材料也有重要的需求。本文主要介绍了这几种新型二维材料作为可饱和吸收体在固体激光器中的应用。

## 2 石墨烯的性质及其在固体激光中的应用

石墨烯是一种二维碳原子排列成的蜂窝状晶格,有着极低的电阻率和极快的电子迁移率,可以广泛应用在新型电子元器件、光显示等领域。石墨烯的性质和层数有关。当石墨烯排布超过 10 层时,呈现三维材料的特征;排布在 1 ~ 10 层时,呈现二维材料特征。不同层数的石墨烯其态密度有不同的表达式<sup>[15]</sup>。石墨烯与传统的半导体不同,比如 SESAM、砷化镓,石墨烯是一种零带隙材料。石墨烯朗道能级之间的光学跃迁可通过理论计算,并遵循一定的规律,这也决定了可以激发石墨烯的光学波段<sup>[16]</sup>。研究表明,石墨烯还具有超快恢复时间和较低的饱和强度<sup>[17]</sup>。石墨烯的吸收有两个特征弛豫时间,快速响应时间 100 fs,对应于带内直接载流子复合和声子发射时间;慢速响应时间 1 ps,对应于带间电子弛豫和热声子冷却时间<sup>[18]</sup>。石墨烯的光学吸收谱可以覆盖从 500 nm 到 2 000 nm 的波段,这意味着石墨烯作为可饱和吸收体可以用于目前大多数的激光器中。

与 SWCNT 相比,石墨烯具有独特的二维结构,它具有比较低的表面张力,从而可以有比 SWCNT 更高的损伤阈值。此外,石墨烯没有 SWCNT 的缺陷。这些独特的性质及成本低廉、制备方便的优势使石墨烯成为一个理想的饱和吸收体。2009 年,人们第一次利用石墨烯在掺钕光纤激光器中实现锁模,脉冲宽度  $765 \text{ fs}^{[19]}$ 。随后,人们开始关注和研究石墨烯锁模技术,而且在光纤激光器中取得了很多的重要进展,对石墨烯锁模固体激光器的研究也迅速展开。

2010 年 1 月,新加坡南洋理工大学的 W. D. TAN 等人利用石墨烯作为可饱和吸收体,成功在 Nd:YAG 激光器中实现锁模运转<sup>[20]</sup>,证明了石墨烯在固体激光器中作为锁模器件的可能性。图 1 为其实验装置,其中 M1、M2 和 M3 均为凹面反射镜,曲率半径分别为  $100 \text{ mm}$ 、 $300 \text{ mm}$  和  $100 \text{ mm}$ , OC 为输出镜。利用液相剥离法制备石墨烯薄膜,调制深度为  $17.4\%$ ,饱和强度为  $0.87 \text{ MW/cm}^2$ 。输出的锁模脉冲中心波长为  $1064 \text{ nm}$ ,脉冲宽度为  $4 \text{ ps}$ 。

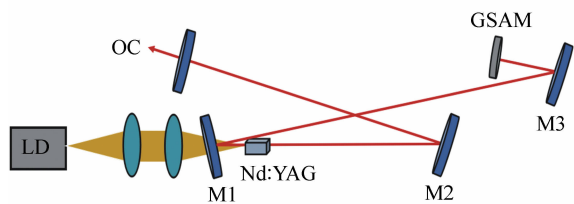


图 1 石墨烯锁模 Nd:YAG 激光器示意图<sup>[20]</sup>

Fig. 1 Schematic of the mode-locked Nd:YAG laser with graphene<sup>[20]</sup>

之后,韩国亚洲大学 Won Bae Cho 等人<sup>[21]</sup>首次用化学气相沉积法制备单层石墨烯薄膜,并用于镁橄榄石(Cr:forsterite)激光器,获得了飞秒脉冲输出。输出脉冲的中心波长在  $1.25 \mu\text{m}$  左右,脉冲宽度为  $94 \text{ fs}$ ,平均输出功率为  $230 \text{ mW}$ ,重复频率为  $75 \text{ MHz}$ 。他们的研究同时表明石墨烯的调制深度和饱和度会随着层数的变化而变化。

在固体激光器中,激光的光束尺寸往往发生变化。对于尺寸较大的激光光束,必须要求石墨烯面积够大,并且具有较高的均匀性才能容纳整个激光光斑,从而对激光进行调制。所以,制备大

尺寸、高质量的石墨烯薄膜是非常大的挑战。虽然在 2008 年,Y. Hernandez 等人<sup>[22]</sup>已经提出了一种液相剥离法可以生产高质量大面积的石墨烯,并且随后其它小组也开始研究用这种方法制造更大尺寸的石墨烯<sup>[23]</sup>。但是这些石墨烯通常都是亚微米和微米级的薄膜,尺寸依然不够大,难以在固体激光器中获得应用。

2011 年 5 月,山东大学 J. L. Xu 等人研究发现,对石墨烯进行预氧化可以减弱层与层之间的范德华力,使得光滑的表面剥落。采用此方法他们制备出尺寸大于  $20 \mu\text{m}$  石墨烯薄层,并将其用于 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器中,成功实现锁模输出。锁模脉冲的脉冲宽度为  $16 \text{ ps}$ ,平均输出功率为  $360 \text{ mW}$ ,最大脉冲能量  $8.4 \text{ nJ}^{[24]}$ 。随后,他们又成功实现 Yb:KGW 激光器的锁模运转,脉冲宽度为  $428 \text{ fs}$ ,波长在  $1031.1 \text{ nm}$ ,输出功率  $504 \text{ mW}$ ,证明了制造低成本高效飞秒激光器的可行性<sup>[25]</sup>。在成功应用于  $1 \mu\text{m}$  波段的锁模激光器中之后,2012 年 6 月,山东大学 J. L. Xu 等人采用类似方法制备了石墨烯薄膜作为可饱和吸收体,并应用于 Nd:GdVO<sub>4</sub> 固体激光器,在  $1.34 \mu\text{m}$  成功实现了调 Q 和锁模运转。调 Q 输出的最短脉宽为  $450 \text{ ns}$ ,输出功率为  $260 \text{ mW}$ ,重复频率为  $43 \text{ kHz}$ ,单脉冲能量为  $2.5 \mu\text{J}$ 。锁模输出的平均功率为  $1.29 \text{ W}$ ,脉冲宽度为  $11 \text{ ps}$ ,单脉冲能量为  $13 \text{ nJ}^{[26]}$ 。

