

# 基于石墨烯器件的脉宽可控被动调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>激光器

王健<sup>1</sup>, 戴腾飞<sup>1</sup>, 刘海洋<sup>1</sup>, 刘俊彤<sup>1</sup>, 孔春霞<sup>2</sup>, 杨镇博<sup>1</sup>, 常建华<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044;

<sup>2</sup>南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044;

<sup>3</sup>南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 江苏 南京 210044

**摘要** 二维材料具有的可饱和吸收特性使其在新兴的超快固态激光器中得到了广泛应用,但其恒定的吸收状态使激光器的输出性能难以调控。因此,采用等离子体增强化学气相沉积法在玻璃基底上制备了少层石墨烯(Gr)薄膜,经喷墨打印、镀膜、烘干等流程制备了Gr可饱和吸收体(Gr-SA)器件。利用拉曼光谱仪和分光光度计对Gr-SA器件进行系统的光学表征分析,并采用平衡同步双探测器系统测量了Gr-SA的非线性传输特性。结果表明,Gr-SA器件具有电压可控的非线性吸收特性。将Gr-SA器件应用于Nd:YVO<sub>4</sub>全固态激光器系统中,可实现1064.1 nm波长的稳定调Q输出。保持抽运光功率不变,通过改变栅极电压,可实现脉冲宽度从900 ns到395 ns可调控的激光输出,相应的重复频率从62 kHz提高到158 kHz。

**关键词** 材料; 石墨烯; 电压调控; 被动调Q; 全固态脉冲激光器

中图分类号 TN242

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1516021

## Tunable Pulse Width Passively Q-Switched Nd:YVO<sub>4</sub> Laser Based on Graphene Devices

Wang Jian<sup>1</sup>, Dai Tengfei<sup>1</sup>, Liu Haiyang<sup>1</sup>, Liu Juntong<sup>1</sup>, Kong Chunxia<sup>2</sup>, Yang Zhenbo<sup>1</sup>,  
Chang Jianhua<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

<sup>2</sup>College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

<sup>3</sup>Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

**Abstract** Two-dimensional material has been widely used in the emerging ultrafast solid-state lasers due to its saturable absorption properties. However, its constant absorption state makes it difficult to regulate the laser output performance. In this paper, the plasma enhanced chemical vapor deposition method is used to prepare a few-layer graphene (Gr) film on a glass substrate and a Gr-saturable absorber (Gr-SA) device is prepared through processes such as inkjet printing, coating, and drying. Raman spectroscopy and spectrophotometer are used to perform

收稿日期: 2020-11-22; 修回日期: 2020-12-30; 录用日期: 2021-01-19

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)

通信作者: \*jianhuachang@nuist.edu.cn

systematic optical characterization and analysis of Gr-SA devices, and the nonlinear transmission characteristics of Gr-SA are measured by a balanced synchronous dual detector system. The results show that Gr-SA devices have voltage-controllable nonlinear absorption characteristics. The Gr-SA device is applied to the Nd:YVO<sub>4</sub> all-solid-state laser system, which can achieve a stable Q-switched output with a wavelength of 1064.1 nm. Keeping the pumping optical power constant, the laser output with adjustable pulse width from 900 ns to 395 ns can be achieved by changing the gate voltage, and the corresponding repetition frequency can be increased from 62 kHz to 158 kHz.

**Key words** materials; graphene; voltage regulation; passively Q-switched; all-solid-state pulsed laser

**OCIS codes** 160.3900; 140.3538; 140.3540; 140.3580

## 1 引言

全固态激光器具有体积小、转换效率高、稳定性好等优点,得到了人们的广泛关注<sup>[1-4]</sup>。利用被动调Q技术实现的全固态脉冲激光器具有峰值功率高、重复频率高、脉冲能量易控制等特点,在精密加工、激光医疗、科学研究、国防军事等众多领域得到了广泛应用<sup>[5-6]</sup>。可饱和吸收体(SA)是获得ns量级脉冲激光,实现调Q运转的重要器件。近年来,人们已经实现了基于各种二维(2D)材料SA在光纤和固态激光器中的调Q和锁模实验<sup>[7-9]</sup>。石墨烯(Gr)作为一种典型的新型2D材料,具有优异的光学和电学特性及可饱和吸收特性,且能实现多个波段的调Q和锁模脉冲激光输出<sup>[10-14]</sup>。

