

基于石墨烯量子点与二硫化钼的双被动调 Q 激光器研究

刘海洋, 常建华*, 冯潇潇, 戴腾飞, 石少杭, 戴瑞, 刘俊彤

南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044

摘要 为获得脉冲宽度窄、波形对称性好、输出性能稳定的脉冲激光,设计了一种基于石墨烯量子点与二硫化钼的 1064 nm 双被动调 Q 激光器。该激光器采用结构简单的线形腔结构,以 808 nm LD 为抽运源、Nd:YVO₄ 为增益介质。分别采用水热法和锂离子-插层法获得了石墨烯量子点溶液与二硫化钼溶液。经旋涂、烘干等工艺制备出可饱和吸收体,作为被动调 Q 器件。相比于单被动调 Q 激光器,双被动调 Q 激光器输出的激光脉冲宽度更窄、脉冲波形对称性更好。当抽运功率为 12.9 W 时,实验测到的调 Q 激光脉冲宽度为 180 ns,重复频率为 1085 kHz,信噪比为 44 dB,平均输出功率为 595 mW。

关键词 激光器; 双被动调 Q; 石墨烯量子点; 二硫化钼; 全固态激光器

中图分类号 TN242

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1101001

Research on Double Passively Q-Switched Laser Based on Graphene Quantum Dots and Molybdenum Disulfide

Liu Haiyang, Chang Jianhua*, Feng Xiaoxiao, Dai Tengfei, Shi Shaohang,
Dai Rui, Liu Juntong

*College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology,
Nanjing, Jiangsu 210044, China*

Abstract In order to obtain pulse lasers with narrow pulse width, good waveform symmetry, and stable output performance, a 1064 nm double passively Q-switched laser based on graphene quantum dots and molybdenum disulfide was designed. The laser used a simple linear cavity structure, with 808 nm LD as the pump source and Nd:YVO₄ as the gain medium. Graphene quantum dots and molybdenum disulfide were obtained by hydrothermal method and lithium-ion intercalation method respectively. Saturable absorbers were prepared through spin coating and drying process, which were used as passively Q-switched devices. Compared with the single passively Q-switched laser, the output pulse width of the double passively Q-switched laser was narrower and the pulse waveform symmetry was better. When the pump power was 12.9 W, the pulse width of Q-switched laser was 180 ns, the repetition rate was 1085 kHz, the signal-to-noise ratio was 44 dB, and the average output power was 595 mW.

Key words lasers; double passively Q-switched; graphene quantum dot; disulfide molybdenum; all-solid-state laser

OCIS codes 140.3380; 140.3538; 140.3540; 140.3580

1 引言

全固态、窄脉宽、高重复频率的调 Q 脉冲激光在遥感、通信、医疗和军事等领域有着广泛的应

用^[1-2]。被动调 Q 技术是获得窄脉宽、高重复频率脉冲激光的主要手段,相比于主动调 Q 技术,其具有结构简单紧凑、成本低廉、输出脉宽窄等优点。如何制备出性能优良的可饱和吸收体(SA)是获得窄

收稿日期: 2020-05-13; 修回日期: 2020-06-09; 录用日期: 2020-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(61875089)、江苏省研究生科研与实践创新计划(SJCX19-0308)、江苏省高等学校大学生创新创业训练计划(201910300008Z)

* E-mail: jianhuachang@nuist.edu.cn

脉宽激光输出的前提。早期的 SAs 如半导体可饱和吸收镜 (SESAMs)^[3-7], 其工作稳定、损耗小, 但成本昂贵、制备工艺复杂、恢复时间与调制深度不易控制; 碳纳米管 (CNTs)^[8] 制作方法简单、成本低、响应时间短、工作波段宽, 但其直径参数不可控、管状结构不易吸附成膜, 这些缺点极大地限制了它们在脉冲激光领域的应用。因此, 寻找性能更加优异的新型材料作为被动调 Q 器件已经成为当下的研究热点。

