

## 基于金纳米笼和 MoS<sub>2</sub> 的 1 123 nm 被动调 Q Nd: YAG 激光器

张 斌<sup>1</sup>, 李 颖<sup>2</sup>, 刘丙海<sup>1</sup>

(1. 山东大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250100;  
2. 山东交通技师学院, 山东 临沂 276021)

**摘 要:** 采用电流置换反应成功制备了金纳米笼溶液并首次验证了其在 1123 nm 处的非线性饱和吸收特性, 作为对比, 同样制备了 MoS<sub>2</sub> 饱和吸收体。分别将金纳米笼和 MoS<sub>2</sub> 作为饱和吸收体, 实现了中心波长为 1 123 nm 的 Nd: YAG 激光器的调 Q 运转。在 MoS<sub>2</sub> 为饱和吸收体的调 Q 激光器中, 当泵浦功率为 6.81 W 时, 得到的最大平均输出功率为 208 mW, 最短脉冲宽度为 412 ns, 最大脉冲重复率为 233 kHz。在金纳米笼为饱和吸收体的调 Q 激光器中, 当泵浦功率为 6.04 W 时, 得到的最大平均输出功率为 221 mW, 最短脉冲宽度为 253 ns, 最大脉冲重复率为 326 kHz。与 MoS<sub>2</sub> 调 Q 激光器的实验结果相比, 金纳米笼调 Q 激光器获得的输出功率和效率更高, 脉冲宽度更窄, 重复率更高。结果证明了金纳米笼在近红外波段激光器中用作饱和吸收体的巨大潜力。

**关键词:** 金纳米笼; MoS<sub>2</sub>; 饱和吸收体; 被动调 Q; Nd: YAG 激光器

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200084

## 1 123 nm passively Q-switched Nd: YAG laser based on gold nanocages and MoS<sub>2</sub> saturable absorbers

Zhang Bin<sup>1</sup>, Li Ying<sup>2</sup>, Liu Binghai<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China;  
2. Shandong Traffic Technician College, Linyi 276021, China)

**Abstract:** Gold nanocages (GNCs) were successfully prepared by seed-mediated method and its nonlinear saturated absorption characteristic at 1123 nm was verified for the first time. As a comparison, a MoS<sub>2</sub> saturated absorber was prepared. Based on GNCs and MoS<sub>2</sub> as saturable absorber (SA), respectively, passively Q-switched Nd: YAG lasers at 1 123 nm were demonstrated. When Q-switched laser with MoS<sub>2</sub> as SA, Q-switched pulse with the shortest pulse duration of 412 ns and maximum pulse repetition rate of 233 kHz was achieved under the pump power of 6.81 W with the maximum average output power of 208 mW. When Q-switched laser with GNCs as SA, Q-switched pulse with the shortest pulse duration of 253 ns and maximum pulse repetition rate of 326 kHz was achieved under the pump power of 6.04 W with the maximum average output power of 221 mW. Compared with the experimental results of MoS<sub>2</sub> Q-switched laser, the gold nanocage Q-switched laser has higher output power and efficiency, narrower pulse width and higher repetition rate. These results indicate a great potential of the GNCs film as SA in the near-infrared region.

**Key words:** gold nanocages; MoS<sub>2</sub>; saturable absorber; passively Q-switched; Nd: YAG laser

## 0 引言

Nd:YAG 晶体因其优异的光学和机械性能、易于制造、成本低等优点,依然是目前应用最广泛的固体激光介质。但其研究主要集中于 946 nm、1 064 nm 和 1 319 nm 波长的激光器上,而 1 123 nm 的激光发射也是一个重要的跃迁。1 123 nm 激光器可作为铥上转换光纤激光器的泵浦源产生蓝色激光<sup>[1]</sup>,也可通过倍频产生 561 nm 的黄绿光,黄绿光在医学治疗、生物荧光成像和全息存储等领域具有重要的应用价值<sup>[2]</sup>。1978 年 J. Marling 第一次利用 Nd:YAG 晶体产生了 1 123 nm 的激光<sup>[3]</sup>。2009 年 S. S. Zhang 等人利用 Nd:YAG 陶瓷作为增益介质,实现了平均输出功率为 10.8 W 的 1 123 nm 连续激光器<sup>[4]</sup>。2010 年 C. Y. Li 等人采用侧面泵浦方式,同样用 Nd:YAG 陶瓷作为增益介质,将 1 123 nm 连续激光器的平均输出功率提高到了 219.3 W<sup>[5]</sup>。在 1 123 nm 调 Q 激光器方面,2004 年 Y. F. Chen 等人首次采用声光调制方式实现了 1 123 nm 主动调 Q Nd:YAG 激光器<sup>[6]</sup>。2011 年 Y. Tang 等人通过优化腔型结构,实现了 1 123 nm 高效率声光调 Q Nd:YAG 陶瓷激光器,光光转换效率高达 34.2%,斜效率更是达到了 39.1%<sup>[7]</sup>。