目前,基于Gr-SA的全固态激光器的调Q锁模技术已趋于成熟,但受限于Gr恒定的吸收状态和非线性调制深度,实现超短脉冲激光输出的实时调控仍是相关领域的研究热点和难点。值得注意的是,当外加栅压时,Gr的载流子浓度会发生变化,费米能级增高,其光学吸收特性也会因此改变<sup>[15-17]</sup>。2015年, Lee等<sup>[18]</sup>以Gr为基底制成的晶体管作为SA并将其应用于光纤激光器中,该器件的光学吸收特性可通过加电实现大范围调节,进而实现栅极电压对激光器的主动调控,使其在调Q和锁模状态中灵活转变。2018年, Kim等<sup>[19]</sup>将电压可控的Gr器件应用在光子晶体激光器中,以较小的栅极电压实

现了对光子晶体带边激光器的直接调节。独特的装置结构和光学损耗等问题,使全固态调Q脉冲激光器的可控调节还有待深入研究。

本文将Gr器件作为被动调Q元件应用于全固态激光器中,实现了激光脉冲宽度的实时可控调节。采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)法制备高质量Gr薄膜,并进行相关表征分析。将Gr晶体管器件的电极设计成独特的叉指结构,不仅能为激光提供入射窗口,还可以保证有效的电场耦合作用,增强调制效果。对实验制备的Gr-SA器件进行相应的光学和电学测试分析,搭建了一套以Gr为SA的脉冲宽度可调的全固态调Q激光系统。当抽运功率稳定为1.85 W时,缓慢将栅极电压从0 V提高至60 V,脉冲宽度可以从900 ns压缩到395 ns,相应的重复频率从62 kHz提高到158 kHz,最终获得脉冲宽度稳定可调且信噪比较高的激光输出。

## 2 新型Gr-SA器件的制备与表征

实验使用微电子打印技术和镀膜工艺制备出具有垂直结构的新型Gr-SA器件,其垂直结构如图1(a)所示。Gr-SA器件的制备流程:首先,利用PECVD法在SiO<sub>2</sub>绝缘衬底上生长出高质量的少层2D Gr薄膜。为了保证Gr薄膜具有优异的饱和吸收和电学传输特性,其生长条件需要严格控制(生长温度为700 °C, CH<sub>4</sub>与H<sub>2</sub>的进气比为1:9, 稳压为39.997 Pa, 生长时间为20 min)。然后,利用微电子

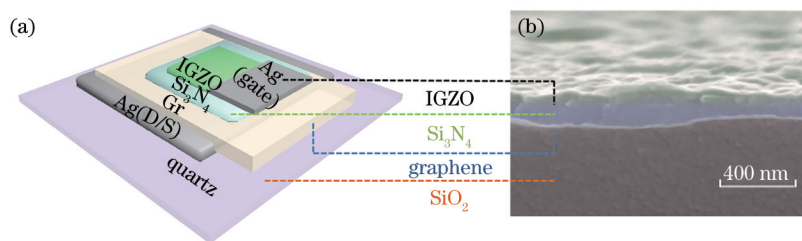


图1 Gr-SA器件结构。(a)制备流程图;(b) SEM图像

Fig. 1 Structure of the Gr-SA device. (a) Flow chart of the preparation; (b) SEM image

打印机(上海普创多功能科学打印机)按照设计的形状,通过喷墨打印技术在 Gr 薄膜上打印电极结构,经 150 °C 高温烘干 1 h 后,形成具有翅膀结构的源漏(S/D)极。之后,通过金盛微纳真空镀膜机为 Gr 器件镀上厚度约为 200 nm 的绝缘层 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和透明栅极 IGZO(In-Ga-Zn-O)薄膜,避免器件发生短路的同时减少光学损耗。最后,在 IGZO 薄膜上打印出对准电极,一方面为激光入射提供测试窗口,另一方面与源漏极构成叉指电极结构,增强对器件的调控能力。为进一步解释 Gr-SA 器件的结构,利用扫描电子显微镜(SEM)观测设计的器件,结果如图 1(b)所示。可以发现,制备的 Gr-SA 器件具有明

