

基于 Langmuir-Blodgett 技术制备的二硫化钨可饱和吸收体在调 Q 固体激光器中的研究

王 江 汪太进 刘思聪 王勇刚

(陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710119)

摘 要 基于 Langmuir-Blodgett (LB) 方法, 研究了新型二硫化钨可饱和吸收体应用于 Nd:GdVO₄ 晶体中实现了 Q 激光的输出. 结果表明, 通过 LB 技术在石英玻璃片上制备的二硫化钨可饱和吸收体表面均匀, 有利用实现稳定调 Q 脉冲输出. 通过调节谐振腔, 在泵浦功率为 5.1 W 时实现了最窄脉冲宽度为 337 ns 的调 Q 激光输出, 相对应的重复频率为 614.8 kHz, 平均输出功率为 811 mW, 斜效率达到 36.1%.

关键词 LB 技术; 二硫化钨; 可饱和吸收体; 被动调 Q 激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

0 引言

全固态调 Q 激光器因其具有结构简单、峰值功率高、斜效率高等优点, 在激光通信、测距、科研、医学等领域有着极为广阔的应用前景^[1-5]. 其中, 应用可饱和吸收体(saturable absorber SA)的被动调 Q 激光器具有体积小、成本低、机械稳定性好等优点, 受到人们广泛关注. 半导体可饱和吸收镜(SESAMS)^[6-8]是目前为止最成熟的吸收体. 然而, 由于其存在一些缺点, 如制造工艺复杂, 操作带宽有限^[9]等难题, 还需要进一步研究新类型吸收体. 近几年来, 一些新型的纳米材料, 如石墨烯、氧化石墨烯、拓扑绝缘体、过渡金属硫化物和黑磷等^[9-16], 由于其非线性效应良好, 制备相对简单, 宽的带宽等特点, 作为可饱和吸收体受到广泛关注. 对于追求性能优良的可饱和吸收体, 不仅需要寻找各种新材料吸收体, 更需要在吸收体的制备方法方面进行新的尝试.

到目前为止, 已有许多方法被用于制造二维材料吸收体薄膜. 比如, 旋涂法^[17]、化学气相沉积^[18]和自组装技术^[19]等. 然而, 由旋涂法制备的薄膜, 其厚度通常差异很大. 对于化学气相沉积法而言, 其制备工艺较为复杂. Langmuir-Blodgett(LB)技术^[20-23]通常用于沉积无缺陷、分子或超薄膜. 近年来, 用 LB 方法制备的二维材料如二硫化钨、氧化石墨烯和二氧化钛等^[24-26]已被用于多种应用. 尤其在激光器中也取得了进展. 然而, 据我们所知, 通过 LB 技术制备的二硫化钨(Tungsten disulfide WS₂)可饱和吸收体还没有被应用于固体激光器中.

本文采用 LB 方法, 在石英基片上制备了 WS₂ 可饱和吸收体. 通过将其插入 Nd:GdVO₄ 激光器腔中, 我们获得了稳定的调 Q 激光输出, 最大平均输出功率为 811 mW, 最短脉冲持续时间为 337 ns.

1 可饱和吸收体的制备与表征

本实验通过 LB 技术制备了 WS₂-SA, 其制备过程如下: 首先, 将 WS₂ 粉末(XF Nano, 南京)分散于去离子水中(浓度为 1 mg/mL), 再将 WS₂ 水溶液超声清洗 24 h 后, 以 5000 r/min 的速度离心 10 min, 去除大尺寸的沉淀, 取 WS₂ 溶液的上清液. 然后, 将 WS₂ 溶液与甲醇和氯仿溶液混合(体积比为 WS₂ 溶液: 甲醇: 氯仿 = 1: 4: 1) 制备成 WS₂ 分散液. 然后, 通过 LB 计算机控制装置(JML04C1, 2017JM7085, Powereach, 中国)

收稿日期: 2019-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(61378024); 陕西省自然科学基金项目(2017JM6091) 资助

通讯作者: 王勇刚, 男, 汉族, 博士, 教授, 研究方向: 新型激光材料, E-mail: chinawygxjw@snnu.edu.cn.