近年来, 随着对新型材料的不断研究, 量子点与二维材料进入人们的研究视野。量子点是一种零维纳米材料^[9-11], 由于量子限制和边缘效应^[12-13], 使其具有独特的光电特性。其中, 石墨烯量子点 (GQDs) 作为典型代表, 其不含镉、铅等有毒金属元素, 结构稳定、耐酸碱、耐光漂白, 通过量子局域化效应和边缘效应, 可在 0~5 eV 的范围内调整带隙宽度, 使波长范围从近红外区扩展到可见光区和深紫外区, 从而满足各种工艺对材料能隙和特征波长的要求。2016 年, Hisyam 等^[14] 将 CdSe 量子点作为被动调 Q 器件应用于光纤激光器中, 产生能量为 0.77 μJ , 脉冲宽度为 3.65 μs 的脉冲激光输出。二硫化钼 (MoS_2) 作为二维过渡金属硫化物中的典型代表, 其具有独特的能带结构, 随着层数的变化, 带隙也会发生相应的改变, 多层的 MoS_2 密度更高, 吸收波段更宽, 尤其是其优异的可饱和吸收特性, 在超快脉冲激光器中有着重要应用^[15-17]。2017 年, 高雅静^[18] 将 MoS_2 -SA 应用于 Nd:GYSGG 固体激光器中, 测得最短脉冲宽度为 833 ns。但由于单被动调 Q 激光器产生的脉冲波形对称性不够好, 脉宽难以压缩^[19], 而双调 Q 激光器可以输出更窄的脉宽、更对称的波形^[20]。2017 年, Wang 等^[21] 将声光调制器 (AOM) 与单层石墨烯可饱和吸收体应用于 Nd:GGG 激光器中, 在抽运功率为 5.5 W、重复频率为 49 kHz 时, 获得的最大输出功率为 279 mW、脉冲宽度为 200 ns, 相较于单被动调 Q 激光器, 实现了脉宽的压缩。但主被动调 Q 激光器体积较大、成本昂贵, 限制了其在激光领域的发展。与主被动调 Q 激光器相比, 双被动调 Q 激光器不需要外部设备, 体积小、成本低, 更有利于固体激光器的小型化、产品化发展^[22]。

本文将 GQDs-SA 与 MoS_2 -SA 作为双被动调 Q 器件应用于全固态激光器中, 实现了脉冲宽度的压缩和波形对称性的优化。分别采用水热法和锂离子-插层法获得了石墨烯量子点溶液与二硫化钼溶

液, 通过离心、旋涂、烘干等工艺制备成可饱和吸收体。利用拉曼光谱、透射光谱对所制备的 GQDs-SA 与 MoS_2 -SA 进行表征分析, 并对其非线性传输特性进行了测量, 调制深度分别为 7.1% 和 8.4%, 饱和强度分别为 25.4 MW/cm^2 和 2.5 MW/cm^2 。当抽运功率为 12.9 W 时, 获得了脉冲宽度为 180 ns、重复频率为 1085 kHz、平均输出功率为 595 mW、信号噪声比为 44 dB 的脉冲激光输出。

2 GQDs-SA 与 MoS_2 -SA 的制备与表征

实验采用水热法制备少层石墨烯量子点 (GQDs) 溶液, 主要由三个步骤组成: 首先将氧化石墨烯热还原为石墨烯片; 然后在浓硫酸和浓硝酸中酸化和氧化得到浓度更高和尺寸更小的衍生石墨烯片; 最后将得到的产物在水热条件下去氧化, 即可得到 GQDs 溶液。采用锂离子-插层法制备少层二硫化钼 (MoS_2) 溶液, 其制备过程如下: 将 MoS_2 粉末和正丁基锂的正己烷溶液混合, 在氩气环境中常温反应 2 天, 过滤收集插层化合物 Li_xMoS_2 , 之后用正己烷溶液洗涤 Li_xMoS_2 , 去除多余的 Li 离子和残留有机物, 放入去离子水中, 与水反应并进行超声剥离, 最后离心洗涤, 得到 MoS_2 纳米片溶液^[23]。将 GQDs 溶液和甲苯按 1:500 的比例在烧杯中进行混合 (GQDs 溶液取 0.1 mL, 甲苯取 50 mL), 取 1 mL 的 MoS_2 纳米片溶液与 10 mL 无水乙醇进行混合, 最终获取了两种混合溶液, 并将它们分别放置于超声池中超声 2.5 h, 取出超声后的 GQDs 混合溶液与 MoS_2 混合溶液, 先后在转速为 1200 r/min 的离心机中离心 20 min, 除去部分杂质, 分别取适量上清液滴至 15 mm \times 15 mm 的方形石英片进行旋涂, 并通过加热平台烘干, 即可得到 GQDs-SA 与 MoS_2 -SA。

为检测 GQDs-SA 与 MoS_2 -SA 的相关特性, 实验通过拉曼光谱技术对其进行表征, 如图 1(a) 和 (b) 所示。图 1(a) 中的拉曼散射光谱显示了由 sp² 杂化碳中的无序引起的 1366 cm^{-1} 处的 D 带, 以及与石墨结构相对应的 1595 cm^{-1} 处的 G 带; 图 1(b) 显示 MoS_2 -SA 在 385.8 cm^{-1} 和 409.1 cm^{-1} 处分别观察到 E_{2g}^1 和 A_{1g} 两个特征峰, 之间的峰位差为 23.3 cm^{-1} , 与块体 MoS_2 相比, E_{2g}^1 峰出现红移 (5.8 cm^{-1}), A_{1g} 峰出现蓝移 (0.9 cm^{-1}), 可以得知所制备的 MoS_2 -SA 具有少层结构。图 2(a) 和 (b) 是使用分光光度计 (Perkin Elmer Lambda 950) 测出的 GQDs-SA 和 MoS_2 -SA 样品的透射率图, 从可