显的垂直和分层结构,且材料的均一性较好。

为了提供适用性较强的激光测试窗口,应保证器件结构的透明度,以降低光学损耗,同时优化电极结构,确保有效的电场调制作用。利用有限元方法仿真了装置内部的电场强度  $E$  (单位为  $C/(10^{-6} \mu m^2)$ ),其分布如图 2(a)所示。可以发现,带翅膀的叉指电极结构的电场增强效果优于无翼电极;且随着翅膀长度的增加,两个电极之间的电场强度逐渐增强,测试窗口也具有足够大的载流子浓度,使器件的调制效果更佳。通过微电子打印机对上述仿真电极进行实践仿真,其光学显微结果如图 2(b)所示,其中, GND 为接地端。

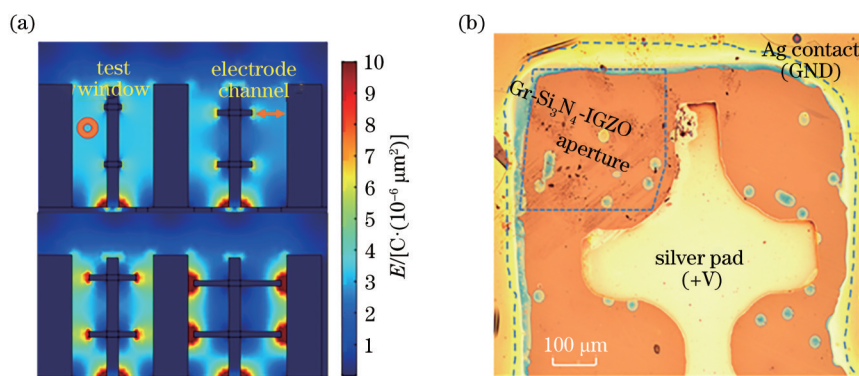


图 2 器件电极的结构。(a)载流子的分布;(b)器件的 SEM 图像

Fig. 2 Structure of the device electrode. (a) Distribution of the carriers; (b) SEM image of the device

为了检测 Gr 薄膜的结构特性,通过拉曼光谱仪分析了块状 Gr 和 PECVD 法制备的 Gr,结果如图 3(a)所示。可以发现,相比块状 Gr,PECVD 法制备的 Gr 拉曼测量结果在 1350  $cm^{-1}$  处存在特征峰(D 峰),这表明少层(3~10 层)Gr 薄膜引入了缺陷。此时,2D 峰不再满足单洛伦兹型,且相比块状 Gr 的 2D 峰出现了蓝移现象,2D 峰强度与 G 峰强度的比值  $I_{2D}/I_G$  为 0.95<sup>[20]</sup>,这表明 PECVD 法制备的 Gr 具

有 2~3 层的少层结构。图 3(b)为用分光光度仪(Perkin Elmer Lambda 950)测量的 Gr-SA 器件各分层样品的透射率,可以发现,该器件从可见光到近红外波段的透射率比较均衡。在 1064 nm 处, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的透射率为 98.82%,线性损失为 1.18%; IGZO 的透射率为 90.61%,线性损失为 9.39%。测试样品各个分层展现出相对较高的透过率,可以一定程度上降低光学损耗,提高激光器的性能。