被动调 Q 固体激光器由于具有结构简单、成本低廉、效率高等优点,在机械加工、遥感、生物医学、军事科学等领域得到了广泛的应用<sup>[8]</sup>。饱和吸收体(SA)作为被动调 Q 激光器的关键,其性能直接影响激光器输出脉冲的质量。目前为止,已经应用到 1 123 nm 波段激光器中的饱和吸收体材料有 Cr:YAG、InGaAs 量子阱、石墨烯、单层碳纳米管、金纳米三角片、WS<sub>2</sub> 等<sup>[9-15]</sup>。近些年来,新型二维材料因其恢复时间快、工作波段宽、调制深度高、饱和吸收阈值低等优异的光学性能吸引了许多研究者的注意,被认为是一种理想的 SA 材料<sup>[16]</sup>。作为一个重要的代表,金纳米材料(GNPs)由于具有超快的动态载流子、灵活可调的吸收谱线和高的三阶非线性系数等特性而备受关注,并已在实验中证实了其作为 SA 材料的巨大潜力。众所周知,金纳米结构的物理和化学性质与它们的尺寸和形状密切相关,因此研究者可以很方便的改变它们的性能<sup>[17]</sup>。2016 年, H. N. Zhang 等人报道了金纳米双锥(GNBPs)为 SA 的全固态被动调 Q 激光器,在 1.1 μm 波段实现了脉冲宽度为 396 ns、重复

率为 90.6 kHz 的脉冲输出,获得的最大单脉冲能量为 1.67 μJ<sup>[18]</sup>。2017 年, T. Song 等人将金纳米棒(GNRs)作为 SA,设计了运行在 1 064.3 nm 和 1 112 nm 双波长的被动调 Q Nd:YAG 激光器,获得的最大单脉冲能量分别为 0.337 μJ (1 064 nm) 和 1.18 μJ (1 112 nm),证明了 GNRs 在 1.1 μm 波段作为 SA 的能力<sup>[19]</sup>。同年 J. X. Bai 等人报道了基于金纳米三角片(GNTs)的分别运行在 1 064 nm 和 1 123 nm 两个波长的 Nd:YAG 被动调 Q 固体激光器,在 1 123 nm 波段激光器中,实现了脉冲宽度为 231 ns、重复率为 457 kHz 的脉冲输出,获得的最大单脉冲能量分别为 0.706 μJ (1 064 nm) 和 0.376 μJ (1 123 nm)<sup>[14]</sup>。2018 年 L. L. Wang 等人成功制备了金纳米笼复合二氧化硅(GNCs/SiO<sub>2</sub>)饱和吸收体并实现了 1 064.3 nm 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 被动调 Q 固体激光器,获得的最大单脉冲能量为 0.538 μJ<sup>[20]</sup>。在这些金纳米材料中,金纳米笼(GNCs)以其独特的光电特性而受到特别关注,其立方体结构决定了它的吸收横截面积较大,同时扩大了与空气的接触面积,具有优良的散热性能和很高的损伤阈值,因此可在高功率泵浦激光器中实现稳定的脉冲输出。同时,通过改变 GNCs 的尺寸和外壁厚度可以很灵活地将纵向表面等离子体共振(LSPR)峰从可见光调谐到近红外区<sup>[21]</sup>。

文中成功制备了金纳米笼饱和吸收体(GNCs-SA)并首次在 Nd:YAG 激光器中验证了其在 1123 nm 处的非线性吸收特性,作为对比,同样制备了 MoS<sub>2</sub> 饱和吸收体(MoS<sub>2</sub>-SA)应用于同一个激光器中。在输出镜透过率为 12% 的激光器中,以 GNCs 为 SA 时,在最大泵浦功率 6.04 W 下,得到最大平均输出功率为 221 mW、最窄脉冲宽度为 253 ns、重复率为 326 kHz 的脉冲。而以 MoS<sub>2</sub> 为 SA 时,在最大泵浦功率 6.81 W 下,得到最大平均输出功率为 208 mW、最窄脉冲宽度为 412 ns、重复率为 233 kHz 的脉冲。