见光到近红外波段透射率整体较为平坦,在 1064 nm 处,GQDs-SA 的透射率为 91.82%,线性损失为 8.18%,MoS₂-SA 的透射率为 90.61%,线性损失为 9.39%。“非线性传输特性”对于可饱和和吸收材料而言是十分重要的光学性质。采用平衡同

步双探测器测量系统测量了 GQDs-SA 与 MoS₂-SA 在石英基片衬底上的非线性传输特性,测量结果如图 3(a)和(b)所示,GQDs-SA 的调制深度约为 7.1%,饱和强度为 25.4 MW/cm²;MoS₂-SA 的调制深度约为 8.4%,饱和强度为 2.5 MW/cm²。

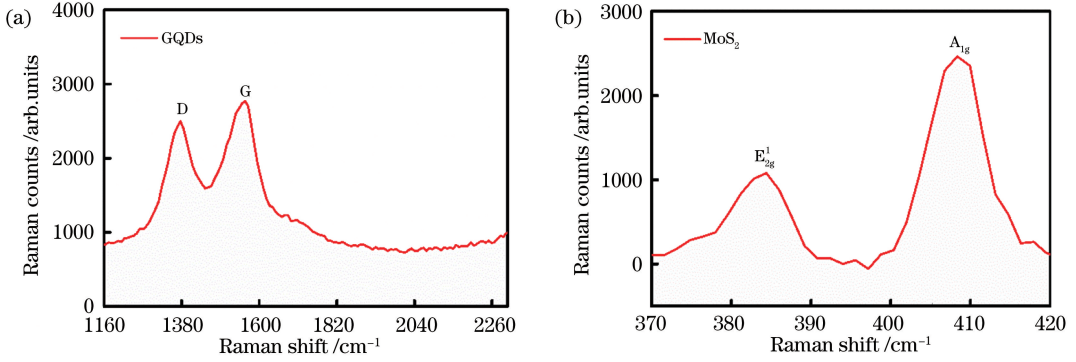


图 1 拉曼光谱图。(a) GQDs-SA;(b) MoS₂-SA

Fig. 1 Raman spectroscopy. (a) GQDs-SA; (b) MoS₂-SA

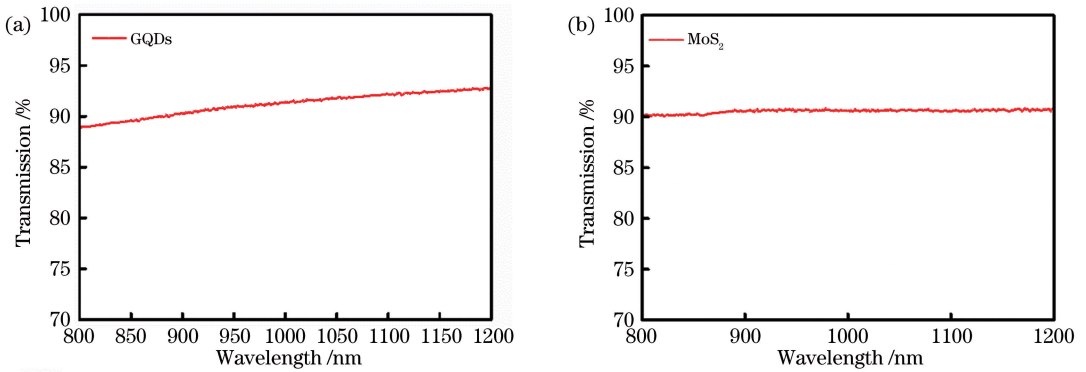


图 2 透射光谱图。(a) GQDs-SA;(b) MoS₂-SA

Fig. 2 Transmission spectroscopy. (a) GQDs-SA; (b) MoS₂-SA

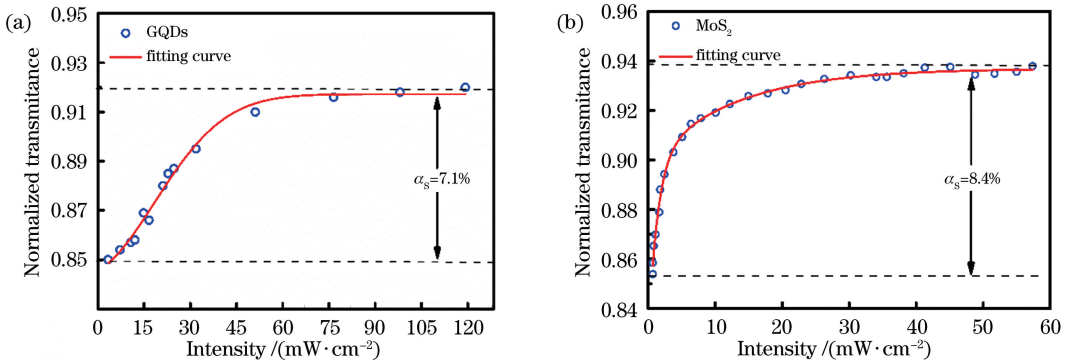


图 3 非线性传输特性。(a) GQDs-SA;(b) MoS₂-SA

Fig. 3 Nonlinear transmission characteristics. (a) GQDs-SA; (b) MoS₂-SA

3 实验装置

实验采用的腔形是线性直线腔,结构简单、紧凑,激光谐振腔腔长为 25 mm。整个双被动调 Q 激

光器系统由光纤耦合半导体激光器、耦合透镜组、Nd:YVO₄晶体、GQDs-SA、MoS₂-SA、平面输出镜组成,如图 4 所示。实验所用的抽运源是中心波长为 808 nm 的半导体激光器,其最大输出功率为