制备 WS_2 -SA, 其实验示意如图 1(a) 显示. 用乙醇仔细清洗水槽, 接着注入去离子水 ($pH = 7.0$), 将 WS_2 分散液 (1 mL) 缓慢的滴入水槽液面中, 保持 30 min 静置. 然后, 以 11.1 mm/min 的速度压缩屏障, 并通过传感器实时监测液面的表面压. 随着屏障的不断压缩, 表面压不断增加, 如图 1(b) 所示, 曲线变的越来越陡峭, 说明 WS_2 粒子间的距离越来越小, 薄膜逐渐趋于均匀紧密. 我们在表面压为 30 mN/m 时进行拉膜, 获得 WS_2 -SA 如图 1(b) 插图所示. 通过扫描电子显微镜 (SEM), 可以清楚的看到排列紧密的 WS_2 薄膜, 如图 1(c) 所示. WS_2 -SA 的拉曼光谱如图 1(d) 中所示, 其两个特征峰 E_{2g}^1 和 A_{1g} 分别出现在 380.9 cm^{-1} 和 405.9 cm^{-1} 处.

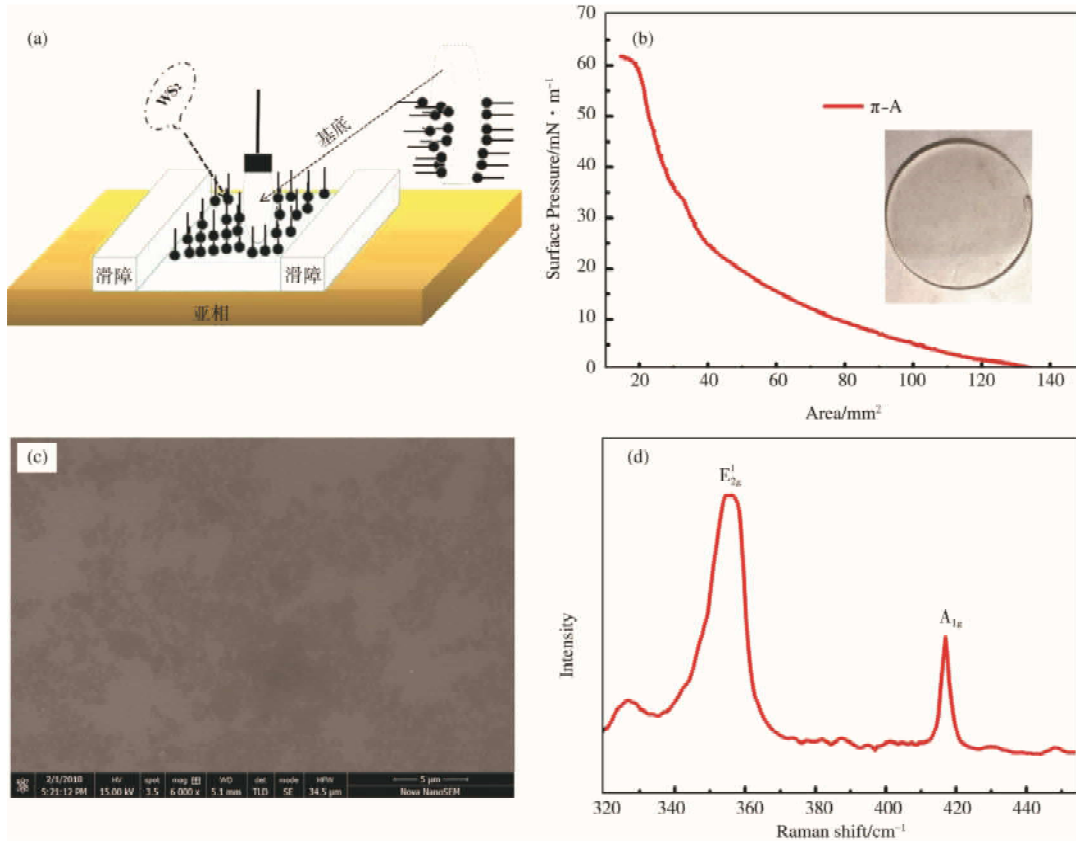


图 1 (a) LB 原理图; (b) π -A 曲线图, 插图为制备的 WS_2 吸收体; (c) 为 SEM 图; (d) 为拉曼图

WS_2 -SA 的光学特性对激光器的影响至关重要, 采用紫外可见分光光度计 (TU-1810) 分别测量了石英基底和 WS_2 -SA 的线性透过率. 由图 2(a) 可知, 在 1064 nm 处, 石英基底和 WS_2 -SA 的透过率分别为 92.2% 和 84.9%. 通过 Nd:YAG 锁模脉冲激光器 (中心波长为 1064 nm, 脉宽为 25 ps, 重复频率为 110 MHz) 测试了 WS_2 -SA 的非线性传输特性. 图 2(b) 为 WS_2 -SA 的非线性透过率随输入脉冲强度的关系. 通过公式 (1) 将实验数据进行拟合^[24]