## 1 金纳米笼饱和吸收体的制备与表征

实验中通过电流置换反应制备金纳米笼<sup>[22]</sup>。首先用多元醇法预制银纳米立方体溶液,取 50 mL 的乙二醇((CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub>)和 0.6 mL 浓度为 3 mM 的硫化氢钠(NaHS)乙二醇溶液加入到烧杯中,在油浴中将其加热到 150 °C,搅拌两分钟后依次加入 5 mL 浓度为 3 mM 的盐酸(HCl)溶液和 12.5 mL 浓度为 20 mg/mL

的聚乙烯吡咯烷酮 (PVP, 分子质量约为 58 000) 乙二醇溶液。待混合溶液反应 2 min 后, 注入 4 mL 浓度为 282 mM 的三氟乙酸银 ( $C_2AgF_3O_2$ ) 乙二醇溶液, 连续搅拌 90 min 后, 用丙酮 ( $CH_3COCH_3$ ) 洗涤一次, 超纯水洗涤两次就得到了银纳米立方体溶液, 其透射电子显微镜 (TEM) 成像如图 1(a) 所示。接下来通过置换反应获得金纳米笼, 先将 100 mL 浓度为 1 mg/mL 的 PVP 乙二醇溶液置于另一个烧杯中并加热至 100 °C, 之后加入 2 mL 刚制备好的银纳米立方体溶液, 静置 10 min 后, 用注射泵以 2 mL/min 的流速注入 20 mL 浓度为 0.1 mM 的氯金酸 ( $HAuCl_4$ ) 溶液, 待混合溶液充分反应后将其冷却至室温, 然后缓慢加入 1 mL 的氨水 ( $NH_3 \cdot H_2O$ ) 以除去反应产生的氯化银 ( $AgCl$ ), 最后经超纯水洗涤三次后, 重新将其分散到 5 mL 的超纯水中就得到了最终的金纳米笼, 图 1(b) 为 GNCs 的 TEM 成像。可看出其结构是内部中空、外壁多孔的立方体, 但尺寸略有差异, 经计算, 其平均尺寸约为 62.53 nm。利用紫外-近红外分光光度计 (U4100, 185~3 300 nm) 测得 GNCs 溶液的吸收光谱如图 1(c) 所示, 可以看出其横向 SPR 峰位于可见光波段, 纵向

SPR 峰值位于 1.06  $\mu m$ , 同时覆盖到了实验所用的 1 123 nm 波长。

将 GNCs 溶液均匀涂覆到 K9 玻璃片上, 在室温下自然风干, 如此重复三次, GNCs-SA 便制备完成。实验中所用的  $MoS_2$  同样采用人工涂覆的方式制备出  $MoS_2$ -SA 薄膜。借助皮秒脉冲光纤激光器, 利用开孔 Z 扫描的方法测量 GNCs 在不同光强下的透过率<sup>[23]</sup>, 其结果如图 2 所示。用指数方程  $y = A_1 \times \exp(-x/t_1) + y_0$  进行数据拟合可得 GNCs-SA 的调制深度  $A_1$  和饱和吸收光强  $t_1$  分别为 5.3% 和 1.1  $mW/cm^2$ 。