2012 年,韩国亚洲大学的 I. H. Baek 等人通过化学气相沉积(CVD)法制造出高质量的单层石墨烯,调制深度为  $1.8\%$ ,饱和强度为  $66.5 \mu\text{J/cm}^2$ ,非饱和损失小于  $0.9\%$ 。该石墨烯成功用于钛蓝宝石激光器并获得稳定锁模运转,中心波长约为  $800 \text{ nm}$ ,脉冲宽度为  $63 \text{ fs}$ ,输出功率约为  $480 \text{ mW}$ ,重复频率为  $99.4 \text{ MHz}^{[27]}$ 。

2013 年,韩国亚洲大学的 Jun Wan Kim 等人<sup>[28]</sup>首次报道了用石墨烯作为可饱和吸收体的  $1.25 \mu\text{m}$  波段的镁橄榄石(Cr:forsterite)锁模激光器。获得了  $97 \text{ fs}$  的稳定脉冲,输出功率达到  $137 \text{ mW}$ ,重复频率  $75.4 \text{ MHz}$ 。2013 年,山东大学 S. C. Xu 等人也采用 CVD 的方法制备石墨烯,并将其应用于 Nd:YVO<sub>4</sub> 固体激光器,在  $1064 \text{ nm}$  成功实现瓦级连续锁模输出<sup>[29]</sup>。他们同时获得了





波段的应用做了一系列研究。2016 年 5 月,哈尔滨工业大学 W. M. Lin 等人第一次报道单层石墨烯作为可饱和吸收体的 Ho: YVO<sub>4</sub> 调 Q 激光器<sup>[39]</sup>。在泵浦功率 9.3 W 时,最大输出功率 2.2 W。最短脉冲宽度 265.2 ns,重复频率 131.6 kHz,输出波长为 2 052.1 nm。Z. Cui 等人报道了 2 μm 被动调 Q 的 Ho: YAG 激光器<sup>[40]</sup>。该激光器使用多层石墨烯作为可饱和吸收体,当泵浦功率为 4.2 W 时,获得最小脉冲宽度 3.1 μs、重复频率 66.6 kHz 的脉冲激光输出,最大平均输出功率为 170 mW,斜率效率为 12.6%。同年 9 月,韩国电子信息研究所 W. B. Cho 等人将单层石墨烯应用在 Cr: ZnS 激光器中实现了稳定的锁模运转<sup>[41]</sup>。光谱在 2 020 nm 到 2 048 nm 波段可调谐,输出脉冲宽度 220 fs,脉冲能量为 7.8 nJ。

2017 年 1 月,厦门大学 H. Y. Lin 等人报道了氧化石墨烯作为可饱和吸收体的 Nd: YVO<sub>4</sub> 调 Q 激光器<sup>[42]</sup>,输出脉冲宽度为 329 ns,重复频率为 214 kHz,最大输出功率 520 mW,证明了氧化石墨烯的应用带宽可达到 1.3 μm 波段。

2017 年 2 月,土耳其 KOC 大学 Ferda Canbaz 等人将石墨烯作为可饱和吸收体应用在 Cr: LiSAF 激光器中实现锁模运转<sup>[43]</sup>。该激光器结构如图 3 所示。

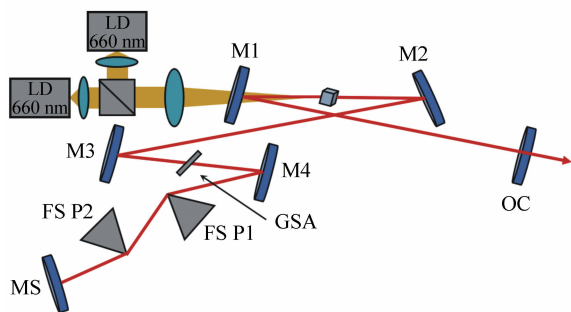


图 3 石墨烯锁模 Cr: LiSAF 激光器<sup>[43]</sup>

Fig. 3 Schematic of the mode-locked Cr: LiSAF laser with graphene<sup>[43]</sup>

其谐振腔采用线性腔, M1、M2、M3 和 M4 为曲率半径为 75 mm 凹面反射镜, GSA 为石墨烯薄膜, OC 为输出镜。输出脉冲宽度为 19 fs, 平均输出功率为 8.5 mW, 重复频率 107 MHz, 对应峰值

脉冲能量 79 pJ, 波长在 836 nm 到 897 nm 可调谐。此激光器是目前石墨烯锁模固体激光器中脉冲宽度最短的激光器。

目前的研究中,制备石墨烯的方法主要有化学气相沉积法、液相剥离法、直接生长法、还原氧化石墨烯法。石墨烯作为可饱和吸收体已经大量的应用于固体激光器。并且通过棱镜对补偿色散,脉冲宽度可以压缩到 30 fs。但因为每层石墨烯的可饱和吸收只有 2.3%,调制深度较低。因此对于新型二维材料作为可饱和吸收体的探索仍在进行。

### 3 拓扑绝缘材料的性质及其在固体激光中的应用

拓扑绝缘体是一种新型的量子物质<sup>[44]</sup>。近来,已经在实验中观察到了量子反常霍尔效应。其体内的能带结构是典型的绝缘体类型,在费米能处存在着能隙,然而在该类材料的表面则总是存在着穿越能隙的狄拉克型的电子态,因而导致其表面总是金属性的。除此之外,它间隙比较狭窄(0.2 ~ 0.3 eV)<sup>[45]</sup>。研究表明,它在近红外波段具有可饱和吸收特性,而且具有较大的调制深度、低的饱和强度和高的三阶非线性系数。拓扑绝缘体包括 Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>、Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 和 Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>。拓扑绝缘体最初是在光纤激光中实现了调 Q 和锁模运转。之后采用三明治或倏逝场方式在多个光纤激光器中实现锁模输出,在固体激光器中也有报道。

2013 年 4 月,湖南大学 P. H. Tang 等人报道了在 1.645 μm 波段利用拓扑绝缘材料 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 实现调 Q 的 Er: YAG 激光器<sup>[46]</sup>。其结构如图 4 所示,谐振腔采用 Z 型腔,其中 LD 为泵浦源; M1 为双色输入镜; M2、M3 均为凹面反射镜,曲率半径分别为 200 mm 和 100 mm; TI 为拓扑绝缘体薄膜; M4 为透过率为 5% 的输出镜。拓扑绝缘材料 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 采用水热剥落法制备,输出功率达到 210 mW,脉冲宽度为 6.31 μs,重复频率为 40.7 kHz,脉冲能量 5.31 μJ。显示了拓扑绝缘体 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 作为可饱和吸收体在固体激光器中的应用潜力。同年,山东大学 H. H. Yu 等人第一次用 Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 实现了 Nd: GdVO<sub>4</sub> 激光器的调 Q 运转,最短