$$T(I) = 1 - \Delta T_{\text{exp}}(-I/I_{\text{sat}}) - T_{\text{ns}}, \quad (1)$$

其中 $T(I)$ 是非线性透过率, ΔT 是调制深度, I 是入射光强, I_{sat} 是饱和强度, T_{ns} 是非线性吸收系数. 通过拟合结果可知 WS_2 -SA 的调制深度为 6.1%, 饱和光强为 $106 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$, 非线性损耗为 8.9%.

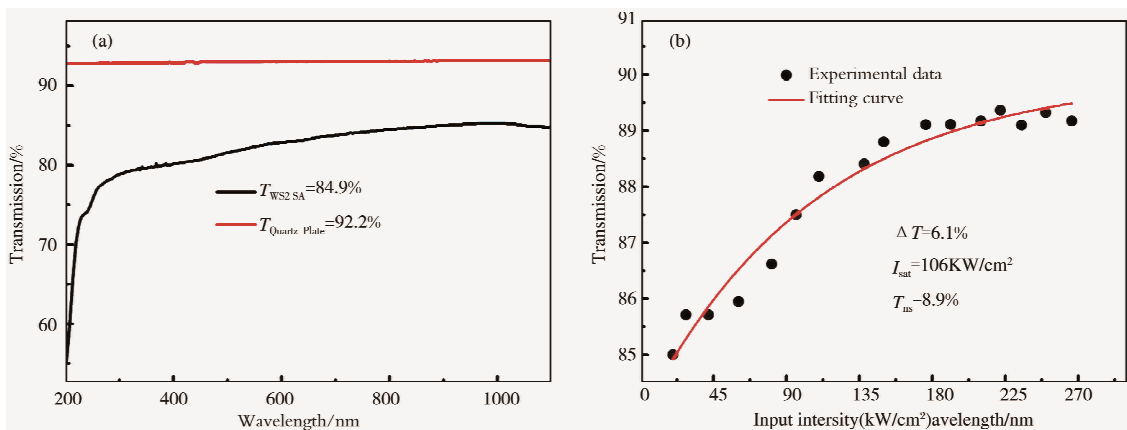


图 2 (a) WS_2 -SA 的线性透射光谱图 (b) 其非线性传输特性

2 被动调 Q 激光器原理图

图3为被动调Q激光器的结构示意图. 泵浦源的最大功率为30 W, 耦合光纤的芯径为200 μm 、数值孔径为0.22, 光学聚焦系统由两个曲率比为1:2的聚焦透镜组成, 泵浦光聚焦到晶体的光斑的直径为400 μm . 整个激光器由双色镜 M1 和输出镜 M2 两个腔镜组成. 双色镜 M1 分别镀有中心波长为808 nm 的高透射膜和1064 nm 的高反射膜. M2 输出耦合器, 其曲率半径 $R = 100 \text{ mm}$, 在中心波长为1064 nm 的激光的透过率为9%. 增益介质是掺 Nd^{3+} 浓度为0.7% 的 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶体(规格为:3 mm \times 3 mm \times 10 mm), 为了使晶体充分地散热, 我们将晶体固定在铜支座上, 通过水冷机使其保存在16 $^{\circ}\text{C}$.

