第51卷第10期
2022年10月

光 子 学 报
ACTA PHOTONICA SINICA

Vol.51 No.10
October 2022

基于石墨烯全光调制的主/被动调Q光纤激光器（特邀）

王天祺[1,2]，李对对[1,2]，刘贝贝[1,2]，江曼[1,2]，孙志培[3]，任兆玉[1,2]

（1 西北大学 光子学与光子技术研究所, 西安 710127）

（2 省部共建西部能源光子技术国家重点实验室, 西安 710127）

（3 阿尔托大学 电子与纳米工程系, 芬兰 埃斯波 FI-02150）

摘　要：报道了一种基于石墨烯全光调制器的主/被动调Q光纤激光器。石墨烯调制器不仅可以作为激光腔中的被动调Q器件，还可以作为全光调制器件。引入另一束被周期性调制的激光通过石墨烯调制器，以改变石墨烯在激光腔内的饱和吸收特性实现对激光脉冲的调制。该石墨烯调Q激光器具有全光纤结构、重复频率精确可控等优点。在不改变激光器泵浦功率的情况下，通过主动改变调制光的重复频率，获得了与调制光重复频率一致的调Q脉冲输出。此外，调制器采用不同透过率的石墨烯薄膜获得了不同的调制深度，调制深度越大，输出脉冲的重复频率变化范围越大（最大范围为31.6～92.6 kHz），并且精确可调。这对选用合适调制深度的石墨烯调制器具有重要的参考意义。

关键词：石墨烯全光调制；主/被动调Q；脉冲重复频率；调制深度；光纤激光器

中图分类号：TN248　　　**文献标识码**：A　　　**doi**：10.3788/gzxb20225110.1014004

0　引言

调Q作为一种将连续光转换为脉冲光，从而获得高脉冲能量和高峰值功率的技术[1]，广泛应用于材料加工、生物医学、非线性频率变换等领域[2-4]。调Q脉冲主要依赖于腔内Q因子动力学，所以根据是否对腔内Q因子主动操纵分为被动调Q和主动调Q。被动调Q通常是在腔中采用不同的方法来实现可饱和吸收效应从而充当一个自操作调Q器，如非线性偏振旋转（Nonlinear Polarization Rotation，NPR）[5]和真实可饱和吸收材料（Saturable Absorber，SA）[6-14]，而后者被认为更简单有效。常用的可饱和吸收体包括化学染料、半导体可饱和吸收镜[7]、黑磷[8]、石墨烯（Graphene）[9,12]、碳纳米管[10,11]、过渡金属二硫化物[13]和其他二维材料[6,14]等。虽然被动调Q激光器结构简单，但其输出脉冲的重复频率仅依赖于泵浦功率的大小，一般不能通过调整其他参数而改变[15]。此外，即使在调节泵浦功率大小的情况下也很难精确控制其重复频率，且若想获得较高的重复频率而不断增加泵浦功率则会导致材料的SA性能退化甚至被击穿。相比于被动调Q，主动调Q可以利用外部驱动调节激光器的Q因子，因此可以灵活地控制重复频率的变化。更重要的是，在产生的脉冲和注入的信号之间可以很容易实现时间同步。传统的主动调Q激光器由电光调制器[16]或声光调制器[17]调制，但是这些调制器因为其工作带宽窄[18,19]而需要针对工作波长进行特殊设计，这限制了不同波长的光脉冲同步，获得的脉冲宽度也不是非常稳定[20]。为此，近几年提出了石墨烯电光调制器获得主动调Q[21]，然而这些主动调制器都打破了全光纤结构且结构比较复杂，并且具有成本较高、器件设计难度大、时间响应较慢等缺点。基于此，目前迫切需要一种在宽波长范围使用的光调制器，并且可获得脉冲频率精确可调、具有全光纤结构的激光器。

http://www.photon.ac.cn

从石墨烯全光调制器[22,23]中受到启发,当调制光的光子能量($h\omega > 2E_f$,E_f为石墨烯的费米能级)激发石墨烯中载流子,导致相应能级带间跃迁达到泡利阻塞,以调节激光腔内Q因子,从而调节激光器的输出。另外,石墨烯不仅可以作为可饱和吸收体和非线性元件应用于光纤激光器领域,它的光学宽带响应还可以使其广泛应用于光调制器等领域,且石墨烯易与光纤系统集成。REN Aibing 等[24]和 LI Duidui 等[25]将覆盖石墨烯薄膜的熔融拉锥光纤作为调制器,使用自搭的调Q激光器为主动调制光,分别获得重复频率为30.32~101.29 kHz 和 41.1~50.5 kHz 的输出脉冲。然而,重复频率变化范围不同的脉冲依赖于全光调制器的调制深度,但到目前为止,还没有相关文献报道。