脉冲宽度为 666 ns,最高输出功率为 32 mW<sup>[47]</sup>。

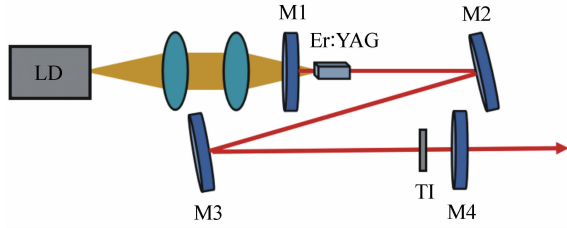


图4 Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>调Q的Er:YAG激光器<sup>[46]</sup>

Fig. 4 Schematic of the Q-switched Er:YAG laser with Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub><sup>[46]</sup>

2014年6月,山东大学B. L. Wang等人以Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>作为可饱和吸收体,在Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>激光器中获得双波长调Q输出<sup>[48]</sup>,为首次得到Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的脉冲输出。该研究表明拓扑绝缘体对波长不敏感,适合作为双波长调Q激光器的调制元件。同年9月,北京工业大学M. T. Hu等人将Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>作为可饱和吸收体应用于Yb:KGW激光器,获得调Q输出<sup>[49]</sup>。输出功率为439.3 mW,重复频率为166.7 kHz,脉宽为16 μs,脉冲能量为2.64 μJ。随后,P. X. Li等人报道了Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>调Q锁模的Nd:YVO<sub>4</sub>激光器<sup>[50]</sup>,在实验中观察到了稳定的调Q现象。当泵浦功率为6.39 W时,得到最大输出功率为247 mW。观察到的稳定的脉冲最短脉冲宽度为2 μs,输出功率183 mW,重复频率达到151.5 kHz。

2015年3月,厦门大学B. Xu等人采用液相剥离法制备Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>薄膜,并以其为可饱和吸收体应用于Nd:LiYF<sub>4</sub>(YLF)激光器,在1.3 μm获得调Q输出<sup>[51]</sup>。最大输出功率为0.2 W,重复频率为161.3 kHz,最短脉冲宽度为433 ns,脉冲能量为1.23 μJ。随后,他们报道了基于Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>的双波长纳秒脉冲Nd:YVO<sub>4</sub>调Q激光器<sup>[52]</sup>,波长分别在1 066.6 nm和1 066.8 nm,重复频率在1~135 kHz可调谐。最大脉冲能量为0.56 μJ,峰值功率为1.87 W,脉宽为250 ns。同年10月,中科院福建物构所J. L. Xu<sup>[53]</sup>等人研究表明,通过机械剥离法制备的Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>层在1 μm和1.3 μm波段的饱和强度很低,只有1.1 W/cm<sup>2</sup>。因此,1 μm波段的Nd:YVO<sub>4</sub>激光器的调Q阈值仅为31 mW。在输出功率26.1 mW时观察到了脉冲

宽度为97 ns的调Q现象。在1.3 μm波段也成功实现了调Q运转,脉冲宽度为93 ns。而且也出现了锁模现象。这个研究说明Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>具有宽带、小型化、低损耗等特性。

2016年8月,我国台湾国立中山大学Y. Y. Lin等人以Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>作为可饱和吸收体,在Nd:YAG激光器中实现调Q输出<sup>[54]</sup>。激光器中心波长在1.06 μm和1.34 μm处都可实现调Q运转。中心波长在1.06 μm处时,脉冲宽度为576 ns,重复频率28.57 kHz。中心波长在1.34 μm处时,脉冲宽度为673 ns,重复频率在75.5 kHz到116.6 kHz之间可调,脉冲能量2.8 μJ,对应峰值功率4.2 W。

拓朴绝缘体的制备方法主要有分子束外延生长法、气体固体液体生长法、机械剥离法、水热剥落法。目前拓朴绝缘体在固体激光器中产生的脉冲宽度已经做到ns量级,但是相比于SESAM等还有很大差距。

#### 4 过渡金属硫化物的性质及其在固体激光中的应用

过渡金属硫化物是另一种新型二维材料,包括二硫化钼(MoS<sub>2</sub>)、二硫化钨(WS<sub>2</sub>),二硒化钼(MoSe<sub>2</sub>)及二硒化钨(WSe<sub>2</sub>)等,对它们的研究正处于起步阶段。层状的过渡金属硫化物晶格结构类似三明治结构,两层硫族原子中间夹杂着一层金属原子层。MoS<sub>2</sub>纳米片的带隙宽度随层数的减小而增加,单层的MoS<sub>2</sub>为直接带隙,宽度约为1.90 eV。WS<sub>2</sub>的结构和性能与其相似,直接带隙禁带宽度约为2.1 eV<sup>[55]</sup>。过渡金属硫化物具有较快的弛豫时间和非线性吸收特性。研究显示其弛豫时间在30 fs的量级<sup>[56]</sup>,并在可见光近红外与中红外有比石墨烯更好的可饱和吸收特性。具有宽带响应特性,有望获得更短的超短脉冲。二硫化钼、二硫化钨这两种材料都已用于固体激光器的调Q或锁模研究。二硒化钼(MoSe<sub>2</sub>)及二硒化钨(WSe<sub>2</sub>)已经成功在光纤激光器中实现调Q,输出脉冲宽度达到μs级<sup>[57]</sup>,但在固体激光器中尚未见报道。

2014年11月,厦门大学B. Xu等人首次报道

了利用  $\text{MoS}_2$  作为可饱和吸收体实现了  $\text{Nd:YAlO}_3$  激光器的调  $Q$  输出<sup>[58]</sup>。实验装置如图 5 所示,其中  $\text{Nd:YAlO}_3$  晶体前端镀膜作为输入镜, OC 为透过率 6.5% 的凹面输出镜, 曲率半径为 1 000 mm。输出脉冲的中心波长在 1 079.5 nm 处, 最大输出功率为 260 mW, 重复频率为 232.5 KHz, 脉冲宽度为 227 ns, 单脉冲能量为 1.11  $\mu\text{J}$ 。他们使用的  $\text{MoS}_2$  纳米层通过液相剥离法制备。

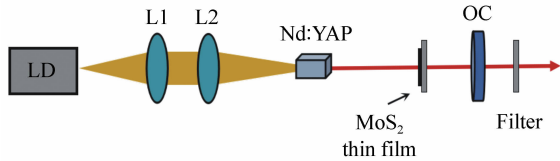


图 5  $\text{MoS}_2$  为可饱和吸收体的  $\text{Nd:YAlO}_3$  调  $Q$  激光器<sup>[58]</sup>

Fig.5 Schematic of  $Q$ -switched  $\text{Nd:YAlO}_3$  laser with  $\text{MoS}_2$  as saturable absorber<sup>[58]</sup>