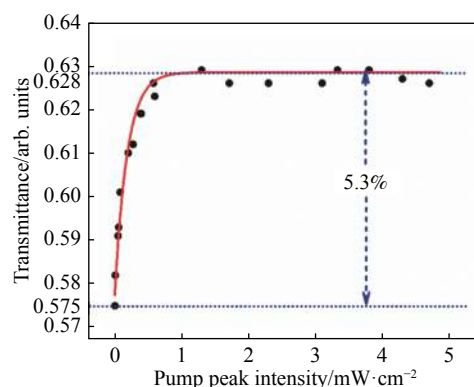


图 2 金纳米笼的非线性光学特性

Fig.2 Nonlinear optical properties of the as-prepared GNCs SA

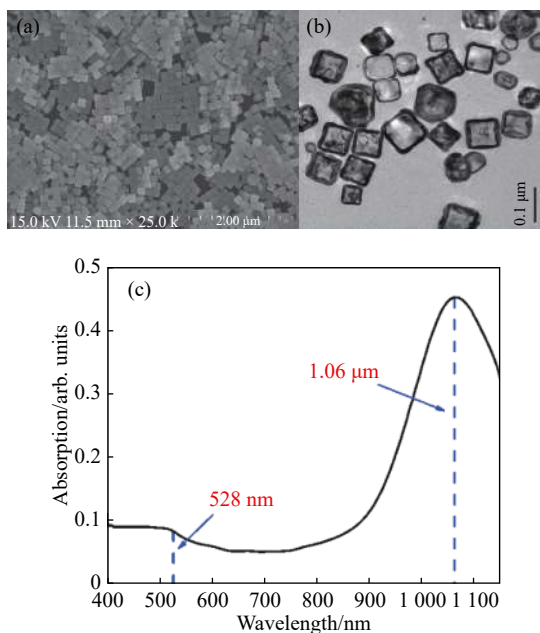


图 1 (a) 2  $\mu m$  比例尺下银纳米立方体的 TEM 成像; (b) 0.1  $\mu m$  比例尺下金纳米笼的 TEM 成像; (c) 金纳米笼的吸收光谱

Fig.1 (a) TEM images of the silver nanocubes with a scale bar of 2.0  $\mu m$ ; (b) TEM image of the GNCs with a scale bar of 0.1  $\mu m$ ; (c) Absorption spectrum of the GNCs

## 2 实验结果与讨论

实验设计了一个简易的 Nd:YAG 激光器来研究 GNCs-SA 和  $MoS_2$ -SA 的饱和吸收性, 实验装置如图 3 所示。谐振腔采用平凹腔设计, 腔长为 25 mm。泵浦源采用 808 nm 的光纤耦合激光二极管 (LD,  $NA=0.22$ ,  $d_{core}=400 \mu m$ ) 激光器, 泵浦光通过 1:1 的耦合系统后聚焦到激光晶体的端面处。曲率半径为 1 000 mm 的平凹镜作为输入镜 (M1), 镜面一侧镀有对 808 nm 的高透膜和 1 020~1 130 nm 的高反膜 ( $R>99.8\%$ )。Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度为 1 at.% 的 Nd:YAG 晶体作为增益介质, 其形状为  $\Phi 4 \times 10 \text{ mm}^3$  的圆柱体, 晶体的两个端面均镀有对 808 nm 和 1 123 nm 的增透膜, 经铝箔包裹后置于铜块内, 并通过水冷系统使其温度始终维持在 20 °C。将制备好的 GNCs-SA 和  $MoS_2$ -SA 放置在尽可能靠近输出镜的地方, 对 1 123 nm 光透过率为 12% 的平面镜 (M2) 作为耦合输出镜, 同时为了防止 Nd:YAG 晶体跃迁谱线中其他波长的起振,

M2 镜面两侧均镀有对 946 nm、1 064 nm 和 1.3 μm 的增透膜 ( $T>98\%$ )。激光器的输出功率通过探头 (Molecron, EPM10) 和功率计 (Molecron, EPM2000) 的组合进行测量, 1 GHz InGaAs 探测器 (New Focus) 和数字示波器 (Infiniium DSO90804A, 8 GHz bandwidth, 40 G samples/s) 组合用来测量脉冲的时域特性, 光谱分析仪 (Yokogawa, AQ6315A, 350~1 750 nm) 测量激光器的输出光谱。

首先, 实验研究了没有加入 SA 时 Nd:YAG 激光器在连续运转情况下的输出特性, 不同泵浦功率下的输出功率如图 4(a) 所示。可看出激光器阈值功率为

2.06 W, 随着泵浦功率增高, 输出功率线性增长, 光光转换效率为 24.9%。输出光谱如图 4(a) 插图中所示, 中心波长为 1 123 nm, 实验中没有观测到其他波长的光。

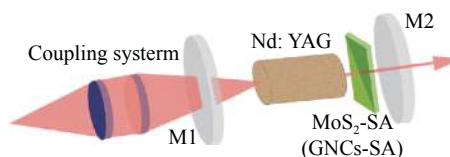


图 3 金纳米笼 (MoS<sub>2</sub>) 为饱和吸收体的 Nd:YAG 被动调 Q 激光器实验装置图

Fig.3 Schematic of diode-pumped GNCs-SA (MoS<sub>2</sub>) Q-switched Nd:YAG laser

