

## 激光与光电子学进展

## 基于黑磷可饱和吸收体的被动调 Q Tm:YAP 激光器

刘邦政<sup>1</sup>, 李双成<sup>1</sup>, 吴政阳<sup>1</sup>, 杨曦凝<sup>1\*\*</sup>, 李林军<sup>1\*</sup>, 崔昊宇<sup>2</sup><sup>1</sup>哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院黑龙江省激光光谱技术及应用重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150086;<sup>2</sup>哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150086

**摘要** 介绍了一台 2 μm 波段的被动调 Q(PQS)模式 Tm:YAP 激光器。该激光器采取直形腔结构,用输出中心波长为 792 nm 的激光二极管作为泵浦光源,用新型二维材料黑磷制备的可饱和吸收体作为 PQS 调制器件。实验结果表明:在连续波模式运转下,当泵浦功率为 8.8 W 时,Tm:YAP 激光器的输出功率为 1.0 W,输出中心波长为 1994.8 nm,相应的斜率效率为 17.3%;在 PQS 模式运转下,当泵浦功率为 8.8 W 时,Tm:YAP 激光器的平均输出功率为 0.9 W,输出脉冲宽度为 1.3 μs,重复频率为 135.8 kHz;当平均输出功率为 0.9 W 时,Tm:YAP 激光器的输出中心波长为 1986.7 nm,相应的斜率效率为 14.2%,光束质量因子  $M_x^2=1.10$ 、 $M_y^2=1.06$ 。

**关键词** 激光器;被动调 Q Tm:YAP 激光器;黑磷可饱和吸收体;光束质量因子

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212928

## Passively Q-Switched Operation of Tm:YAP Laser with Black Phosphorus Saturable Absorber

Liu Bangzheng<sup>1</sup>, Li Shuangcheng<sup>1</sup>, Wu Zhengyang<sup>1</sup>, Yang Xining<sup>1\*\*</sup>, Li Linjun<sup>1\*</sup>,  
Cui Haoyu<sup>2</sup><sup>1</sup>Heilongjiang Province Key Laboratory of Laser Spectroscopy Technology and Application,  
School of Measurement and Communication Engineering, Harbin University of Science and  
Technology, Harbin 150086, Heilongjiang, China;<sup>2</sup>School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150086, Heilongjiang, China

**Abstract** A passively Q-switched (PQS) Tm:YAP laser in the 2 μm waveband is introduced. A linear cavity structure of the Tm:YAP laser is chosen in the experiment. A laser diode with an output central wavelength of 792 nm is used as the pump source, and a saturable absorber prepared by a new two-dimensional material of black phosphorus is used as a PQS modulation device for the Tm:YAP laser. In the continuous wave mode, an output power of 1.0 W is obtained with an output central wavelength of 1994.8 nm from the Tm:YAP laser under the pump power of 8.8 W, corresponding to a slope efficiency of 17.3%. Under the PQS regime, an average output power of 0.9 W and a minimum pulse width of 1.3 μs at 135.8 kHz are acquired from the Tm:YAP laser at 1986.7 nm under the pump power of 8.8 W, corresponding to a slope efficiency of 14.2%. In addition, the beam quality factor of  $M_x^2=1.10$  and  $M_y^2=1.06$  are measured from the PQS Tm:YAP laser under an average output power of 0.9 W.

**Key words** laser; passively Q-switched Tm:YAP laser; black phosphorus saturable absorber; beam quality factor

## 1 引言

2 μm 波段激光容易被人眼玻璃体吸收且难以传输到视网膜上,是安全的激光光源<sup>[1-2]</sup>。2 μm 波段脉冲激光在测距、医疗、通信等领域都有着十分重要的应

用<sup>[3-5]</sup>。被动调 Q(PQS)技术是获得窄脉冲宽度、高重复频率脉冲激光的有效手段之一。相比主动调 Q 技术,PQS 技术使用的调制器件,即可饱和吸收体(SA)多由新型二维材料制备,且调制器件的制备工艺简单、经济成本低、可重复性强<sup>[6-7]</sup>。不同二维材料的性能有