由于人们发现  $\text{MoS}_2/\text{PVA}$  薄膜在 1 030 nm 左右也呈现出可饱和吸收特性, 自然将其应用于工作在 1 030 nm 左右的激光器中期望获得脉冲输出。2014 年, 北京工业大学 Y. Zhan 等人利用水热法生长的  $\text{MoS}_2$  薄膜成功实现  $\text{Yb:YAG}$  薄片激光器调  $Q$  运转<sup>[59]</sup>。  $\text{MoS}_2$  薄膜的调制深度为 10.7%, 饱和强度 18  $\text{MW}/\text{cm}^2$ 。输出功率可以达到 250 mW, 中心波长 1 030 nm, 脉冲宽度 12  $\mu\text{s}$ , 重复频率 17 kHz, 脉冲能量 15  $\mu\text{J}$ 。调  $Q$  现象出现的阈值在 5.52 W, 重复频率从 8 kHz 到 17 kHz, 脉冲宽度从 30  $\mu\text{s}$  到 12  $\mu\text{s}$ 。

2015 年 3 月, 山东大学 F. Lou 等人将  $\text{MoS}_2$  用于  $\text{Yb:LGGG}$  激光器, 在 1  $\mu\text{m}$  波段的实现调  $Q$  输出<sup>[60]</sup>, 得到了 182 ns 的脉冲。最大输出功率为 0.6 W, 斜效率 24%, 对应单个脉冲能量 1.8  $\mu\text{J}$ 。同时观察到了双波长现象, 波长分别为 1 025.2 nm 和 1 028.1 nm。随后, 以  $\text{MoS}_2$  作为可饱和吸收体, 上海交通大学 L. C. Kong 等人成功实现了  $\text{Tm:CLNGG}$  激光器的调  $Q$  和锁模运转<sup>[61]</sup>。调  $Q$  激光器最大输出功率为 65 mW, 最大脉冲能量 0.72  $\mu\text{J}$ 。在调  $Q$  锁模阶段, 谐波锁模重复频率达到 187 MHz。这个研究说明  $\text{MoS}_2$  在中红外波段也有很大的潜力。中科院上海光机

所 X. Zou 等人采用液相剥离法制备  $\text{MoS}_2$  可饱和吸收体, 应用于  $\text{Tm:LLF}$  固体激光器获得调  $Q$  及锁模输出。在调  $Q$  阶段, 最大输出功率为 583 mW, 脉冲能量为 41.5  $\mu\text{J}$ 。当泵浦功率大约为 7.4 W 时, 观察到被动调  $Q$  锁模现象, 对应的重复频率为 83.3 MHz<sup>[62]</sup>。西安科技大学 T. Lin 报道了一种被动调  $Q$  的  $\text{Nd:YAG}$  激光器<sup>[63]</sup>,  $\text{MoS}_2$  的调制深度为 12.1%, 在中心波长 1 064.24 nm 处重复频率为 20.8 kHz, 脉冲宽度为 2.8  $\mu\text{s}$ 。

2015 年, 中国科学院福建物构 Y. J. Sun 等人通过水热生长法制备  $\text{MoS}_2$  纳米层, 实现了  $\text{Yb:Ca}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$  激光器的调  $Q$  输出<sup>[64]</sup>, 获得的单脉冲能量 0.75  $\mu\text{J}$ , 对应的脉冲宽度和重复频率分别为 420 ns 和 140.4 MHz。输出波长在 1 030.5 nm 到 1 050.4 nm 范围内可调。该研究表明,  $\text{MoS}_2$  在 1  $\mu\text{m}$  波段是一种很有潜力的宽带调  $Q$  器件。之后, 他们对比了  $\text{MoS}_2$  多层纳米层和分层纳米球在固体激光器中的应用<sup>[65]</sup>, 这是第一次报道分层纳米球的可饱和吸收特性。相比于纳米层来说, 由于独特的分层结构, 纳米球显示了更好的可饱和吸收特性, 因此可以产生更短脉宽, 更高能量的脉冲。

2016 年 11 月, 山东大学 K. Wang 等人以液相剥离法制备  $\text{MoS}_2$  薄膜, 并以其为可饱和吸收体应用于  $\text{Nd:LuAG}$  激光器, 在 1.3  $\mu\text{m}$  波段获得了调  $Q$  输出<sup>[66]</sup>。最短脉冲宽度为 188 ns, 重复频率为 73 kHz。

2017 年 1 月, 中科院半导体所 W. F. Zhao 等人采用 CVD 法制备  $\text{MoS}_2$  薄膜, 在  $\text{Nd:YVO}_4$  激光器中实现连续锁模<sup>[67]</sup>。锁模脉冲的脉冲宽度为 800 ps, 重复频率为 79.5 MHz, 脉冲能量 3.7 nJ。

与  $\text{MoS}_2$  相比,  $\text{WS}_2$  纳米层比较难制备。但是随着制备方法的进步, 人们成功研究出制备  $\text{WS}_2$  纳米层的方法。2015 年, 加拿大约克大学 Kassani 等人用  $\text{WS}_2$  作为可饱和吸收体, 在掺 Er 光纤激光器中观察到调  $Q$  现象<sup>[68]</sup>。他们用液相剥离法制备  $\text{WS}_2$  纳米层然后旋涂在光纤上。随后, 西北工业大学毛东等人第一次用  $\text{WS}_2$  可饱和吸收体实现锁模<sup>[69]</sup>。这说明了  $\text{WS}_2$  在超快光学中作为可饱和吸收体有巨大的潜力。



2015年,山东大学 G. Zhao 等人报道了一种化学风化制备二维材料纳米层的方法<sup>[70]</sup>。该方法简单高效,并且制备的  $\text{MoS}_2$  和  $\text{WS}_2$  纳米层显示出极好的可饱和吸收特性,易于在固体激光器中实现锁模。他们采用该方法制备的  $\text{MoS}_2$  和  $\text{WS}_2$  薄膜,再进行超声和离心,最终制成可饱和吸收镜,将其用于固体激光器,获得了 60 ns 的调  $Q$  脉冲和 8.6 ps 的锁模脉冲输出。随后,山东大学 J. Hou 等人利用  $\text{WS}_2$  薄膜成功实现了 Yb:YAG 激光器的稳定锁模运转<sup>[71]</sup>。实验装置如图 6 所示,其中 M1 为双色镜, M2 和 M3 为凹面镜, OC 为 4% 的输出镜。脉冲的重复频率为 86.7 MHz, 脉冲宽度为 736 fs, 最大输出功率为 270 mW, 峰值功率达到 4.23 kW。这是  $\text{WS}_2$  作为可饱和吸收体在固体激光器中第一次实现飞秒级的脉冲输出。