20 W, 光纤的芯径为 $400\ \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22。抽运光经过 1:1 耦合透镜组后的最小光斑照射在 Nd:YVO₄ 晶体的中心, Nd:YVO₄ 晶体的尺寸为 $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$, Nd³⁺ 掺杂浓度为 0.5%, 用铝箔包裹放在紫铜水冷装置中, 通过激光恒温冷却器(深圳科力达 KLD-LC16-FRH/L)控制 Nd:YVO₄ 晶体的温度在 25 °C 左右, 从而降低晶体热效应对实验的影响, Nd:YVO₄ 晶体的 S1 端面作为输入镜, 镀有 808 nm 的增透膜和 1064 nm 的高反膜; S2 端面镀有 1064 nm 的增透膜; M1 作为输出镜, 镀有 1064 nm 透射膜, 透过率为 5%, 与 S1 端面形成激光谐振腔。实验使用光电探测器和数字示波器对激光器输出的脉冲波形进行扫描和记录, 利用商用射频频谱分析仪对射频(RF)光谱进行测量, 进一步验证双被动调 Q 激光器的稳定性。

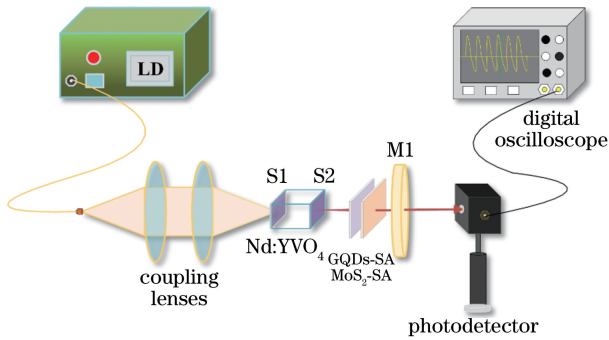


图 4 基于 GQDs-SA & MoS₂-SA 的双被动调 Q 激光器实验装置图

Fig. 4 Double passively Q-switched laser experimental device based on GQDs-SA & MoS₂-SA

4 实验结果与分析

实验先后将 GQDs-SA、MoS₂-SA、GQDs-SA & MoS₂-SA 作为被动调 Q 器件, 应用于 Nd:YVO₄ 激光器中, 通过功率计测量出其输出功率与抽运功率之间的关系, 如图 5 所示, 三者的输出功率均随抽运功率的增加而增加。当抽运功率增加至 12.9 W 时, 双被动调 Q 激光器获得的输出功率在三者中最低, 主要原因是双饱和吸收体在激光谐振腔内的插入损耗最大, 其最大输出功率为 595 mW。使用上升时间为 250 ps 的快速光电二极管和带宽为 500 MHz 的数字示波器来检测脉冲宽度和重复频率, 如图 6(a) 和 (b) 所示; 当抽运功率从 1.7 W 增加至 12.9 W 时, 基于 GQDs-SA、MoS₂-SA、GQDs-SA & MoS₂-SA 的脉冲激光器所获得的脉冲宽度均随抽运功率的增加而减小, 主要是因为腔内光子数密