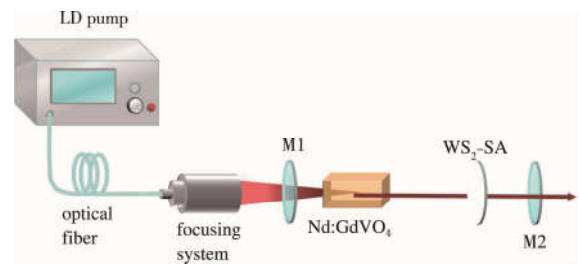


图3 端泵 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 被动调 Q 激光器的结构示意图

3 实验结果

图4(a)为激光器输出功率随输入泵浦功率增加的曲线图. 当没有将SA插入到腔中时, 随着泵浦功率的增加, 输出的连续光(Continuous wave CW)的功率增加, 其出光阈值为2.1 W, 斜效率为49.1%. 当插入SA时, 随着泵浦功率的增加, 在3.7 W处出现激光, 当增加到4 W时出现稳定的调Q脉冲(Q-switched QS). 随着泵浦功率的增加, 输出功率增加, 当泵浦功率增加到5.1 W时, 输出功率为811 mW, 其斜效率为36.3%, 光光转换效率为15.6%. 然而继续增加功率, 输出的脉冲变得不稳定, 这可能是由于吸收体的损伤以及热量导致激光脉冲不能稳定输出.

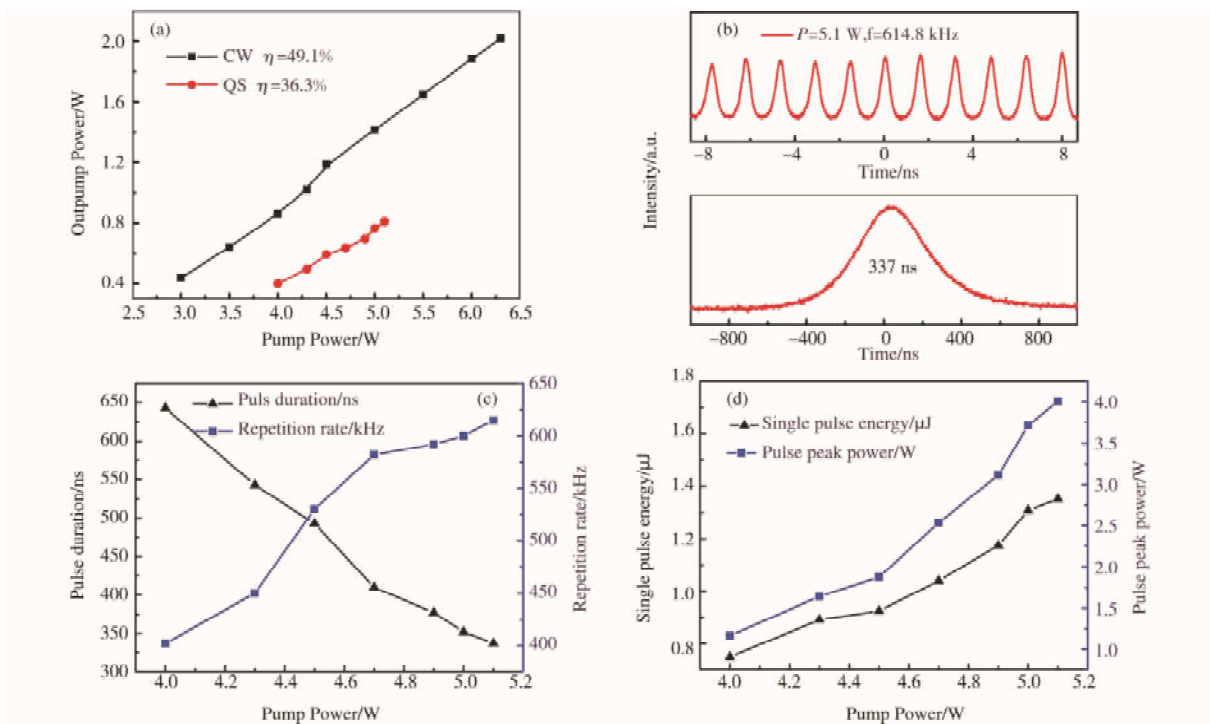


图4 被动调 Q 激光结果:(a) 平均输出功率;(b) 当泵浦功率为 5.1 W 时输出的最窄单脉冲及其对应的脉冲序列;
(c) 脉冲宽度和重复频率随泵浦功率的变化;(d) 单脉冲能量和峰值功率随泵浦变化