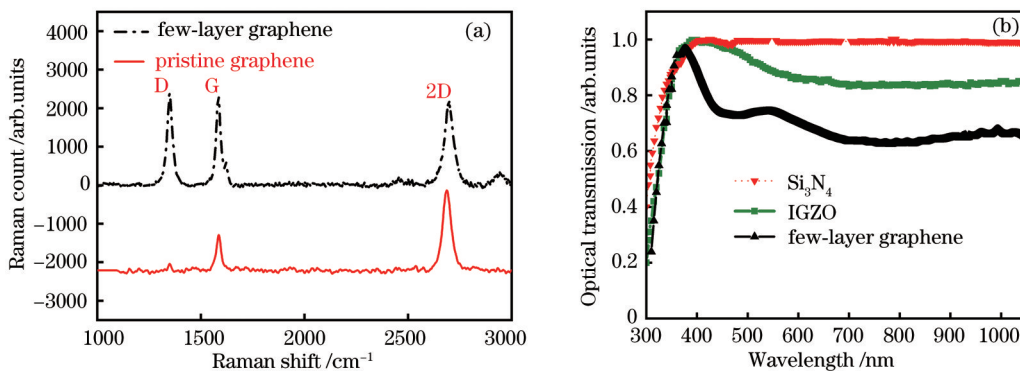


图 3 Gr-SA 器件的表征图。(a)拉曼光谱;(b)透射光谱

Fig. 3 Characterization diagram of the Gr-SA device. (a) Raman spectrum; (b) transmission spectrum

器件通过外加栅极电压从外界注入载流子,以提高 Gr 的费米能级,从而改变器件的非线性调制深度,实现脉宽调控。为了验证 Gr 的调控特性,对比了包含和不包含 Gr 两类器件的光学吸收特性,结果如图 4(a)和图 4(b)所示。可以发现,包含 Gr 器件

的吸收特性随栅极电压的变化而变化,当电压为 60 V 时,其吸收调制效果最明显;不包含 Gr 的器件则没有发生明显变化,这表明 Gr-SA 器件的吸收调控能力源于 Gr 载流子浓度的变化,与器件中的其他材料无关。

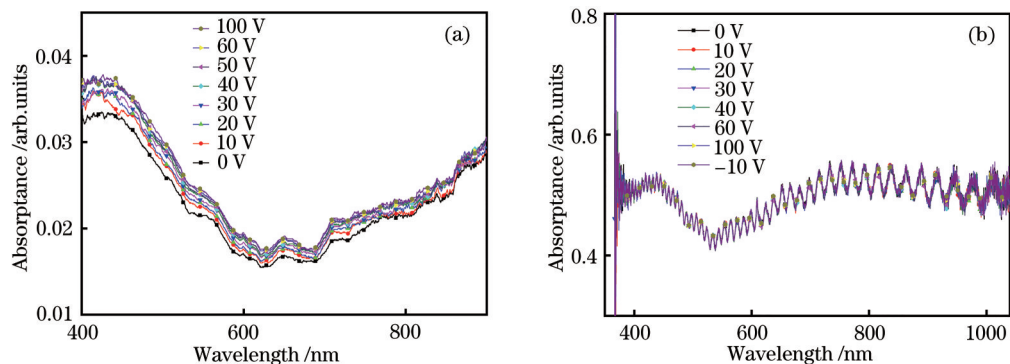


图 4 Gr-SA 器件的光学吸收特性。(a)包含 Gr 的器件;(b)不包含 Gr 的器件

非线性传输特性对于 SA 是一种重要的光学性质,也是实现调 Q 激光器性能调控的重要因素,因此,研究 Gr-SA 器件随电压变化的非线性传输特性具有重要意义。从图 2 的仿真结果可以发现,器件不同位置处的载流子浓度差异较大。实际上,Gr-SA 器件的吸收调控效果源于 Gr 载流子浓度的变化,从而导致器件在不同位置处的调制深度差异较大。实验采用平衡同步双探测器系统测量了 0 V 和 60 V 电

压下 Gr-SA 器件相同位置处的非线性传输特性,为了保证调制效果,同时结合载流子浓度的仿真结果,将测试点选为叉指电极之间的位置,测量结果如图 5(a)和图 5(b)所示。可以发现,没有外加电压的器件(0 V)调制深度  $\alpha_s$  约为 3.9%,饱和强度  $I_{sat}$  为 8.14 MW/cm<sup>2</sup>;最大外加电压(60 V)器件的调制深度约为 5.5%,饱和强度为 10.53 MW/cm<sup>2</sup>,这表明电压的介入可以有效调控 Gr-SA 器件的调制深度。