度随抽运功率的增加而增加, 饱和吸收体的漂白速度加快, Q 开关时间变短, 脉宽变窄, 最短脉宽分别为 226、262、180 ns。在相同的抽运功率情况下, 双被动调 Q 激光器获得的脉冲宽度比单被动调 Q 激光器获得的脉冲宽度更窄, 脉冲形状更对称, 一方面是因为双饱和吸收体在激光腔内插入损耗增加, 有利于激光晶体储存能量, 另一方面是两种饱和吸收体具有不同的饱和强度和饱和恢复时间, 实验所用的 GQDs-SA 与 MoS₂-SA 的饱和强度分别为 $25.4\ \text{MW}/\text{cm}^2$ 和 $2.5\ \text{MW}/\text{cm}^2$, 这导致 MoS₂-SA 要比 GQDs-SA 更容易饱和, 在双被动调制过程中, MoS₂-SA 作用于脉冲上升沿的形成阶段, GQDs-SA 作用于脉冲下降沿的形成阶段, 从而实现脉宽的压缩和波形对称性的优化。三者所获得的重复频率均随抽运功率的增加而提高, 最大重复频率分别为 1620、1280、1085 kHz, 由于两种材料的饱和恢复时间比单种材料的饱和恢复时间更长, 所以双被动调 Q 激光器所获得的重复频率最小。通过测量出的平均输出功率、脉冲宽度和重复频率, 可以计算出双被动调 Q 激光器的最大脉冲能量和最大峰值功率分别为 $0.92\ \mu\text{J}$ 和 3.04 W。

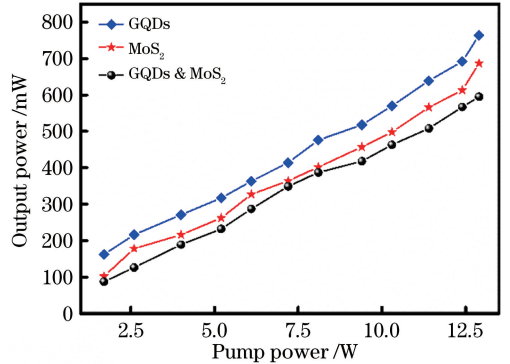


图 5 平均输出功率与抽运功率关系曲线

Fig. 5 Relationship between average output power and pump power

为进一步研究双被动调 Q 激光器的输出特性, 使用数字示波器采集到的单脉冲波形和脉冲序列如图 7 所示。为方便比较脉冲波形的对称性, 将脉冲前沿上升时间与脉冲后沿下降时间的比值定义为脉冲对称因子, 其值越接近于 1, 表明脉冲波形的对称性越好。图 7(a)~(c) 分别为基于 GQDs、MoS₂、GQDs & MoS₂ 激光器获得的单脉冲波形图, 所对应的脉冲对称因子分别约为 0.57、0.51 和 0.86; 图 7(d) 为双被动调 Q 激光器获得的时间轴为 20 μs 的脉冲序列图, 插图是时间轴为 500 μs 脉冲序列图,

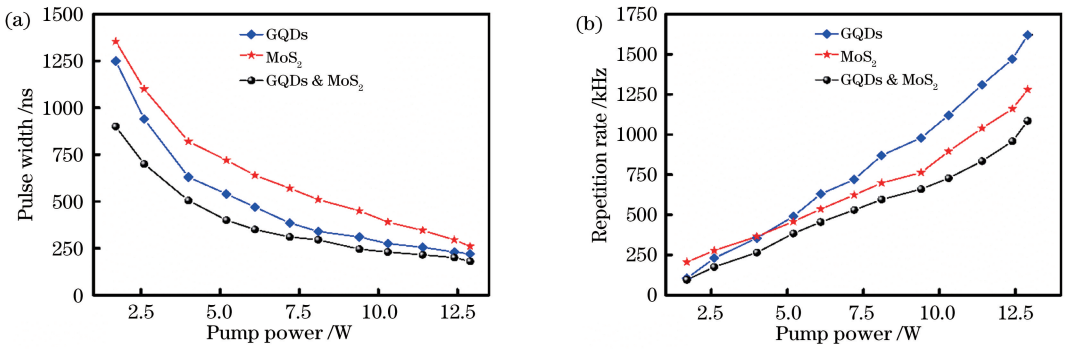


图 6 脉冲激光输出特性。(a)脉冲宽度与抽运功率关系曲线;(b)重复频率与抽运功率关系曲线
Fig. 6 Pulse laser output characteristics. (a) Relationship between pulse width and pump power;
(b) relationship between repetition rate and pump power