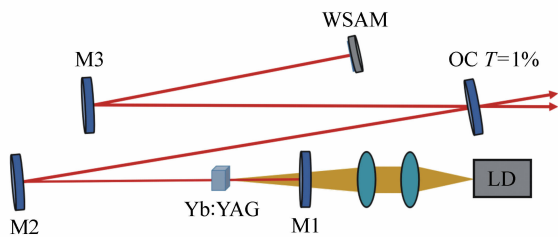


图 6  $\text{WS}_2$  辅助锁模飞秒固体激光器示意图<sup>[71]</sup>

Fig. 6 Schematic of the mode-locked Yb:YAG laser with  $\text{WS}_2$ <sup>[71]</sup>

2016年2月,中科院西安光机所 X. Wang 等人用  $\text{WS}_2$  作为可饱和吸收体在 Nd:YAG 激光器中实现调  $Q$ <sup>[72]</sup>。他们用液相剥离法制备不同浓度的  $\text{WS}_2$  可饱和吸收体(0.25、0.5 和 1 mg/mL),并将其作为可饱和吸收体插入激光器中,均可以实现调  $Q$ ,最短脉冲宽度为 922 ns。

2017年3月,山东大学 W. J. Tang 等人利用液相剥离法制备的  $\text{WS}_2$  作为可饱和吸收体实现了  $\text{YVO}_4/\text{Nd:YVO}_4$  激光器调  $Q$  运转<sup>[73]</sup>,最大输出功率达到 1.36 W,最短脉冲宽度 56 ns,重复频率 1.03 MHz,峰值功率达到 23.6 W。

过渡金属硫化物具有宽带可调性、损伤阈值比较高等优点。而且通过改进制备方法,可进一步增加其响应带宽。与  $\text{MoS}_2$  相比,  $\text{WS}_2$  的带隙比较大( $\text{MoS}_2 \sim 1.8$  eV,  $\text{WS}_2 \sim 2.1$  eV),使其光学响应主要发生在可见光波段。通过引入合适的缺

陷,过渡金属硫化物也可以应用在红外和中红外波段。但制备过程会变得复杂,限制了其应用。

## 5 黑磷的性质及其在固体激光中的应用

黑磷作为一种纳米材料,具有可调直接带隙,高承载流动性( $\sim 1000$   $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )、非常大的开关比( $>10^5$ )、各向异性等特点,可以广泛应用于电子学与光子学领域。块状黑磷的带隙为 0.3 eV,单层黑磷纳米片的带隙为 2 eV<sup>[74]</sup>。黑磷填补了石墨烯和拓扑绝缘体等二维材料的能带空隙,而且其直接带隙可调谐和高电荷迁移率的特点使其可以应用在光电领域。因为它可以有宽带光学响应,根据层数的不同,波长可以从 600 nm 到 4  $\mu\text{m}$  之间调节。黑磷作为可饱和吸收体已经应用在掺 Er 光纤激光器中。

2015年8月,山东大学 B. Zhang 等人第一次报道了黑磷作为可饱和吸收体在固体激光器中的应用<sup>[75]</sup>,图 7 为其实验装置,其中 M1 为双色泵浦镜,对泵浦光高透,对 1 020 ~ 1 100 nm 处高反射, M2 和 M3 均为高反折叠镜,对 1 020 ~ 1 100 nm 高反射, M4 为输出镜。黑磷样品通过液相剥离法制备,调制深度为 7.5%,饱和强度为 1.35  $\text{MW}/\text{cm}^2$ 。该样品成功用于 Nd:YVO<sub>4</sub> 固体激光器实现锁模运转。锁模脉冲的脉冲宽度为 6.1 ps,中心波长为 1 064 nm,输出功率为 460 mW,斜效率约为 14%。

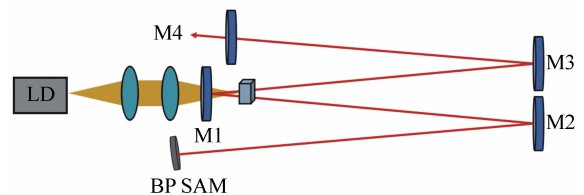


图 7 黑磷锁模 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器实验装置<sup>[75]</sup>

Fig. 7 Schematic of the mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> laser with black phosphorus<sup>[75]</sup>

南洋理工大学 J. Ma 等人利用液相剥离法制备的黑磷可饱和吸收体实现了 Yb:CaYAlO<sub>4</sub> 激光器的调  $Q$  运转<sup>[76]</sup>。调  $Q$  脉冲的脉宽为 620 ns,中



心波长在 1 046 nm 处,重复频率为 113.6 kHz,输出功率为 37 mW。

由于黑磷的宽带响应特性,人们可以将黑磷应用中红外波段。2016 年 1 月,山东大学 Z. W. Wang 用液相剥离法制备黑磷,得到调制深度为 10.7%,饱和强度为  $0.96 \text{ MW/cm}^2$  的黑磷可饱和吸收体。利用其实现了 2.4  $\mu\text{m}$  波段的 Cr: ZnSe 激光器调 Q 运转<sup>[77]</sup>。2016 年 8 月,山东大学 D. Z. Lu 报道了黑磷作为可饱和吸收体的 Yb: ScBO<sub>3</sub> 调 Q 激光器<sup>[78]</sup>。最大脉冲能量达到 1.4  $\mu\text{J}$ 。

目前黑磷作为可饱和吸收体应用在固体激光器中已经在 1  $\mu\text{m}$  和 2.4  $\mu\text{m}$  成功实现了调 Q 运转。黑磷制备过程比较简单,通过一层一层的堆积,它的直接带隙可以被控制。0.3 eV (固体) 1.5 eV (单层),对应波长范围从 4  $\mu\text{m}$  到 0.8  $\mu\text{m}$ 。但是黑磷比较容易被氧化,在空气不稳定,如果需要在固体激光器中长期稳定工作,还需要在制备工艺上作进一步改进。

## 6 结束语

以石墨烯、拓扑绝缘材料、过渡金属硫化物及黑磷为代表的新型二维材料因其良好的光学、电学、力学性能已被广泛应用于激光器的研究。这类二维材料具有宽带可饱和吸收,制备简单成本低等优点,已经在多种光纤激光器及固体激光器中实现调 Q 或锁模输出。

从已报道的实验结果来看,二维材料用于光纤激光器的研究要远远多于在固体激光器中的研究。这主要由于二维材料通常具有较大的损耗,而光纤激光器由于增益光纤可以很长,具有较大的增益,可以弥补损耗。但对固体激光器来说,由于固体介质往往较短,增益有限,损耗的影响就很可观。固体激光器的谐振腔主要采用空间结构,且光斑面积较大,而二维材料在空气中的长期稳定性差,不易制备大面积均匀的纳米层。相对于光纤激光器,固体激光器高功率的特点也需要二