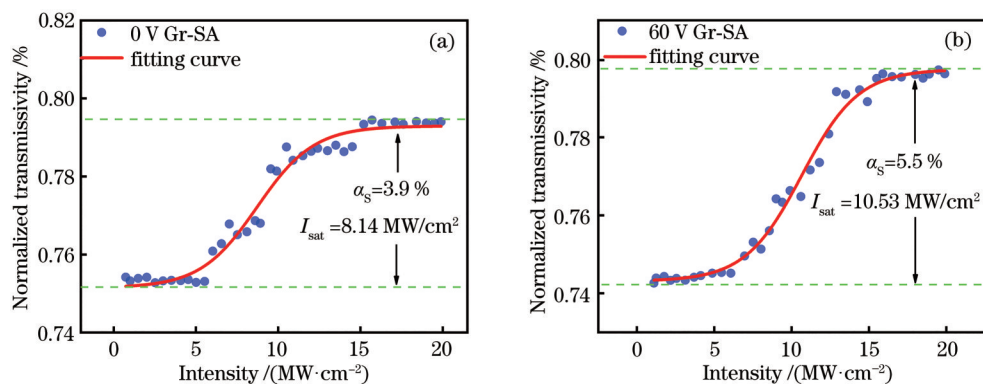


图 5 Gr-SA 器件的非线性传输特性。(a)调制电压为 0 V;(b)调制电压为 60 V

Fig. 5 Non-linear transmission characteristics of the Gr-SA device. (a) Modulation voltage is 0 V; (b) modulation voltage is 60 V

### 3 实验装置

图 6 为基于 Gr-SA 器件的全固态被动调 Q 激光器的结构示意图,设计的激光谐振腔为线性直线腔,具有结构简单、紧凑等特点。整个被动调 Q 激光器系统由光纤耦合半导体激光器、耦合透镜组、Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体、Gr-SA 器件、平面输出镜组成,谐振

腔的总长为 28 mm。实验使用的抽运光是中心波长为 808 nm 的光纤耦合输出半导体激光器,最大输出功率为 20 W,光纤的芯径和数值孔径分别为 400 μm 和 0.22。抽运光经过 1:1 耦合透镜组聚焦在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的中心,光斑半径为 200 μm。激光晶体的尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm,Nd<sup>3+</sup> 的原子数分数为 0.5%。左端面的 S1 为输入镜,镀有

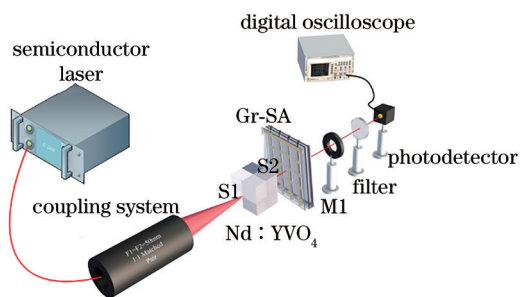


图 6 基于 Gr-SA 器件的被动调 Q 激光器的原理  
Fig. 6 Principle of passively Q-switched laser based on Gr-SA device

808 nm 的增透膜和 1064 nm 的高反膜;右端面的 S2 镀有 1064 nm 的增透膜。为了有效降低热效应,用一层厚度为 0.1 mm 的铜箔片包裹 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体并将其放在水冷装置中,通过恒温器(深圳科力达 KLD-LC16-FRH/L)将 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的温度控制在 25 °C 左右,以降低晶体热效应对实验结果的影响。M1 作为输出镜,镀有 1064 nm 的反射膜(反射率 R=95%),与 S1 端面形成激光谐振腔。

传统 SA 恒定的吸收状态使基于调 Q 器件调控的脉冲激光器的输出特性仍具有较大挑战性。因此,设计了一种具有垂直多层结构的 Gr-SA 器件,通过外加栅极电压,以一种片上实时调控的方式改变 Gr 的载流子浓度,实现脉冲激光输出脉宽和重复频率的稳定调节。石墨烯全固态器件(Solid to solid STS)紧贴输出镜 M1 放置于腔内,经电压调控

后输出的调 Q 脉冲分别通过光功率计(Thorlabs P3000857, 德国)、光谱分析仪(Seemantech S3000-VIS)以及数字示波器(MSO7052B, Agilent, 美国)检测输出功率、光谱以及脉冲宽度与重复频率。