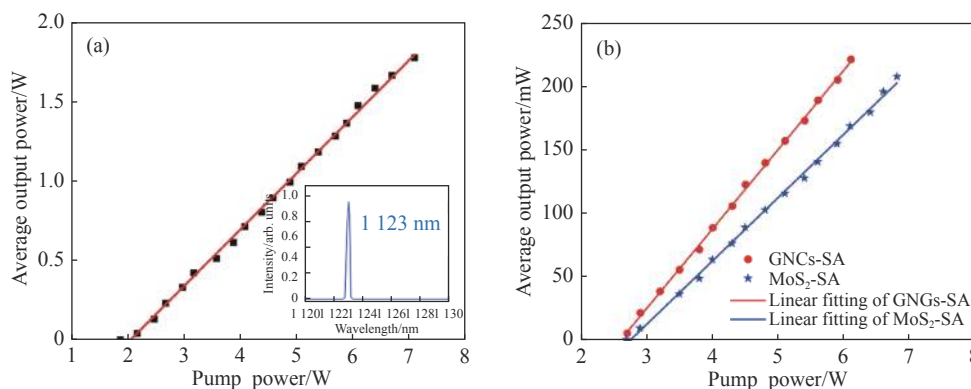


图 4 Nd:YAG 激光器在 (a) 连续运转和 (b) 调 Q 时输出功率与泵浦功率的关系曲线, 插图为输出光谱

Fig.4 Output power characteristics versus pump power of the (a) CW and (b) Q-switched Nd:YAG lasers. Inset of (a): Emission spectrum

随后分别将 MoS<sub>2</sub>-SA 和 GNCs-SA 插入到谐振腔中研究 Nd:YAG 被动调 Q 激光器的输出特性, 图 4(b) 为输出功率随泵浦功率变化的关系图。当 MoS<sub>2</sub> 作为饱和吸收体时, 调 Q 激光器的阈值功率为 2.73 W, 获得的最大输出功率为 208 mW, 此时泵浦功率为 6.81 W, 对应的光光转换效率和斜效率分别为 3% 和 5.1%。而当 GNCs 作为饱和吸收体时, 调 Q 激光器阈值为 2.61 W, 泵浦功率达到 6.04 W 时获得最大输出功率 221 mW, 相应的光光转换效率和斜效率分别为 3.6% 和 6.4%。由于插入饱和吸收体引入了较大的损耗, 所以调 Q 激光器相较于连续激光器的阈值功率升高, 效率也随之减小。而将两种饱和吸收体对比来看, GNCs-SA 相较于 MoS<sub>2</sub>-SA 阈值功率更低, 且效率更高, 因此更具优势。

调 Q 激光器输出脉冲的脉冲宽度和重复率随泵浦功率的变化情况如图 5 所示。对于两种不同的

SA 材料, 脉冲宽度均随着泵浦功率的增大而减小, 而脉冲重复率增大, 符合典型的被动调 Q 特征。当 MoS<sub>2</sub> 作为饱和吸收体时, 随着泵浦功率从 3.08 W 增加到 6.81 W, 脉冲宽度由 971 ns 减小到 412 ns, 而重复率由 85 kHz 增加到 233 kHz。泵浦功率达到 6.81 W 时, 得到最短的脉冲宽度为 412 ns, 最大脉冲重复率为 233 kHz, 此时的单脉冲波形和脉冲序列如图 6(a) 所示。此时获得的最大单脉冲能量为 0.892 μJ, 最高峰值功率为 2.12 W。而当 GNCs 作为饱和吸收体时, 随着泵浦功率从 2.97 W 增加到 6.04 W, 脉冲宽度从 623 ns 减小到 253 ns, 而重复率由 138 kHz 增加到 326 kHz。泵浦功率达到 6.04 W 时, 得到最短的脉冲宽度为 253 ns, 最大脉冲重复率为 326 kHz, 此时的单脉冲波形和脉冲序列如图 6(b) 所示。当泵浦功率为 5.79 W 时, 获得的最大单脉冲能量为 0.723 μJ, 当泵浦功率为 6.04 W 时, 获得的最高峰值功率为 2.68 W。