收稿日期:2021-11-11;修回日期:2021-11-28;录用日期:2021-12-13;网络首发日期:2021-12-25

基金项目:国家自然科学基金(61775053)、黑龙江省自然科学基金重点项目(ZD2021F002)、中央支持地方高校改革发展资金(2020YQ11)

通信作者: \*lj7897@126.com; \*\*yangxn1984@126.com

明显差异,因此,探索不同二维材料的非线性光学特性对于获得优异的 PQS 调制器件显得尤为重要。

自 Novoselov 等<sup>[8-10]</sup>通过机械剥离法获得石墨烯以来,石墨烯凭借其独特的光电特性成为纳米材料领域新的研究热点。受石墨烯的启迪,目前已有多种二维材料被广泛应用在光电领域,其中具有代表性的有新型二维材料黑磷<sup>[11]</sup>。相比于其他二维材料,黑磷具有独特的能带结构,其带隙可通过改变堆叠的磷层数调节,且单层黑磷具有直接带隙结构。此外,黑磷还可吸收波长范围在 600~4100 nm 之间的光,该波段包含了可见光至红外光<sup>[12-16]</sup>。目前,在 PQS 激光器领域,关于黑磷可饱和吸收体的实验已有很多报道,如:Chen 等<sup>[17]</sup>实现了 PQS 模式掺铒光纤激光器的运转,可获得的最小脉冲宽度为 10.3  $\mu\text{s}$ ;Sun 等<sup>[18]</sup>实现了 PQS 模式 Nd:GDVO<sub>4</sub> 激光器的运转,可获得的最小脉冲宽度为 72.0 ns;Zhang 等<sup>[19]</sup>实现了 PQS 模式掺铒光纤激光器的运转,可获得的最小脉冲宽度为 91.0 ns。但在 2  $\mu\text{m}$  波段固体激光器领域,有关黑磷可饱和吸收体作为 PQS 调制器件的报道相对较少,如:Chu 等<sup>[20]</sup>实现了 PQS 模式 Tm:YAP 激光器的运转,可获得的最小脉冲宽度、重复频率和峰值功率分别为 1.9  $\mu\text{s}$ 、19.3 kHz、4.4 W;Li 等<sup>[21]</sup>实现了 PQS 模式 Tm, Ho:LuVO<sub>4</sub> 激光器的运转,可获得的最小脉冲宽度、重复频率和峰值功率分别为 2.9  $\mu\text{s}$ 、128.4 kHz、2.39 W;Li<sup>[22]</sup>实现了 PQS 模式 Tm, Ho:GdVO<sub>4</sub> 激光器的运转,可获得的最小脉冲宽度、重复频率和峰值功率分别为 4.5  $\mu\text{s}$ 、71.8 kHz、1.2 W。

本文利用黑磷制备的可饱和吸收体作为 PQS 调制器件,实现了脉冲宽度更窄、重复频率和峰值功率更高的脉冲激光输出。在泵浦功率为 8.8 W 时,PQS 模

式 Tm:YAP 激光器在 135.8 kHz 重复频率下输出的脉冲宽度为 1.3  $\mu\text{s}$ ,对应的单脉冲能量和峰值功率分别为 6.3  $\mu\text{J}$  和 4.8 W。