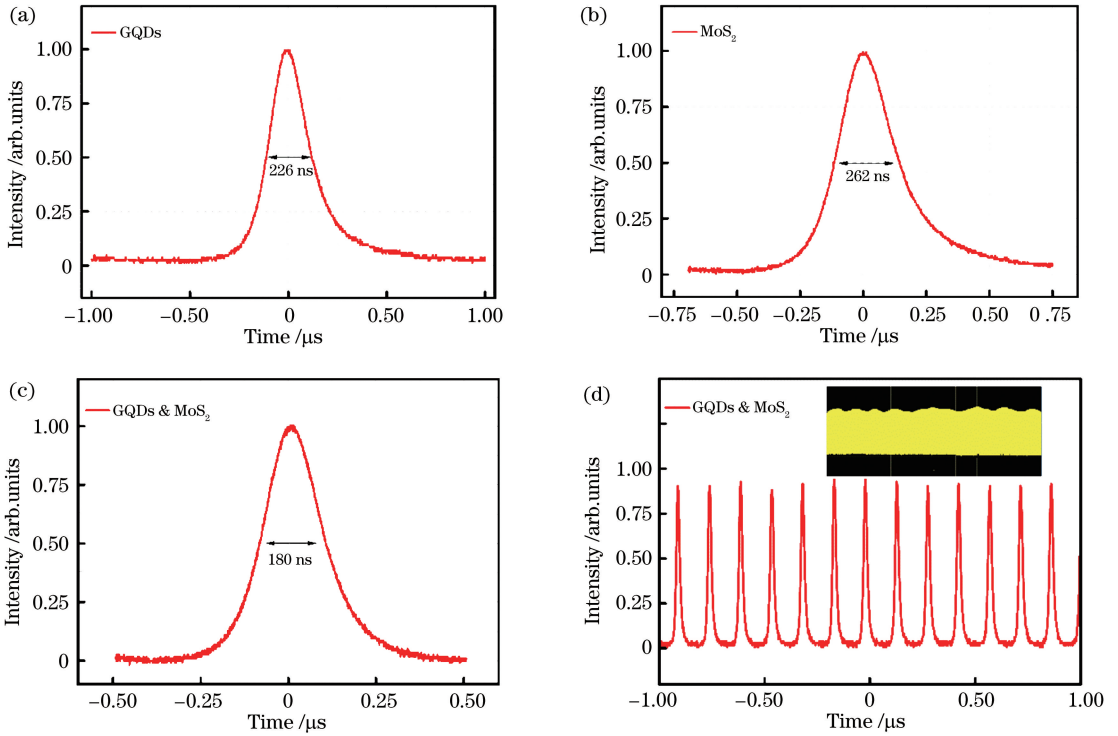


图 7 当抽运功率为 12.9 W 时,脉冲激光的输出特性。(a)~(c) GQDs、MoS₂、
GQDs & MoS₂ 的单脉冲波形;(d) GQDs & MoS₂ 脉冲序列

Fig. 7 Output characteristics of the pulse laser, when the pump power is 12.9 W. (a)–(c) Single pulse waveform of GQDs, MoS₂, and GQDs & MoS₂ respectively; (d) pulse sequence of GQDs & MoS₂

其振幅存在波动,主要是由于激光器运转时间较长, Nd:YVO₄ 晶体内有部分能量转换成热能,产生热效应现象,导致激光器谐振腔的不稳定,后期将针对这一问题优化冷却系统,提高激光谐振腔的稳定性。图 8(a) 是使用光纤光谱仪(型号为 Seemantech S3000-VIS)在抽运功率为 12.9 W 时测量得到的输出激光中心波长为 1064.1 nm,带宽为 0.98 nm 的光谱图,插图是通过光束质量分析仪(型号为 COMS 1201)检测到的光斑图,显示了 1064 nm 激光束光场强度的分布,接近于基模(TEM₀₀)的高斯

分布,表明光束质量良好,光斑直径为 285 μm。使用商用射频(RF)频谱分析仪(型号为 AgilentN9918A)对射频光谱进行了测量,如图 8(b) 所示,当重复频率为 1085 kHz 时,其射频信号的信噪比高达 44 dB,表明基于 GQDs-SA & MoS₂-SA 的双被动调 Q 激光器稳定性良好。为检测此脉冲激光器在长时间工作下平均输出功率的稳定性,保持抽运功率为 12.9 W,每 5 min 记录一次平均输出功率的值,用功率计记录了 120 min 内激光器平均输出功率的变化情况,其抖动幅度低于 ±1.7%,如图 8(c) 所示。