### 4 实验结果与分析

为了验证设计的 Gr 器件作为一个电压可控片上 SA 的可行性,将其作为被动调 Q 元件应用于 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器中,并通过施加栅极电压研究激光器的输出特性。用快速光电二极管接收实验装置中产生的激光脉冲,采用数字示波器记录的各阶段波形如图 7(a)所示。实验过程中,半导体激光器的抽运功率从 0 W 增加至 1.74 W 时,腔内光子数密度随抽运功率的增加而增加,SA 的漂白速度加快,Q 开关开启,基于 Gr-SA 器件的脉冲激光器开始出现调 Q 现象。为了检测调制电压对输出激光的影响,保持抽运功率为 1.85 W,通过改变栅极电压实现 Nd:YVO<sub>4</sub> 被动调 Q 激光器脉冲宽度和重复频率的主动调控。结果表明,该器件能以超低的电调制功率(电流约为 10 pA,功率小于 1 nW)实现脉冲宽度的可控调节,其输出功率为 70 mW。图 7(b)为调制电压从 0 V 升到 60 V 时的脉冲宽度,可以发现,脉冲宽度可从 900 ns 降到 395 ns,且重复频率也会发生相应变化。原因是电压的介入会导致外界载流子的注入,提升了 Gr 的费米能级,从而改变其调

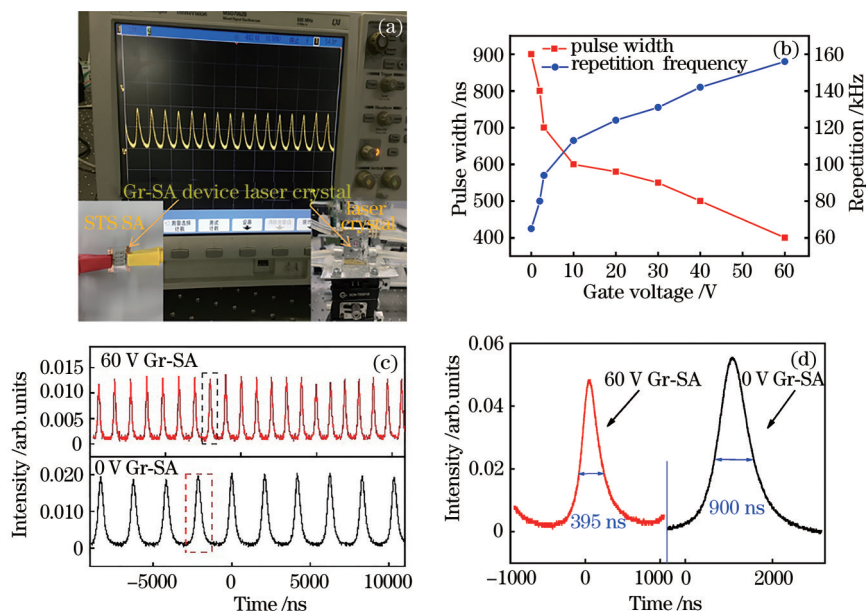


图 7 激光器的性能测试结果。(a)示波器的示意图;(b)重复频率和脉冲宽度与栅极电压的关系;(c)脉冲序列;(d)单脉冲图  
Fig. 7 Performance test results of the laser. (a) Schematic diagram of the oscilloscope; (b) relationship between repetition frequency, pulse width and grid voltage; (c) pulse sequence; (d) single pulse diagram

制深度。对应关系可表示为<sup>[21]</sup>

$$\tau = 3.52T_R/\Delta T, \quad (1)$$

式中,  $\tau$  为脉冲宽度,  $\Delta T$  为调制深度,  $T_R$  为腔内往返时间。可以发现, 在固定激光腔内, 增大 SA 的调制深度, 脉冲宽度会变短, 从而加快 Q 开关开启关闭的过程, 即相同时间会输出更多的调 Q 脉冲, 最终实现被动调 Q 激光器中的脉宽压缩和重复频率的提高。采集到的脉冲序列和单脉冲波形如图 7(c) 和图 7(d) 所示, 为了方便对比脉冲波形随电压的变化特性, 将最大栅极电压和无外加电压的激光器脉冲序列输出进行对比分析。结果表明, 可通过改变栅极电压改变输出激光的脉冲宽度。图 7(c) 中的调 Q 脉冲激光输出存在波动, 原因是激光器长时间的运转过程中, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体内部只有部分抽运能量