## 2 实验装置

实验采用的 Tm:YAP 激光器结构如图 1 所示。Tm:YAP 激光器主要由泵浦光源、聚焦耦合系统、光学谐振腔、增益介质 Tm:YAP 晶体、黑磷可饱和吸收体组成。采用的泵浦光源是中心波长为 792 nm 的激光二极管(LD)。该激光二极管的光束输出方式为光纤耦合输出,光纤的数值孔径为 0.22、芯径为 105  $\mu\text{m}$ 。聚焦耦合系统由准直镜 L1(焦距为 25 mm 的平凸镜片)和聚焦镜 L2(焦距为 35 mm 的平凸镜片)组成。泵浦光源输出的光束通过聚焦耦合系统后形成的最小光斑可会聚至 Tm:YAP 晶体的中心。光学谐振腔由 M1 和 M2 组成,物理长度为 35 mm,其中:M1 作为输入镜,是一块曲率半径为 100 mm 的平凹镜片,双面镀有 792 nm 的增透膜,凹面镀有 1900~2200 nm 透过率高达 99.8% 的膜系;M2 作为输出镜,是透过率为 5% 的平平镜。黑磷可饱和吸收体的制备步骤为:将 1 mL 质量浓度为 0.2 mg/mL 的黑磷纳米分散液(黑磷纯度为 99.998%)和 20 mL 体积分数为 95% 的乙醇溶液混合后经超声细胞粉碎机粉碎 30 min,再利用匀胶机均匀旋涂在 CaF<sub>2</sub> 镜片上。采用的增益介质为 Tm<sup>3+</sup> 掺杂原子数分数为 3% 的 Tm:YAP 晶体,其外形尺寸为 3 mm×3 mm×8 mm。Tm:YAP 晶体双端面镀有 792 nm 和 1900~2200 nm 的增透膜系,实验中通过水冷机使 Tm:YAP 晶体的温度控制在 285 K 以减少热效应对晶体的影响。

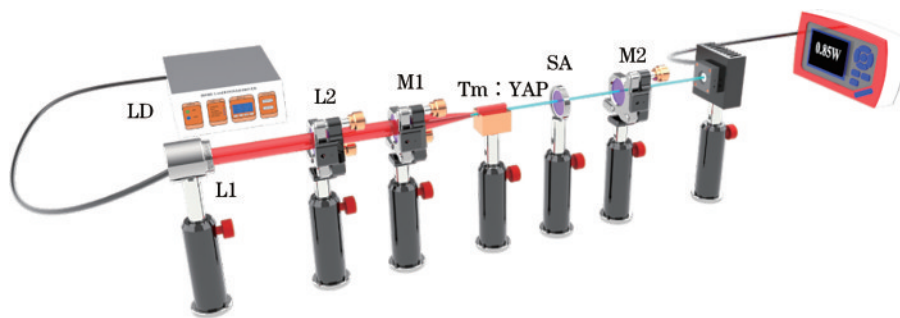


图 1 Tm:YAP 激光器的实验装置

Fig. 1 Experimental setup of the Tm:YAP laser

## 3 分析与讨论

采用图 1 所示的实验装置开展连续波(CW)和 PQS 模式 Tm:YAP 激光器实验研究并利用功率探头(Thorlabs 公司生产,型号为 S442C)和功率计(Thorlabs 公司生产,型号为 PM100D)测量输出功率,两种模式下 Tm:YAP 激光器的输出功率如图 2 所示。

可以发现,在连续波模式运转下,当泵浦功率为 8.8 W 时,Tm:YAP 激光器的输出功率为 1.0 W,相应的斜率效率为 17.3%。利用黑磷可饱和吸收体作为调制器件开展 PQS 实验研究,当泵浦功率为 8.8 W 时,PQS 模式 Tm:YAP 激光器的平均输出功率为 0.9 W,相应的斜率效率为 14.2%。在连续波和 PQS 两种模式运转下,在泵浦功率允许的范围内,Tm:YAP 激光