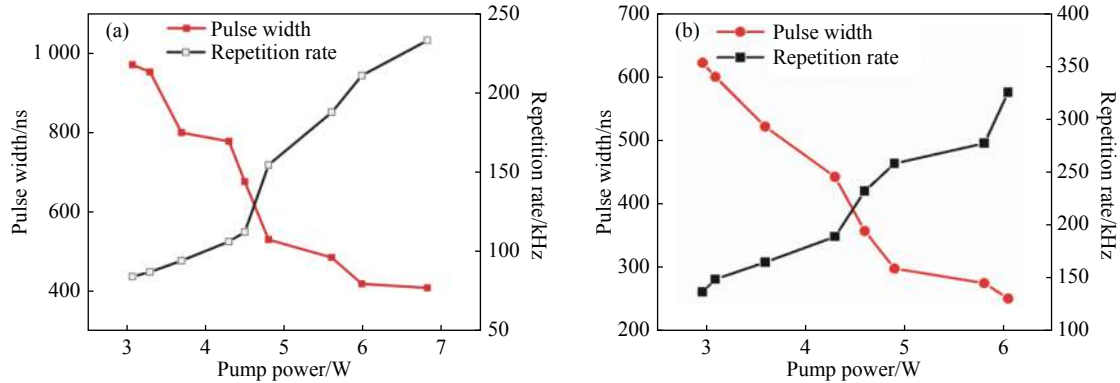


图 5 饱和吸收体为 (a) MoS<sub>2</sub> 和 (b)GNCs 时脉冲宽度和重复频率随泵浦功率的变化关系

Fig.5 Change of pulse repetition rate and pulse width versus pump power at (a) MoS<sub>2</sub>-SA and (b) GNCs-SA

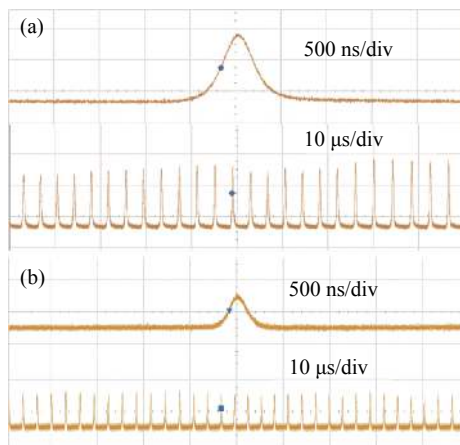


图 6 饱和吸收体为 (a) MoS<sub>2</sub> 和 (b)GNCs 时获得的单脉冲波形和脉冲序列

Fig.6 Single pulse profiles and pulse trains of (a) MoS<sub>2</sub>-SA and (b) GNCs-SA Q-switched Nd:YAG lasers

GNCs-SA 相较于 MoS<sub>2</sub>-SA, 获得的脉冲宽度更窄, 脉冲重复率更高, 因此更适合用于饱和吸收体。

### 3 结 论

实验成功制备了金纳米笼饱和吸收体并首次将其应用于 1 123 nm 波段 Nd:YAG 被动调 Q 激光器中, 同时制备了 MoS<sub>2</sub> 饱和吸收体作为对比。在输出镜透过率为 12% 的 Nd:YAG 激光器中, 当 MoS<sub>2</sub> 作为饱和吸收体时, 获得的最大平均输出功率为 208 mW, 最短脉冲宽度 412 ns, 对应的重复频率 233 kHz; 在 GNCs 作为饱和吸收体的调 Q 激光器中, 获得的最大平均输出功率为 221 mW, 最短脉冲宽度 253 ns, 对应的重复率为 326 kHz。实验结果证明了金纳米笼相较于 MoS<sub>2</sub> 在 1.1 μm 波段激光器中具有更好的饱和吸