维材料有更高的损伤阈值。同时由于固体激光介质较短,不能像光纤激光器通过增加光纤长度积累足够的非线性效应,因此锁模比光纤激光器要更为困难。但二维材料用于固体激光器也有其优势,原因在于:(1) 固体激光器的增益介质种类较多,分布于各个波段,可以充分利用新型二维材料的宽带饱和吸收特性,通过更换增益介质,可在更多的波段实现调 Q 或锁模运行;(2) 光纤激光器的腔结构较为固定,目前二维材料的损伤阈值较低,因为受限于光纤纤芯较小的固定尺寸,为避免对二维材料的破坏,通常光纤激光器内的激光功率不高。如果采用倏逝场方式提高光纤激光器功率,又需要对光纤进行复杂的刻蚀,工艺处理困难。而固体激光器可以通过改变光学谐振腔的参数,控制在可饱和吸收体上的光斑尺寸,减小其光强,从而在输出高功率或大能量的同时避免对可饱和吸收体的损伤。

目前传统的脉冲固体激光器的研究已经较为成熟,但二维材料的制备与物性研究尚在起步阶段。二维材料的制备工艺虽然简单,但制备样品的一致性与可重复性都不够好。研究者应着重于提高二维材料的稳定性和损伤阈值,且改进制备方法使其可重复性的制备大面积均匀的纳米层。对固体激光器来说,应通过腔型设计,使激光的参数与二维材料的光学性质相匹配以实现调 Q 或锁模。总之新型二维材料与固体激光器的结合将为固体激光器件的发展带来较新的研究内容。利用二维材料的宽带饱和吸收、制备简单的特性,可以开发性能优良的高功率、大能量固体激光器件。反过来,固体激光器的灵活的调谐特性有助于研究二维材料薄膜的特性如调制深度、非饱和损耗、饱和通量、饱和光强及饱和恢复时间对锁模或调 Q 脉冲的影响,也会推动对二维材料的物性研究。我们有理由相信,随着二维材料性质的深入研究及制备工艺的完善,二维材料辅助调 Q 或锁模的固体激光器将会得到更大的发展。

## 参考文献:

- [1] ZAYHOWSKI J. Q-switched microchip lasers find real-world application[J]. *Laser Focus World*, 1999, 35(8): 129-136.
- [2] WILLIAMS J A, FRENCH P M, TAYLOR J R, et al. . Passive mode locking of a cw energy-transfer dye laser operating in

- the infrared near 800 nm[J]. *Opt. Lett.*,1988,13(10):811-813.
- [3] 朱启海,赵长明,张逸辰,等. 激光电池技术进展[J]. 光学精密工程,2016,24(10):316-322.  
ZHU Q H,ZHAO CH M,ZHANG Y CH,*et al.* Development of laser cell technology[J]. *Optics and Precision Engineering*,2016,24(10):316-322. (in Chinese)
- [4] 曾飞,高世杰,伞晓刚,张鑫,等. 机载激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学,2016,9(1):65-73.  
ZENG F,GAO SH J,SAN X G,*et al.* Development status and trend of airborne laser communication terminals[J]. *Chinese Optics*,2016,9(1):65-73. (in Chinese)
- [5] KELLER U,MILLER D A,BOYD G D,*et al.* Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers:an anti-iresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber[J]. *Opt. Lett.*,1992,17(7):505-507.
- [6] SCHMIDT W,FER S C H,*et al.* Self-mode-locking of dye-lasers with saturated absorbers[J]. *Phys. Lett. A*,1968,26(11):558-559.
- [7] SARUKUDA N,ISHIDA Y,YANAGAWA T,*et al.* All solid state CW passively mode locked Ti:sapphire laser using a colored glass filter[J]. *Appl. Phys. Lett.*,1990,57(3):229-230.
- [8] JABCZYN J K,AGNESI A,GUANDALINI A,*et al.* Application of  $V^{3+}$ :YAG crystals for Q-switching and mode-locking of 1.3- $\mu\text{m}$  diode-pumped neodymium lasers[J]. *Opt. Eng.*,2001,40(12):2802-2811.
- [9] KELLER U,WEINGARTEN K J,KÄRTNER F X,*et al.* Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femto-second to nanosecond pulse generation in solid-state lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*,1996,2(3):435-453.
- [10] SET S Y,YAGUCHI H,TANAKA Y,*et al.* Laser mode locking using a saturable absorber incorporating carbon nanotubes[J]. *J. Lightwave Technol.*,2004,22(1):51.
- [11] RSCHIBLI T,MINOSHIMA K,KATAURA H,*et al.* Ultrashort pulse-generation by saturable absorber mirrors based on polymer-embedded carbon nanotubes[J]. *Opt. Express*,2005,13(20):8025-8031.
- [12] SCHMIDT A,RIVIER S,STEINMEYER G,*et al.* Passive mode locking of Yb:KLuW using a single-walled carbon nanotube saturable absorber[J]. *Opt. Lett.*,2008,33(7):729-731.
- [13] CHO W,YIM J,CHOI S,*et al.* Boosting the nonlinear optical response of carbon nanotube saturable absorbers for broadband mode-locking of bulk lasers[J]. *Adv. Funct. Mater.*,2010,20(12):1937-1943.
- [14] WANG F,ROZHIN A G,SCARDACI V,*et al.* Wideband-tuneable nanotube mode-locked fibre laser[J]. *Nat. Nanotechnol.*,2008,3(12):738-742.
- [15] GEIM K,NOVOSELOV K S,*et al.* The rise of graphene[J]. *Nat. Materials*,2007,6:183-191.
- [16] CASTRO NETO A H,GUINEA F,PERES N M R,*et al.* The electronic properties of grapheme[J]. *Rev. Mod. Phys.*,2009,81(1):109-162.
- [17] BREUSING M,ROPERS C,ELSAESSER T,*et al.* Ultrafast carrier dynamics in graphite[J]. *Phys. Rev. Lett.*,2009,102(8):086809.
- [18] BONACCORSO F,SUN Z,HASAN T. Graphene photonics and optoelectronics[J]. *Nat. Photonics*,2010,4(9):611-22.
- [19] 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]. *Opt. Express*,2009,17(20):17630-17635.
- [20] TAN W D,SU C Y,KNIZE R J,*et al.* Mode locking of ceramic Nd:yttrium aluminum garnet with graphene as a saturable absorber[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2010,96(3):031106.
- [21] CHO W B,KIM J W,LEE H W,*et al.* High-quality, large-area monolayer graphene for efficient bulk laser mode-locking near 1.25  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt. Lett.*,2011,36(20):4089-4091.
- [22] HERNANDEZ Y,NICOLOSI V,LOTYA M,*et al.* High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite[J]. *Nat. Nanotechnol.*,2008,3(9):563.
- [24] BOURLINOS A B,GEOGALILAS V,ZBORIL R,*et al.* Pyrolytic formation and photoluminescence properties of a new layered carbonaceous material with graphite oxide-mimicking characteristics[J]. *Carbon*,2009,47(2):1841.
- [24] XU J L,LI X L,WU Y Z,*et al.* Graphene saturable absorber mirror for ultra-fast-pulse solid-state laser[J]. *Opt. Lett.*,

2011,36(10):1948-1950.