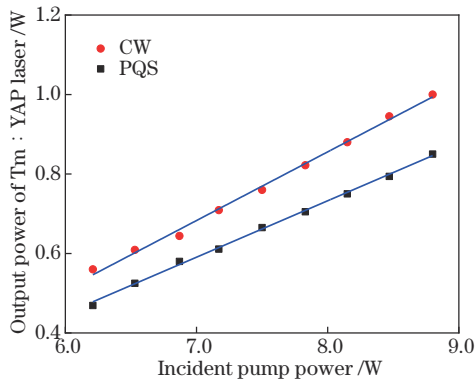
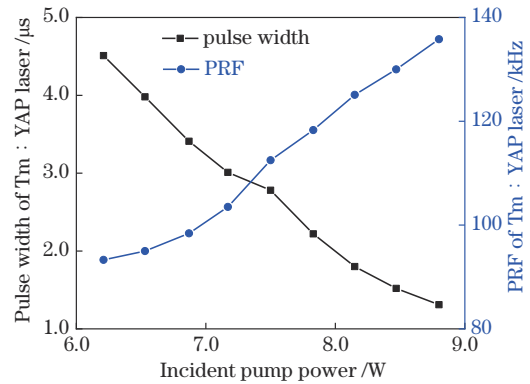


图 2 Tm:YAP 激光器的输出功率

Fig. 2 Output power of the Tm:YAP laser

器输出功率随泵浦功率的增加而提高。连续波模式 Tm:YAP 激光器的输出功率比 PQS 模式 Tm:YAP 激光器的平均输出功率高,原因是后者运行时激光谐振腔内损耗大。

在 PQS 模式下, Tm:YAP 激光器的脉冲重复频率和输出脉冲宽度随泵浦功率的变化曲线如图 3 所示。可以发现,当泵浦功率从 6.2 W 逐渐增加至 8.8 W 时, Tm:YAP 激光器的脉冲重复频率从 93.3 kHz 逐渐增加至 135.8 kHz, 输出脉冲宽度从 4.5  $\mu\text{s}$  近似线性下降至 1.3  $\mu\text{s}$ 。原因是光学谐振腔内光子数的密度随着泵浦功率的增加而增加,黑磷可饱和吸收体的漂白速度变快, Q 开关时间变短, 导致输出脉冲宽

图 3 PQS 模式 Tm:YAP 激光器的脉冲重复频率和脉冲宽度  
Fig. 3 Pulse repetition frequency (PRF) and pulse width of the

PQS Tm:YAP laser

度逐渐变窄。

当泵浦功率为 8.8 W 时,利用光电探测器(EOT 公司生产,型号为 ET-5000)和示波器(Siglent 公司生产,型号为 SDS5102X)采集 Tm:YAP 激光器的输出脉冲轮廓。扫描时间为 1  $\mu\text{s}$ 、脉冲宽度为 1.3  $\mu\text{s}$  时的单脉冲波形如图 4(a)所示;扫描时间为 100  $\mu\text{s}$ 、脉冲宽度为 1.3  $\mu\text{s}$  时的脉冲序列如图 4(b)所示。可以发现, Tm:YAP 激光器的输出脉冲振幅存在轻微波动现象,原因是泵浦光源的输出功率的值在误差允许的范围内不断轻微跳动,且在激光器长时间运转下 Tm:YAP 晶体内部的热效应程度不断提高。