转化为激光, 其他能量则会转换成热能, 产生的热效应导致激光器谐振腔出现轻微的不稳定。

图 8(a) 为用光纤光谱仪 (Seemantech S3000-VIS) 在抽运功率为 1.85 W、电压为 60 V 时调 Q 运转下输出的激光光谱。可以发现, 基于 Gr-SA 器件的调 Q 激光器输出光谱的半峰全宽 (FWHM) 为 0.96 nm, 中心波长为 1064.1 nm; 插图图为光束质量分析仪 (COMS 1201) 检测到的 1064 nm 激光束的光场强度分布, 其接近于基模 (TEM<sub>00</sub>) 的高斯分布, 光斑直径为 282  $\mu$ m, 这表明光束质量良好。图 8(b) 为实验测得的固体激光器输出调 Q 脉冲的峰值功率与栅极的关系, 可以发现, 抽运光功率保持 1.85 W, 电调制功率 (电流约为 10  $\mu$ A, 功率小于 1 nW) 极低, 给定不同栅极电压 (0~60 V) 下, 峰值功率至少提升了 60%。

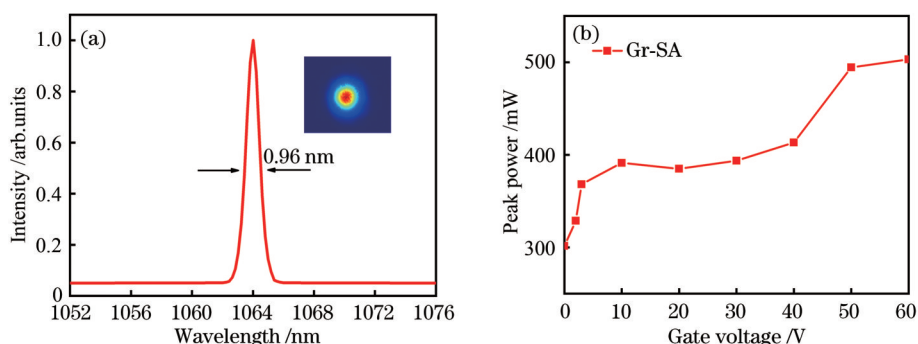


图 8 激光器的输出特性。(a) 激光光谱; (b) 峰值功率

Fig. 8 Output characteristics of the laser. (a) Laser spectrum; (b) peak power

考虑到实际应用价值, 对设计的 Gr-SA 器件进行了稳定性测试。首先, 在抽运功率为 1.85 W 时, 使激光器处于调 Q 模式下, 施加 60 V 的栅极电压进行脉冲宽度的调控, 并用数字示波器记录了 120 min 内的脉冲宽度变化情况, 如图 9 所示。可以发现, 激光器的脉冲宽度调控具有较好的稳定性, 且变化幅度小于 1.5%。由于系统内部采用激光恒温冷却器控制 Nd:

YVO<sub>4</sub> 的温度, 在激光恒温冷却器工作时, 水泵抽取冷却水时会发生抖动, 对系统的稳定产生一定影响; 且持续的加电和激光照射会使 Gr-SA 器件受热, 同样会影响调制效果, 导致图 9 中个别数据的浮动较大。

## 5 结 论

为了获得可调控的脉冲激光, 利用 Gr 独特的光电特性及外加栅极电压实现了脉冲宽度和重复频率的稳定调节。采用 PECVD 法在玻璃基底上制备了 Gr 薄膜, 经喷墨打印、镀膜、烘干等流程制备了电压可控的 Gr-SA 器件。利用拉曼光谱仪对 Gr-SA 器件进行系统表征分析, 结果表明, 制备的 Gr 薄膜具有少层 2D 结构。对其非线性传输特性的分析结果表明, 当调制电压为 0 V 时, Gr 的调制深度约为 3.9%, 饱和强度为 8.14 MW/cm<sup>2</sup>; 当调制电压为 60 V 时, 器件的调制深度约为 5.5%, 饱和强度为 10.53 MW/cm<sup>2</sup>。将 Gr-SA 器件应用于 Nd:YVO<sub>4</sub> 全固态激光器中, 可实现 1064.1 nm 波长的稳定调