当泵浦功率为5.1 W时, 调Q激光器的脉冲序列如图4(b)所示, 相应的输出单脉冲的脉宽为337 ns. 随泵浦功率的增加, 单脉冲能量和峰值功率都呈现出很明显的增长趋势. 尤其是, 与泵浦功率成正比增长的峰值功率证实了所得激光模式属于被动调Q而非弛豫振荡脉冲持续时间或重复率与泵功率的关系如图4(c)所示. 一般来说, 随着泵浦功率的增加, Q开关脉冲的重复频率从402 kHz持续增加到614.8 kHz, 而单脉冲持续时间从643 ns减少到337 ns. 单脉冲能量和峰值功率与泵功率的关系如图4(d)所示, 最大单脉冲能量为1.32 μJ , 最大峰值功率为3.91 W.

4 结论

本文详细地介绍了 LB 技术制备 WS_2 -SA 过程,通过 SEM 和拉曼光谱表征证明 WS_2 -SA 表面形貌均匀.将 WS_2 -SA 插入 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 激光器腔中,我们获得了稳定的调 Q 激光器工作,最大平均输出功率为 811 mW,最短脉冲持续时间为 337 ns.

参 考 文 献

- [1] Sirota M, Galun E, Sashchiuk A, et al. IV-VI semiconductor nanocrystals for passive Q-switching of eye-safe laser[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2003, 4970: 53-60.
- [2] Keller U, Miller D A B, Boyd G D, et al. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers-An antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber[J]. Optics Letters, 1992, 17(7): 505-507.
- [3] 曾飞, 高世杰, 伞晓刚, 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.
- [4] 公爽, 田金荣, 李克轩, 等. 新型二维材料在固体激光器中的应用研究进展[J]. 中国光学, 2018, 56(1): 24-36.
- [5] 高子叶, 朱江峰, 公爽, 等. 基于二硫化钨可饱和吸收体双波长被动调 Q Yb:GdYSiO₅ 激光器(英文)[J]. 光子学报, 2018, 47(10): 14-22.
- [6] 杨西光, 王勇刚, 王江, 等. 9 W 级高功率 SESAM 锁模 Nd:YVO₄ 激光器[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2018, 31(4): 30-35.
- [7] 王茜, 王勇刚, 段丽娜, 等. LD 侧面泵浦半导体可饱和吸收镜被动锁模激光器[J]. 光子学报, 2015, 44(7): 35-41.
- [8] 薛军, 令维军. 基于快速半导体可饱和吸收镜的高功率锁模皮秒掺钛蓝宝石激光器[J]. 激光杂志, 2017(7): 115-120.
- [9] Laroche M, Gilles H, Girard S, et al. Nanosecond pulse generation in a passively Q-switched Yb-doped fiber laser by Cr³⁺:YAG saturable absorber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(6): 764-766.
- [10] Chen Z D, Wang H Y, Wang Y G, et al. Improved optical damage threshold graphene Oxide/SiO₂ absorber fabricated by sol-gel technique for mode-locked erbium-doped fiber Lasers[J]. Carbon, 2019, 144: 737-744.
- [11] Kim J, Kim K S, Ryu S Y, et al. Degradation of optical properties of a film-type single-wall carbon nanotubes saturable absorber (SWNT-SA) with an Er-doped all-fiber laser[J]. Opt Express, 2012, 20: 12966-12974.
- [12] Lv R D, Chen Z D, Liu S C, et al. Optical properties and applications of molybdenum disulfide/SiO₂ saturable absorber fabricated by sol-gel technique[J]. Opt Express, 2019, 27: 6348-6356.
- [13] Su-Jin S, Yong S, Hyun L, et al. Dose- and time-dependent cytotoxicity of layered black phosphorus in fibroblastic cells[J]. Nanomaterials, 2018, 8(6): 408-412.
- [14] Jiang G, Miao L, Yi J, et al. Ultrafast pulse generation from erbium-doped fiber laser modulated by hybrid organic-inorganic halide perovskites[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(16): 161111-161118.
- [15] Jhon Y I, Koo J, Anasori B, et al. Metallic MXene saturable absorber for femtosecond mode-locked lasers[J]. Advanced Materials, 2017, 29: 1702496.
- [16] Li L, Lv R D, Wang J, et al. Optical nonlinearity of ZrS₂ and applications in fiber laser[J]. Nanomater, 2019, 9: 315-321.
- [17] Kong B S, Geng J, Jung H T. Layer-by-layer assembly of graphene and gold nanoparticles by vacuum filtration and spontaneous reduction of gold ions[J]. Chemical Communications, 2009(16): 2174-2180.
- [18] Berger C. Electronic confinement and coherence in patterned epitaxial graphene[J]. Science, 2006, 312(5777): 1191-1196.
- [19] Tung V C, Allen M J, Yang Y, et al. High-throughput solution processing of large-scale graphene[J]. Nature Nanotechnology, 2009, 4(1): 25-34.
- [20] Langmuir I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids [J]. Am Chem Soc, 1917, 183: 102-105.
- [21] Blodgett, Katharine B. Films built by depositing successive monomolecular layers on a solid surface[J]. Journal of the American Chemical Society, 1935, 57(6): 1007-1022.
- [22] Li X, Zhang G, Bai X, et al. Highly conducting graphene sheets and Langmuir-Blodgett films[J]. Nature Nanotechnology, 2008, 3(9): 538-542.
- [23] Azad I, Ram M K, Goswami D Y, et al. Fabrication & characterization of ZnO Langmuir-Blodgett films and its use in Metal-Insulator-metal tunnel diode[J]. Langmuir, 2016, 315: 6b02182.
- [24] Wang X, Wang Y G, Gu Y, et al. Titanium dioxide langmuir-blodgett film saturable absorber for passively q-switched Nd:GdVO₄ laser[J]. IEEE Photonics J, 2019, 11: 1501110.
- [25] Tao A, Kim F, Hess C, et al. Langmuir blodgett silver nanowire monolayers for molecular sensing using surface-enhanced raman spectroscopy[J]. Nano Letters, 2003, 3(9): 1229-1233.
- [26] Wang J, Wang Y G, Yang X, et al. Reflective Langmuir-Blodgett molybdenum disulfide saturable absorber for Q-switched Nd:GdVO₄ laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018(99): 1-7.