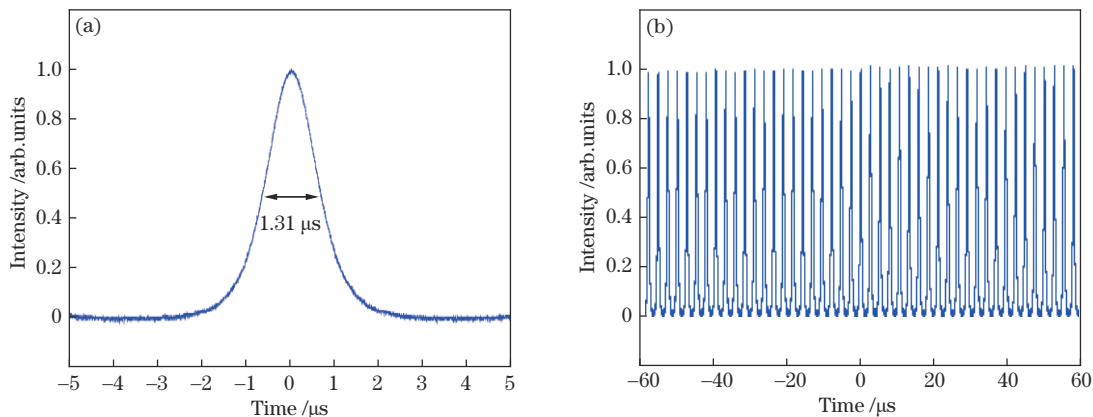


图 4 泵浦功率为 8.8 W 时的脉冲激光输出特性。(a)单脉冲波形;(b)脉冲序列

Fig. 4 Output characteristics of the pulsed laser when the pump power is 8.8 W. (a) Single pulse waveform; (b) pulse train

利用 PQS 模式 Tm:YAP 激光器在不同泵浦功率下的平均输出功率、重复频率和脉冲宽度数据,计算得到 Tm:YAP 激光器的输出单脉冲能量和相应峰值功率,结果如图 5 所示。可以发现:当泵浦功率从 6.2 W 逐渐增加至 8.8 W 时, PQS 模式 Tm:YAP 激光器输出的单脉冲能量从 5.0  $\mu\text{J}$  逐渐增加至 6.3  $\mu\text{J}$ , 相应的峰值功率从 1.1 W 逐渐增加至 4.8 W; 当泵浦功率从 6.2 W 逐渐增加至 6.9 W 时, Tm:YAP 激光器输出单脉冲能量从 5.0  $\mu\text{J}$  逐渐增加至 5.9  $\mu\text{J}$ , 单脉冲能量的增幅为 0.9  $\mu\text{J}$ ; 当泵浦功率从 6.9 W 逐渐增加至 8.8 W

时, Tm:YAP 激光器输出单脉冲能量从 5.9  $\mu\text{J}$  逐渐增加至 6.3  $\mu\text{J}$ , 单脉冲能量的增幅为 0.4  $\mu\text{J}$ 。这表明当泵浦功率从 6.2 W 逐渐增加至 8.8 W 时, Tm:YAP 激光器的输出效率呈下降趋势。单脉冲能量变化曲线的整体趋势并不平缓,这主要是因为随着泵浦功率的增加,特别是泵浦功率增加至 6.9 W 时, Tm:YAP 晶体的热效应加剧,引起谐振腔内增益损耗匹配发生变化,导致激光器的平均输出功率转换效率下降。

利用光谱仪(Bristol 公司生产,型号为 771B-IR)测量 Tm:YAP 激光器在不同运转模式下的输出光谱,

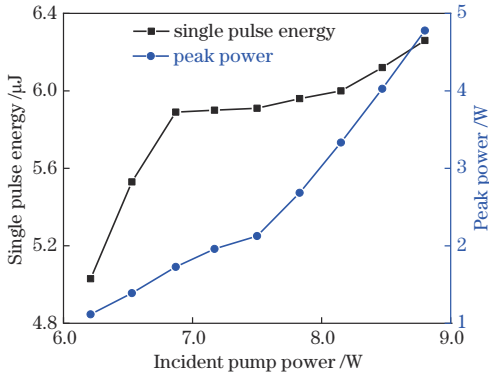


图 5 PQS 模式 Tm:YAP 激光器输出的单脉冲能量和峰值功率  
Fig. 5 Single pulse energy and peak power of the PQS Tm: YAP laser

结果如图 6 所示。可以发现,连续波模式 Tm:YAP 激光器的输出中心波长为 1994.8 nm, PQS 模式 Tm:YAP 激光器的输出中心波长为 1986.7 nm (带宽为 0.17 nm), PQS 模式 Tm:YAP 激光器的输出中心波长小于连续波模式。原因是在 PQS 模式运转下 Tm:YAP 晶体发射截面所储存的能量远超过连续波模式