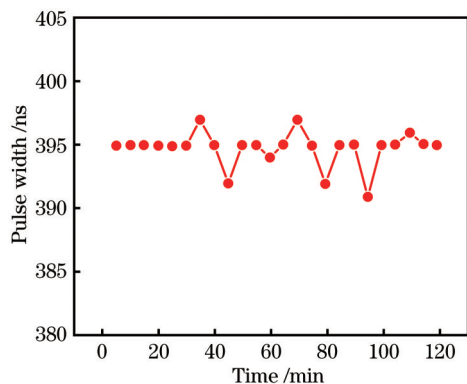


图 9 激光器的输出脉冲宽度

Fig. 9 Output pulse width of the laser

Q 输出。实验设计的器件能以超低的电调制功率 (电流约为 10 pA, 功率小于 1 nW) 使脉冲宽度实现从 900 ns 到 395 ns 的稳定可调谐激光输出, 重复频率从 62 kHz 提高到 158 kHz。

参 考 文 献

- [1] Zhang Y, Zhao S Z, Li D C, et al. Diode-pumped doubly Q-switched mode-locked YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/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] Liu B Y, You C Y, Zhao C, et al. High responsivity and near-infrared photodetector based on graphene/MoSe<sub>2</sub> heterostructure[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(2): 020002.
- [4] Lü K P, Liu Z Y, Yang X, et al. Numerical research on microchannel cooling structure of high power solid-state lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0601010.  
吕坤鹏, 刘震宇, 杨雪, 等. 高功率固体激光器微通道冷却结构的数值研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0601010.
- [5] Yu H H, Zhang H J, Wang Z P, et al. Continuous-wave and passively Q-switched laser performance with a disordered Nd:CLNGG crystal[J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 19015-19020.
- [6] Li X D, Xu G C, Liu Z X, et al. Novel CW and actively Q-switched 1066 nm Nd:GdYNbO<sub>4</sub> laser under direct pumping[J]. *Optik*, 2019, 181: 398-403.
- [7] Zhang Y J, Liu J, Cai Y W, et al. Research on vibration performance of all-polarization-maintaining erbium-doped mode-locked 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.
- [8] Wang X, Li M. Continuous-wave passively mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP green laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Laser Physics*, 2010, 20(4): 733-736.
- [9] 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.
- [10] Cai W, Peng Q Q, Hou W, et al. Picosecond passively mode-locked laser of 532 nm by reflective carbon nanotube[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 58: 194-196.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Liu Z B, He X Y, Wang D N. Passively mode-locked fiber laser based on a hollow-core photonic crystal fiber filled with few-layered graphene oxide solution[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3024-3026.
- [14] Wang Z T, Chen Y, Zhao C J, et al. Switchable dual-wavelength synchronously Q-switched erbium-doped fiber laser based on graphene saturable absorber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(3): 869-876.
- [15] Wang F, Zhang Y, Tian C, et al. Gate-variable optical transitions in graphene[J]. *Science*, 2008, 320(5873): 206-209.
- [16] Li Z Q, Henriksen E A, Jiang Z, et al. Dirac charge dynamics in graphene by infrared spectroscopy[J]. *Nature Physics*, 2008, 4(7): 532-535.
- [17] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene[J]. *Nature*, 2005, 438(7065): 197-200.
- [18] Lee E J, Choi S Y, Jeong H, et al. Active control of all-fibre graphene devices with electrical gating[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6851.
- [19] Kim H, Lee M, Jeong H, et al. Electrical modulation of a photonic crystal band-edge laser with a graphene monolayer[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(18): 8496-8502.
- [20] Dai R, Chang J H, Li Y Y, et al. Performance enhancement of passively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser using graphene-molybdenum disulphide heterojunction as a saturable absorber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 117: 265-271.
- [21] Luo Z Q, Liu C, Huang Y Z, et al. Topological-insulator passively Q-switched double-clad fiber laser at 2 μm wavelength[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 1-8.