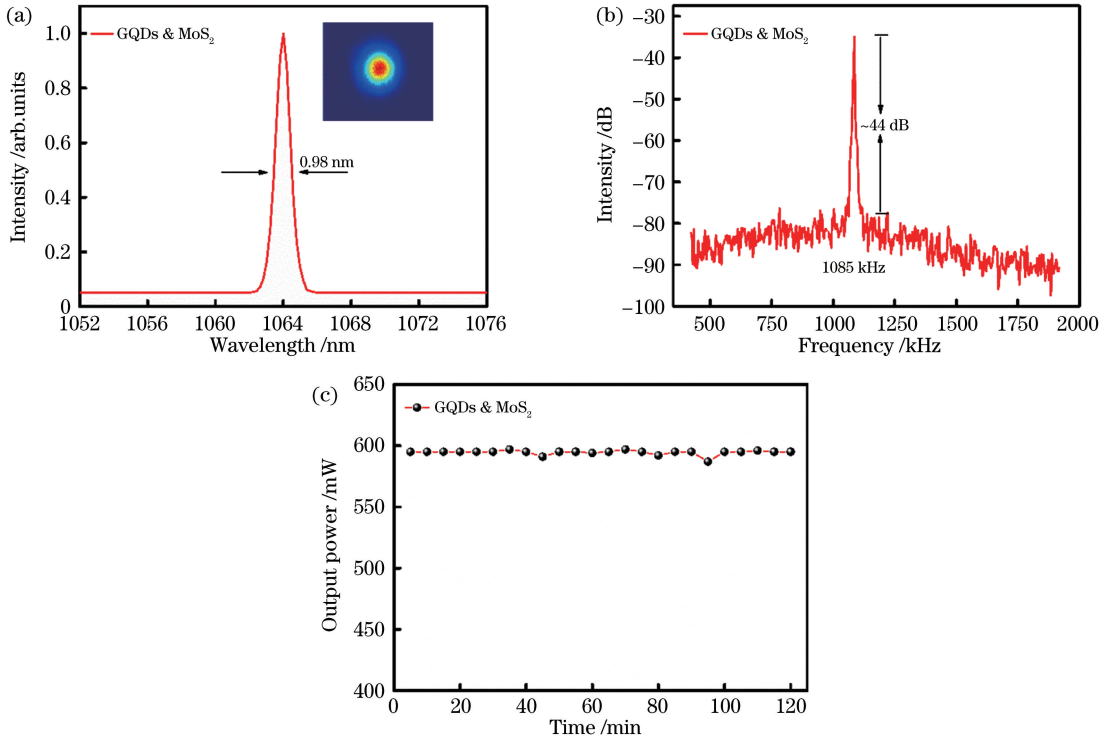


图 8 当抽运功率为 12.9 W 时,脉冲激光稳定性。(a)激光光谱,插图为 1064 nm 光束轮廓图;
(b)射频光谱;(c)输出功率随时间变化图

Fig. 8 Stability of the pulse laser, when the pump power is 12.9 W. (a) Laser spectrum, inset is the 1064 nm beam profile; (b) radio frequency spectrum; (c) graph of output power change over time

5 结 论

为获得脉冲宽度窄和波形对称性好的脉冲激光,利用具有不同饱和强度和饱和恢复时间的两种材料,使其分别作用在脉冲激光形成的上升沿和下降沿,实现了脉冲宽度的压缩和波形对称性的优化。分别采用水热法和锂离子-插层法获得了 GQDs 溶液和 MoS₂ 溶液,并经过超声、离心、旋涂、烘干等工艺制备成 GQDs-SA 与 MoS₂-SA。利用拉曼光谱、透射光谱对其进行表征,结果表明所制备的薄膜具有少层结构,透射率分别为 91.82% 和 90.61%。此外,对其非线性传输特性进行了测量,GQDs-SA 的调制深度为 7.1%,饱和强度为 25.4 MW/cm²; MoS₂-SA 的调制深度为 8.4%,饱和强度为 2.5 MW/cm²。将 GQDs-SA 与 MoS₂-SA 作为双被动调 Q 器件,置于腔长为 25 mm 的激光谐振腔中,当抽运功率为 12.9 W 时,获得了脉冲宽度为 180 ns、重复频率为 1085 kHz、信噪比为 44 dB、平均输出功率为 595 mW 的脉冲激光输出。

参 考 文 献

[1] Zhang Y, Zhao S Z, Li D C, et al. Diode-pumped

doubly Q-switched mode-locked YVO₄/Nd:YVO₄/KTP green laser with AO and GaAs saturable absorber[J]. *Optical Materials*, 2011, 33(3): 303-307.

[2] Li G Q, Zhao S Z, Yang K J, et al. Diode-pumped doubly passively Q-switched Cr, Nd:YAG/KTP green laser with GaAs saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2006, 14(11): 4713-4720.

[3] Li L, Liu J, Liu M, et al. 532 nm continuous wave mode-locked Nd:GdVO₄ laser with SESAM [J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 6(2): 113-116.

[4] Pang Q S, Chen M, Liu Z X, et al. LD end-pumped intracavity frequency doubling SESAM passively mode-locked picosecond lasers [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(6): 1031-1034.