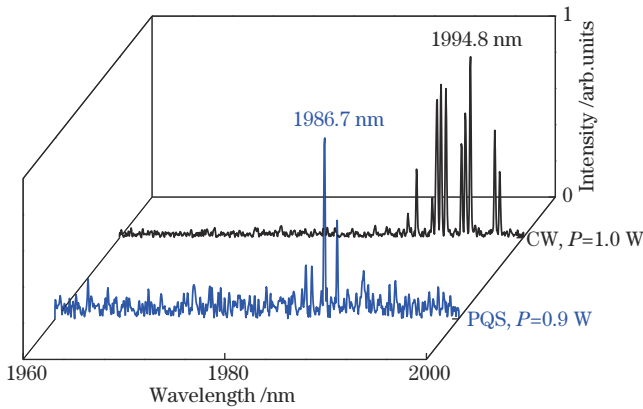


图 6 Tm:YAP 激光器的输出光谱  
Fig. 6 Output spectra of the Tm:YAP laser

所储存的能量,导致晶体发射截面变窄,输出中心波长变短,同时可饱和吸收体作为调制器件所产生的非线性效应也对 PQS 模式运转下输出波长的蓝移起到了积极作用。此外, PQS 模式 Tm:YAP 激光器的输出光谱在其中心波长附近存在发射峰的数量要显著少于连续波模式。原因是在 PQS 模式运转下激光谐振腔内放置的可饱和吸收体可以起到法布里-珀罗干涉仪的作用,抑制了激光器输出光谱的数量。为了分析 PQS 模式 Tm:YAP 激光器在长时间运转下平均输出功率的稳定程度,使泵浦功率稳定在 8.8 W,每隔 20 min 记录一次 Tm:YAP 激光器的平均输出功率,结果如图 7 所示。可以发现, PQS 模式 Tm:YAP 激光器平均输出功率的变化幅度在  $\pm 1.3\%$  之间。

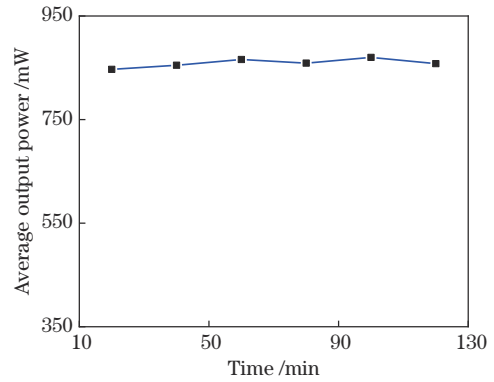


图 7 PQS 模式 Tm:YAP 激光器的稳定性  
Fig. 7 Stability of the PQS Tm:YAP laser

平均输出功率为 0.9 W 时,通过光束质量分析仪器(Thorlabs 公司生产,型号为 M2MS)测得的 PQS 模式 Tm:YAP 激光器的输出光束质量因子和光束图形如图 8 所示。可以发现, Tm:YAP 激光器的输出光束质量因子  $M_x^2=1.10$ 、 $M_y^2=1.06$ 。此外,该激光光束的远场发散角  $x=-0.742^\circ$ 、 $y=-0.782^\circ$ ,这表明 Tm:YAP 激光器的输出光束质量较好。