- [25] XU J L, LI X L, HAO X P, *et al.*. Performance of large-area few-layer graphene saturable absorber in femtosecond bulk laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(26):261107.
- [26] XU J L, LI X L, HE J L, *et al.*. Efficient graphene Q switching and mode locking of 1.34  $\mu\text{m}$  neodymium lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(13):2652-2654.
- [27] BAEK I H, LEE H W, BAE S K, *et al.*. Efficient mode-locking of sub-70-fs Ti:sapphire laser by graphene saturable absorber[J]. *Appl. Phys. Express*, 2012, 5(3):032701.
- [28] KIM J W, CHOI S Y, JUNG B H, *et al.*. Applicability of graphene flakes as saturable absorber for bulk laser mode-locking[J]. *Appl. Phys. Express*, 2012, 6(6):032704.
- [29] XU S C, MAN B Y, JIANG S Z, *et al.*. Watt-level passively Q-switched mode-locked YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub> laser operating at 1.06  $\mu\text{m}$  using graphene as a saturable absorber[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2014, 56(3):393-397.
- [30] TOLSTIK N, SOROKIN E, SOROKINA I T. Graphene mode-locked Cr:ZnS laser with 41 fs pulse duration[J]. *Opt. Express*, 2014, 22(5):5564-5571.
- [31] TOLSTIK N, POSPISCHIL A, SOROKIN E, *et al.*. Graphene mode-locked Cr:ZnS chirped-pulse oscillator[J]. *Opt. Express*, 2014, 22(6):7284-7289.
- [32] XU S C, MAN B Y, JIANG S Z, *et al.*. Sapphire-based graphene saturable absorber for long-time working femtosecond lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(9):2707-2710.
- [33] XU S C, MAN B Y, JIANG S Z, *et al.*. Direct growth of graphene on quartz substrate as saturable absorber for femtosecond solid-state laser[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2014, 11(8):085801.
- [34] MA J, XIE G Q, LV P, *et al.*. Wavelength versatile graphene gold film saturable absorber mirror for ultra-broadband mode-locking of bulk lasers[J]. *Sci. Rep.*, 2014, 4(6):6186.
- [35] PANA S D, CUI L, LIU J Q, *et al.*. Passively Q-switched mode-locking Nd:GdVO<sub>4</sub> laser with a chemically reduced graphene oxide saturable absorber[J]. *Opt. Mater. Express*, 2014, 38(20):42-45.
- [36] HUANG Q J, JI W, JIANG S Z, *et al.*. Graphene absorber for passive mode-locking Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Optik*, 2015, 126(19):1844-1847.
- [37] GAO S. Diode-end-pumped, passively Q-switched, dual-wavelength, Nd:YAG crystal laser with monolayer graphene as saturable absorber operating at 1319 and 1338 nm[J]. *Can. J. Physiol.*, 2016, 94(13):389-392.
- [38] MA J, HUANG H T, NING K J, *et al.*. Generation of 30 fs pulses from a diode-pumped graphene mode-locked Yb:CaYAlO<sub>4</sub> laser[J]. *Opt. Lett.*, 2016, 41(5):890-893.
- [39] LIN W M, DUAN X M, CUI Z, *et al.*. A passively Q-switched Ho:YVO<sub>4</sub> laser at 2.05  $\mu\text{m}$  with graphene saturable absorber[J]. *Appl. Sci.*, 2016, 6(5):128.
- [40] CUI Z, CHEN Y, YAO B Q, *et al.*. Passively Q-switched Ho:YAG laser with multilayer graphene-based saturable absorber[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(6):697.
- [41] CHO W B, CHOI S Y, ZHU C H, *et al.*. Graphene mode-locked femtosecond Cr<sup>2+</sup>:ZnS laser with  $\sim 300$  nm tuning range[J]. *Opt. Express*, 2016, 24(18):20774-20780.
- [42] LIN H Y, ZHAO M J, LIN H J, *et al.*. Graphene-oxide as saturable absorber for a 1342 nm Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Optik*, 2017, 135(2):129-133.
- [43] CANBAZ F, KAKENOV N, KOCABAS C, *et al.*. Generation of sub-20-fs pulses from a graphene mode-locked laser[J]. *Opt. Express*, 2017, 25(3):2834-2839.
- [44] HASAN M Z, KANE C L, *et al.*. Colloquium:topological insulators[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2010, 82(4):3045-3067.
- [45] LIU J W, HSIEH T H, WEI P, *et al.*. Spin-filtered edge states with an electrically tunable gap in a two-dimensional topological crystalline insulator[J]. *Nat. Mater.*, 2014, 13(2):178-183.
- [46] TANG P H, ZHANG X Q, ZHAO C J, *et al.*. Topological Insulator: Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> saturable absorber for the passive Q-switching operation of an in-band pumped 1645-nm Er:YAG ceramic laser[J]. *IEEE Photonics J.*, 2013, 5(2):1500707.
- [47] YU H H, ZHANG H, WANG Y C, *et al.*. Topological insulator as an optical modulator for pulsed solid-state lasers[J].

*Laser Photonics Rev.* ,2013,7(6):77-83.