The Progress of Research on the Relationship between Intestinal Microbes and Neurological Diseases, Osteoporosis

YIN Xiao-han ZHANG Ning ZHANG Rui-yan LIU Chun-hong
JIN Li WANG Zheng-ping

(Institute of Biopharmaceutical Research, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract Intestinal microorganisms not only regulate intestinal homeostasis, but also play an important role in the microbial-intestinal-brain axis system. It is closely related to multiple sclerosis, Parkinson's disease and Alzheimer's disease. In addition, the intestinal immune barrier, which is closely related to the occurrence and development of osteoporosis, affects the bone metabolism. Therefore, studying the relationship between microbial-intestinal-brain axis and different neurological diseases, microbial-intestinal immunity-osteoporosis, will help us to have a further clarification to the microbial-intestinal-brain axis in pathogenesis which is not clear. This study reviews the relationship between intestinal microbial and neurological diseases, osteoporosis. And summarizes recent research progress, and builds a bridge between gut microbes and neurological diseases, osteoporosis. This will provide new ideas to treat neurological diseases and osteoporosis.

Key words intestinal microbes; microbes-intestinal-brain axis; nervous system pathology; intestinal immunity; osteoporosis

(上接第 18 页)

Langmuir-Blodgett Tungsten Disulfide Saturable Absorber for Q-switched Solid State Laser

WANG Jiang WANG Tai-jin LIU Si-cong WANG Yong-gang

(School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract Tungsten disulfide saturable absorber by Langmuir-Blodgett (LB) methods for passively Q-switched Nd:GdVO₄ laser was studied. Tungsten disulfide sheets with controllable thicknesses were deposited on quartz plate using LB method. By inserting tungsten disulfide saturable absorber into the Nd:GdVO₄ laser linear cavity, the laser pulses with the pulse duration of 337 ns, the repetition frequency of 614.8 kHz, the average output power of 811 mW, and the slop efficiency of 36.1% were obtained.

Key words Langmuir-Blodgett technology; Tungsten disulfide; saturable absorber; passive Q-switched laser