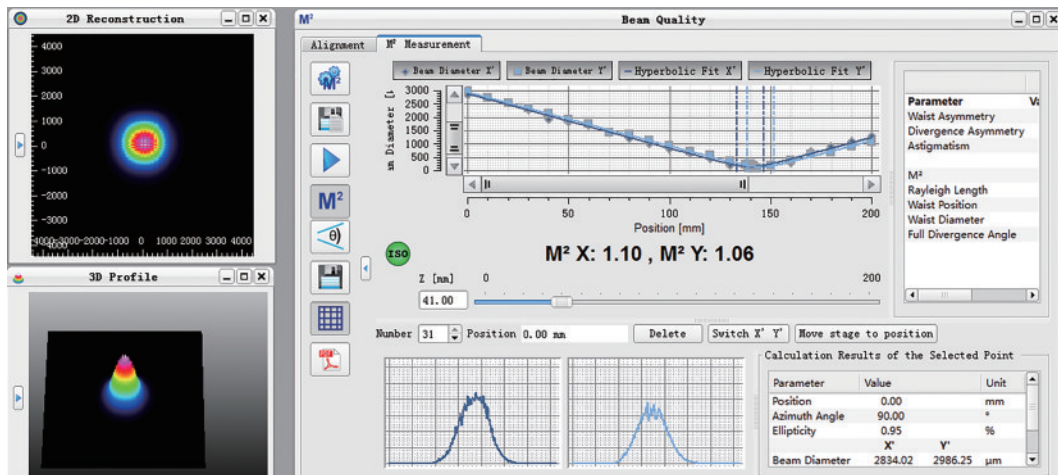


图 8 PQS 模式 Tm:YAP 激光器的输出光束质量  
Fig. 8 Beam quality of the PQS Tm:YAP laser

表 1 是目前已报道的基于黑磷可饱和吸收体的 2  $\mu\text{m}$  波段 PQS 模式固体激光器的输出特性。对比发现,本方案利用黑磷可饱和吸收体实现了脉冲宽度更

窄、重复频率更高、峰值功率更高的固体激光器的运转,进一步证实了基于新型二维材料黑磷制备的可饱和吸收体可作为性能优异的 PQS 调制器件。

表 1 基于黑磷可饱和吸收体的 2  $\mu\text{m}$  波段 PQS 固体激光器的输出特性

Table 1 Output characteristics of PQS solid-state laser in 2  $\mu\text{m}$  band based on black phosphorus saturable absorber

Laser crystal	Output spectra /nm	Pulse width / $\mu\text{s}$	Repetition rate /kHz	Output power /W	Peak power /W	Ref.
Tm:YAP	1986	1.31	135.75	0.85	4.78	Now
Tm:YAP	1988	1.78	19.25	0.15	4.40	[20]
Tm, Ho:LuVO <sub>4</sub>	2056	2.83	128.30	0.86	2.37	[21]
Tm, Ho:GdVO <sub>4</sub>	-	4.48	71.84	0.37	1.15	[22]

## 4 结 论

将基于新型二维材料黑磷制备的可饱和吸收体置于物理长度为 35 mm 激光谐振腔中,实现了高效的 Tm:YAP 固体激光器的运转。当泵浦功率为 8.8 W 时,PQS 模式 Tm:YAP 激光器输出脉冲宽度为 1.3  $\mu\text{s}$ ,相应的重复频率为 135.8 kHz。在峰值功率为 4.8 W 时,Tm:YAP 激光器的输出中心波长为 1986.7 nm,输出光束质量因子  $M^2$  在水平和竖直方向分量的值都小于 1.10,相应的远场发散角度为  $x=-0.742^\circ$ 、 $y=-0.782^\circ$ 。该结论进一步证实了黑磷可饱和吸收体可作为性能优异的 PQS 调制器件,实现窄脉冲宽度、高重复频率和高峰值功率的固体激光器的运转,有助于推动黑磷可饱和吸收体在 2  $\mu\text{m}$  波段高性能固体激光器中更广泛的应用。

## 参 考 文 献

- [1] Tian J, Ke Y, Cong W, et al. Ultrafast fiber lasers mode-locked by two-dimensional materials: review and prospect[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(1): 78-90.
- [2] 孙锐, 陈晨, 令维军, 等. 基于氧化石墨烯的瓦级调 Q 锁模 Tm:LuAG 激光器[J]. *物理学报*, 2019, 68(10): 104207.  
Sun R, Chen C, Ling W J, et al. Watt-level passively Q-switched mode-locked Tm:LuAG laser with graphene oxide saturable absorber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(10): 104207.
- [3] 鲁先洋, 李学彬, 秦武斌, 等. 微脉冲激光雷达反演气溶胶的水平分布[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(7): 1697-1704.  
Lu X Y, Li X B, Qin W B, et al. Retrieval of horizontal distribution of aerosol mass concentration by micro pulse lidar[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7): 1697-1704.
- [4] 曾昊旻, 李松, 张智宇, 等. 车载激光雷达 Risley 棱镜光束扫描系统[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(7): 1444-1450.  
Zeng H M, Li S, Zhang Z Y, et al. Risley-prism-based beam scanning system for mobile lidar[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1444-1450.
- [5] Chen Y P, Zhai J P, Xu X T, et al. Mode-locked