收特性, 是一种极具潜力的饱和吸收材料。

### 参考文献:

- [1] Booth I J, Archambault J L, Ventrudo B F. Photodegradation of near-infrared-pumped Tm<sup>3+</sup>-doped ZBLAN fiber upconversion lasers [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(5): 348-350.
- [2] Gao J, Dai X J, Zhang L, et al. All-solid-state continuous-wave yellow laser at 561 nm under in-band pumping [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(1): 95-98.
- [3] Marling J. 1.05-1.44 μm tunability and performance of the CW Nd<sup>3+</sup>: YAG laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1978, 14(1): 56-62.
- [4] Zhang S S, Wang Q P, Zhang X Y, et al. Continuous-wave ceramic Nd: YAG laser at 1123 nm [J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 6(12): 864-867.
- [5] Li C Y, Bo Y, Xu Y T, et al. 219.3 W CW diode-side-pumped 1123 nm Nd: YAG laser [J]. *Optics Communications*, 2010, 283: 2885-2887.
- [6] Chen Y F, Lan Y P, Tsai S W. High-power diode-pumped actively Q-switched Nd: YAG laser at 1123 nm [J]. *Optics Communications*, 2004, 234(1-6): 309-313.
- [7] Tang Y, Zhang X Y, Wang Q P, et al. High-efficiency diode-pumped acousto-optically Q-switched 1123 nm ceramic Nd: YAG laser [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(4): 695-699.
- [8] Koechner W. Solid-State Laser Engineering[M]. 6th ed. New York: Springer, 2006: 488-533.
- [9] Chen Y F, Lan Y P. Diode-pumped passively Q-switched Nd: YAG laser at 1123 nm [J]. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2004, 79: 29-31.
- [10] Li P, Chen X H, Zhang H N, et al. Diode-pumped passively Q-switched Nd: YAG ceramic laser at 1123 nm with a Cr<sup>4+</sup>: YAG saturable absorber [J]. *Applied Physics Express*, 2011, 4:

- 092702.
- [11] Huang J Y, Liang H C, Su K W, et al. InGaAs quantum-well saturable absorbers for a diode-pumped passively Q-switched Nd: YAG laser at 1123 nm [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(2): 239-243.
- [12] Men S J, Liu Z J, Zhang X Y, et al. A graphene passively Q-switched Nd: YAG ceramic laser at 1123 nm [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10: 035803.
- [13] Gao Y, Zhao T Z, Li C Y, et al. Diode-side-pumped passively Q-switched Nd: YAG laser at 1123 nm with reflective single walled carbon nanotube saturable absorber [J]. *Optics Communications*, 2013, 286: 261-264.
- [14] Bai J X, Li P, Chen X H, et al. Diode-pumped passively Q-switched Nd: YAG ceramic laser with a gold nanotriangles saturable absorber at 1  $\mu\text{m}$  [J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(8): 082701.
- [15] Lin H F, Zhu W Z, Mu R Z, et al. Q-switched dual-wavelength laser at 1116 and 1123 nm using WS<sub>2</sub> saturable absorber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(3): 285-288.
- [16] Mao Mengtao, Chen Jinhui, Ding Zixuan, et al. Pulsed laser based on two-dimensional material optical fiber integrated device and external control (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0803003. (in Chinese)  
毛梦涛, 陈锦辉, 丁梓轩, 等. 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)[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 0803003.
- [17] Burda C, Chen X B, Narayanan R, et al. Chemistry and properties of nanocrystals of different shapes [J]. *Chemical Reviews*, 2005, 105(4): 1025-1102.
- [18] Zhang H N, Liu J. Gold nanobipyramids as saturable absorbers for passively Q-switched laser generation in the 1.1  $\mu\text{m}$  region [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1150-1152.
- [19] Song T, Feng C, Chen X H, et al. Gold nanorods as a saturable absorber for passively Q-switching Nd: YAG lasers at 1064.3 and 1112 nm [J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(5): 055808.
- [20] Wang L L, Chen X H, Bai J X, et al. Au nanocages/SiO<sub>2</sub> as saturable absorbers for passively Q-switched all-solid-state laser [J]. *Materials Research Express*, 2018, 5(4): 045043.
- [21] Wang H, Brandl D W, Nordlander P, et al. Plasmonic nanostructures: artificial molecules [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2007, 40(1): 53-62.
- [22] Skrabalak S E, Chen J, Sun Y, et al. Gold nanocages: synthesis, properties, and applications [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2008, 41(12): 1587-1595.
- [23] Sheik B M, Said A A, Stryland E W V. High-sensitivity, single-beam n<sub>2</sub> measurements [J]. *Optics Letters*, 1989, 14(17): 955-957.



第一作者简介: 张斌(1993-),男,博士生,主要从事调Q锁模激光器及拉曼激光器方面的研究。Email: bin-zhang@mail.sdu.edu.cn