- [48] WANG B L, YU H H, ZHANG H, *et al.* . Topological insulator simultaneously Q-switched dual-wavelength Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser[J]. *IEEE Photonics J.* ,2014,6(3):1-7.
- [49] HU M T, LIU J H, TIAN J R, *et al.* . Generation of Q-switched pulse by Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> topological insulator in Yb:KGW laser [J]. *Laser Phys. Lett.* ,2014,11(11):115806.
- [50] LI P X, ZHANG G J, ZHANG H, *et al.* . Q-switched mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> laser by topological insulator Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> saturable absorber[J]. *IEEE Photonic Tech. L.* ,2014,26(19):5806.
- [51] XU B, WANG Y, PENG J, *et al.* . Topological insulator Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> based Q-switched Nd:LiYF<sub>4</sub> nanosecond laser at 1313 nm [J]. *Opt. Express*,2015,23(6):7674-7680.
- [52] JIA F Q, CHEN H, LIU P, *et al.* . Nanosecond-Pulsed, dual-wavelength passively Q-switched c-Cut Nd:YVO<sub>4</sub> laser using a few-layer Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> saturable absorber[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* ,2015,21(1):369-374.
- [53] XU J L, SUN Y J, HE J L, *et al.* . Ultrasensitive nonlinear absorption response of large-size topological insulator and application in low-threshold bulk pulsed lasers[J]. *Sci. Rep.* ,2015,5(2):14856.
- [54] LIN Y Y, LEE P, XU J L, *et al.* . High-pulse-energy topological insulator Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-based passive Q-switched solid-state laser[J]. *IEEE Photonics J.* ,2016,8(4):1-10.
- [55] KUC A, ZIBOUCHE N, HEINE T, *et al.* . Influence of quantum confinement on the electronic structure of the transition metal sulfide TS<sub>2</sub>[J]. *Phys. Rev. B*,2011,83(24):245213.
- [56] WANG K, WANG J, FAN J, *et al.* . Ultrafast saturable absorption of two-dimensional MoS<sub>2</sub> nanosheets[J]. *ACS. Nano*, 2013,7(10):9260-9267.
- [57] CHEN B H, ZHANG X Y, WAN K, *et al.* . Q-switched fiber laser based on transition metal dichalcogenides MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, and WSe<sub>2</sub>[J]. *Opt. Express*,2015,23(20):26723-26737.
- [58] XU B, CHENG Y J, WANG Y, *et al.* . Passively Q-switched Nd:YAlO<sub>3</sub> nanosecond laser using MoS<sub>2</sub> as saturable absorber [J]. *Opt. Express*,2014,22(23):28934-28940.
- [59] ZHAN Y, WANG L, WANG J Y, *et al.* . Yb:YAG thin disk laser passively Q-switched by a hydro-thermal grown molybdenum disulfide saturable absorber[J]. *Laser Phys.* ,2015,25(2):025901.
- [60] LOU F, ZHAO R W, HE J L, *et al.* . Nanosecond-pulsed, dual-wavelength, passively Q-switched ytterbium-doped bulk laser based on few-layer MoS<sub>2</sub> saturable absorber[J]. *Photon. Res.* ,2015,3(2):A25-A29.
- [61] KONG L C, XIE G Q, YUAN P, *et al.* . Passive Q-switching and Q-switched mode-locking operations of 2 μm Tm:CLNGG laser with MoS<sub>2</sub> saturable absorber mirror[J]. *Photon. Res.* ,2015,3(2):A47-A50.
- [62] ZOU X, LENG Y X, LI Y Y, *et al.* . Passively Q-switched mode-locked Tm:LLF laser with a MoS<sub>2</sub> saturable absorber[J]. *Chin. Opt. Lett.* ,2015,13(8):081405.
- [63] LIN T, SUN H, WANG X, *et al.* . Passively Q-switched Nd:YAG laser with a MoS<sub>2</sub> solution saturable absorber[J]. *Laser Phys.* ,2015,25(12):125805.
- [64] SUN Y J, XU J L, GAO S F, *et al.* . Wavelength-tunable, passively Q-switched Yb:Ca<sub>3</sub>Y<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> solid state laser using MoS<sub>2</sub> saturable absorber[J]. *Mater. Lett.* ,2015,160(2):268-270.
- [65] SUN Y J, XU J L, ZHU Z J, *et al.* . Comparison of MoS<sub>2</sub> nanosheets and hierarchical nanospheres in the application of pulsed solid-state lasers[J]. *Opt. Mater. Express*,2015,5(12):2924.
- [66] WANG K, YANG K J, ZHANG X Y, *et al.* . Passively Q-switched laser at 1.3 μm with Few-layered MoS<sub>2</sub> saturable absorber[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* ,2017,23(1):1600205.
- [67] ZHAO W F, YU H, LIAO M Z, *et al.* . Large area growth of monolayer MoS<sub>2</sub> film on quartz and its use as a saturable absorber in laser mode-locking[J]. *Semicond. Sci. Tech.* ,2017,32(2):025013.
- [68] KASSANI, KHAZAEINEZHAD R, JEONG H, *et al.* . All-fiber Er-doped Q-switched laser based on tungsten disulfide saturable absorber[J]. *Opt. Mater. Express*,2015,5(2):373-379.
- [69] MAO D, WANG Y, MA C, *et al.* . WS<sub>2</sub> mode-locked ultrafast fiber laser[J]. *Sci. Rep.* ,2015,5:7965.
- [70] ZHAO G, HAN S, WANG A Z, *et al.* . Chemical weathering exfoliation of atom-thick transition metal dichalcogenides and

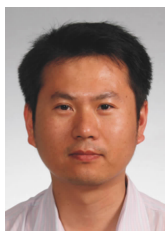


- their ultrafast saturable absorption properties[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2015, 25(33):5292-5299.
- [71] HOU J, ZHAO G, WU Y Z, *et al.*. Femtosecond solid state laser based on tungsten disulfide saturable absorber[J]. *Opt. Express*, 2015, 23(21):27292-27298.
- [72] WANG X, WANG Y G, DUAN L, *et al.*. Passively Q-switched Nd:YAG laser via a WS<sub>2</sub> saturable absorber[J]. *Opt. Commun.*, 2016, 367(2):234-238.
- [73] TANG W J, WANG Y J, YANG K J, *et al.*. 1.36 W Passively Q-Switched YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub> laser with a WS<sub>2</sub> saturable absorber[J]. *IEEE Photonic. Tech. L.*, 2017, 29(5):470-473.
- [74] CHURCHILL, HUGH O H, PABLO J H. Two-dimensional crystals: phosphorus joins the family[J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2014, 9(5):330-331.
- [75] ZHANG B, LOU F, ZHAO R, *et al.*. Exfoliated layers of black phosphorus as saturable absorber for ultrafast solid-state laser[J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(16):3691-3694.
- [76] MA J, LU S, GUO Z, *et al.*. Few-layer black phosphorus based saturable absorber mirror for pulsed solid-state lasers[J]. *Opt. Express*, 2015, 23(17):22643-22648.
- [77] WANG Z W, ZHAO R W, HE J L, *et al.*. Multi-layered black phosphorus as saturable absorber for pulsed Cr:ZnSe laser at 2.4 μm[J]. *Opt. Express*, 2016, 24(2):1598-1603.
- [78] LU D Z, PAN Z B, ZHANG R, *et al.*. Passively Q-switched ytterbium-doped ScBO<sub>3</sub> laser with black phosphorus saturable absorber[J]. *Opt. Eng.*, 2016, 55(8):081312.

#### 作者简介:



公爽(1994—),女,山东临沂人,硕士研究生,主要从事固体激光器等方面的研究。E-mail:gongshuang@emails.bjut.edu.cn



田金荣(1975—),男,山东德州人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事全固态激光技术和飞秒激光技术等方面的研究。E-mail:jrtian@bjut.edu.cn