thulium-doped fiber laser based on 0.3 nm diameter single-walled carbon nanotubes at 1.95  $\mu\text{m}$ [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(4): 41403-41406.

- [6] 王彩丽, 谢仕永, 刘辉, 等. 激光雷达用 2  $\mu\text{m}$  Tm:YAG 激光器波长精细调控的理论研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 0830003.  
Wang C L, Xie S Y, Liu H, et al. Theoretical study of 2  $\mu\text{m}$  Tm:YAG laser with wavelength switchable accurately for lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0830003.
- [7] 刘海洋, 常建华, 冯潇潇, 等. 基于石墨烯量子点与二硫化钼的双被动调 Q 激光器研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1101001.  
Liu H Y, Chang J H, Feng X X, et al. Research on double passively Q-switched laser based on graphene quantum dots and molybdenum disulfide[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1101001.
- [8] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
- [9] Bao Q L, Zhang H, Wang Y, et al. Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2009, 19(19): 3077-3083.
- [10] Zhang H, Virally S, Bao Q L, et al. Z-scan measurement of the nonlinear refractive index of graphene[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 1856-1858.
- [11] Coleman J N, Lotya M, O'Neill A, et al. Two-dimensional nanosheets produced by liquid exfoliation of layered materials[J]. *Science*, 2011, 331(6017): 568-571.
- [12] Li L K, Yu Y J, Ye G J, et al. Black phosphorus field-effect transistors[J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(5): 372-377.
- [13] Liu H, Neal A T, Zhu Z, et al. Phosphorene: an unexplored 2D semiconductor with a high hole mobility[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(4): 4033-4041.
- [14] Tran V, Soklaski R, Liang Y F, et al. Layer-controlled band gap and anisotropic excitons in few-layer black phosphorus[J]. *Physical Review B*, 2014, 89(23): 235319.
- [15] Hanlon D, Backes C, Doherty E, et al. Liquid exfoliation of solvent-stabilized few-layer black phosphorus for applications beyond electronics[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8563.

- [16] Lu S B, Miao L L, Guo Z N, et al. Broadband nonlinear optical response in multi-layer black phosphorus: an emerging infrared and mid-infrared optical material[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11183-11194.
- [17] Chen Y, Jiang G B, Chen S Q, 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.
- [18] Sun X L, Nie H K, He J L, et al. Passively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> 1.3 μm laser with few-layered black phosphorus saturable absorber[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1600405.
- [19] Zhang C X, Chen Y, Fan T J, et al. Sub-hundred nanosecond pulse generation from a black phosphorus Q-switched Er-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 4708-4716.
- [20] Chu Z Z, Liu J, Guo Z N, et al. 2 μm passively Q-switched laser based on black phosphorus[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(7): 2374-2379
- [21] Li L J, Li T X, Zhou L, et al. Passively Q-switched diode-pumped Tm, Ho: LuVO<sub>4</sub> laser with a black phosphorus saturable absorber[J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(9): 094205.
- [22] 李天鑫. 基于黑磷的被动调 Q 模式 Tm, Ho: LuVO<sub>4</sub>/Tm, Ho: GdVO<sub>4</sub> 固体激光技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020: 36-42.
- Li T X. Passively Q-switched mode operation of Tm, Ho: LuVO<sub>4</sub>/Tm, Ho: GdVO<sub>4</sub> laser with BP saturable absorber mirror[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020: 36-42.