[5] Wang W, Liu J, Chen F, et al. 532-nm picosecond pulse generated in a passively mode-locked Nd:YVO₄ laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(8): 706-708.

[6] Chen B L, Fang X H. Research on the influence of the transmittance of output mirror on SESAM mode-locked laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 191401.

陈博伦, 方晓惠. 输出耦合率对 SESAM 锁模激光器的影响研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56

- (19): 191401.
- [7] Wang X, Li M. Continuous-wave passively mode-locked Nd : YVO₄/KTP green laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Laser Physics*, 2010, 20(4): 733-736.
- [8] Zhang Y J, Liu J, Cai Y W, et al. Research on vibration performance of all-polarization-maintaining erbium-doped mode-locking fiber laser based on carbon nanotube [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0901002.
张亚静, 刘杰, 蔡娅雯, 等. 碳纳米管锁模全保偏掺铒光纤激光器的振动性能的研究 [J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0901002.
- [9] Yang D Z, Chen Q F, Xu S K. Synthesis of CdSe/CdS with a simple non-TOP-based route [J]. *Journal of Luminescence*, 2007, 126(2): 853-858.
- [10] Peng X, Schlamp M C, Kadavanich A A V, et al. Epitaxial growth of highly luminescent CdSe/CdS core/shell nanocrystals with photostability and electronic accessibility [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1997, 119(30): 7019-7029.
- [11] Zan H W, Li C H, Yeh C C, et al. Room-temperature-operated sensitive hybrid gas sensor based on amorphous indium gallium zinc oxide thin-film transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(25): 253503.
- [12] Ritter K A, Lyding J W. The influence of edge structure on the electronic properties of graphene quantum dots and nanoribbons [J]. *Nature Materials*, 2009, 8(3): 235-242.
- [13] Baker S, Baker G. Luminescent carbon nanodots: emergent nanolights [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2010, 49(38): 6726-6744.
- [14] Hisyam M B, Rusdi M F, Latiff A A, et al. PMMA-doped CdSe quantum dots as saturable absorber in a Q-switched all-fiber laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(8): 081404-81408.
- [15] Dai R, Chang J H, Li Y Y, et al. Performance enhancement of passively Q-switched Nd:YVO₄ laser using graphene-molybdenum disulphide heterojunction as a saturable absorber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 117: 265-271.
- [16] Cui Y Q, Xi S, Tang J L, et al. Research on the preparation and characterization of two-dimension MoS₂ materials [J]. *China Molybdenum Industry*, 2017, 41(2): 31-35.
崔玉青, 席莎, 唐军利, 等. 二维二硫化钼材料制备及表征研究 [J]. *中国铝业*, 2017, 41(2): 31-35.
- [17] Xu D D, Wang X B, Qiu J L, et al. Preparation and application of two-dimensional molybdenum disulfide materials [J]. *Chinese Journal of Colloid & Polymer*, 2015, 33(1): 37-40.
徐豆豆, 王贤保, 邱家乐, 等. 二维二硫化钼材料的制备及应用进展 [J]. *胶体与聚合物*, 2015, 33(1): 37-40.
- [18] Gao Y J. Preparation of two-dimensional topological material saturable absorber and its ultra-fast characteristics [D]. Liaocheng: Liaocheng University, 2017.
高雅静. 二维拓扑材料可饱和吸收体的制备及其超快特性的研究 [D]. 聊城: 聊城大学, 2017.
- [19] Gao L Y. Study on diode pumped Nd:GdVO₄ double Q-switched laser [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2007.
高利岩. 二极管泵浦 Nd:GdVO₄ 双调 Q 激光器的研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2007.
- [20] Liang J, Zhao S, Zhuo Z, et al. Diode-pumped doubly Q-switched YVO₄/Nd:YVO₄ laser with BBO electric-optic Q-switch and Cr⁴⁺:YAG saturable absorber [J]. *Laser Physics*, 2009, 19(3): 381-383.
- [21] Wang D, Zhao J, Yang K J, et al. Pulse characteristics in a doubly Q-switched Nd:GGG laser with an acousto-optic modulator and a monolayer graphene saturable absorber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 96: 265-270.
- [22] Cheng K, Zhao S Z, Li Y F, et al. Diode-pumped doubly passively Q-switched Nd:LuVO₄ laser with Cr⁴⁺:YAG saturable absorber and GaAs output coupler [J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 6(10): 703-706.
- [23] Chang J H, Yang Z B, Li H H, et al. Passively Q-switched Nd:YVO₄/PPLN green laser with a few-layered MoS₂ saturable absorber [J]. *Optical Review*, 2017, 24(6): 765-771.