本文将不同透过率的石墨烯薄膜放置于光纤跳线头中间作为全光纤调制器件,将该调制器熔接进谐振腔内实现了稳定的被动调Q脉冲。同时引入主动调制结构简单的 1 310 nm 激光经过石墨烯调制器对掺铒激光进行全光调制,获得了全光纤主/被动调Q激光输出。该激光器不仅可以获得窄脉宽和稳定的脉冲输出,还可以在不改变泵浦功率的情况下改变脉冲的重复频率。这在非线性变频、多色泵浦探测光谱等领域有非常重要的应用。此外,还研究了不同调制深度的石墨烯调制器对输出脉冲重复频率和脉宽变化范围的影响,研究发现,调制器的调制深度与脉冲重复频率变化范围成正比,与脉宽变化范围成反比。这为调Q激光器选取合适的石墨烯薄膜提供了参考。

1 材料制备与表征

混合匀胶制成的可饱和吸收膜具有制备方法简单、质量高、使用灵活,且易与光纤系统相结合等优点。本实验中,将聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol,PVA)加入石墨烯溶液中以制备 Graphene-PVA 可饱和吸收膜,制造过程如图1。首先将2 mg的石墨烯粉末(购自阿拉丁公司)溶于40 mL的去离子水中,通过破碎机破碎搅拌后,加入2 g PVA,用磁力搅拌机加热至75℃搅拌成胶状溶液。待胶状溶液冷却后,将溶液均匀旋涂于培养皿或载玻片表面,之后通过匀胶机开始离心甩胶。甩胶结束后,待其自然风干,此时便可制得石墨烯薄膜。通过图1中制得薄膜的颜色看出,薄膜不是完全均匀的。这是因为在离心甩胶过程中,培养皿中的离心惯性力不相等,使其在培养皿壁形成了堆叠,再者培养皿的底部高低也不均匀。本文选择了颜色深度不同的三块石墨烯薄膜,将其夹在跳线头中间形成了石墨烯全光调制器件,如图2所示。
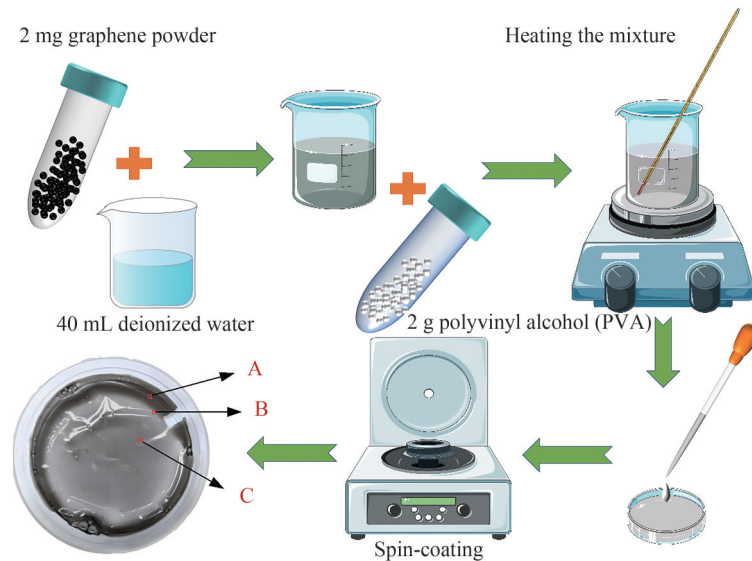

图 1 石墨烯薄膜的制作流程
Fig. 1 The production process of graphene film

功率相关的非线性传输是评价饱和吸收体性能的关键参数。因此,使用图2所示的双臂装置分别检测了三块石墨烯薄膜(A、B、C)的可饱和吸收特性。将中心波长为 1 040 nm 基于NPR技术的皮秒锁模脉冲激光器[23](Nonlinear Polarization Rotation Fiber Laser,NPRFL)作为光源,其重复频率和脉宽分别为 28.8 MHz 和 11 ps。利用可变光衰减器(Variable Optical Attenuator,VOA)控制激光器的输出光强,使光强便于调节。

使用 50∶50 的光耦合器(Optical Coupler,OC)将光分为光强相等的两束光,一束经过石墨烯薄膜后被功率计(Power Meter,PM1)检测,另一束直接被PM2检测。通过计算它们的比值得到透过率。

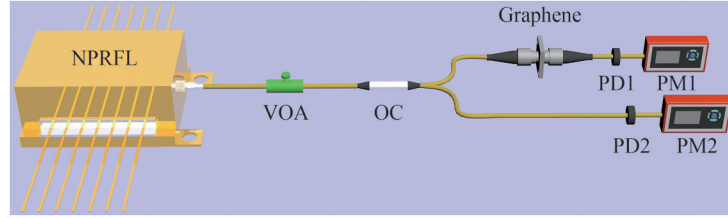
图 2　非线性吸收特性测试实验双臂装置
Fig. 2　Nonlinear absorption characteristic test experimental device

三块石墨烯薄膜的饱和吸收实验结果分别对应于图 3(a)～(c),使用SA的典型非线性透射函数拟合实验数据。此函数取决于入射光强度,透过率 T 与输入光强 I 的关系为[26]

$$T = 1 - \left(\frac{\alpha_s}{1 + I/I_{sat}} + \alpha_{ns} \right) \tag{1}$$

式中,α_s 是调制深度,I_{sat} 是饱和强度,α_{ns} 是非饱和吸收。可以看出,蓝色的实验数据点与红色的拟合曲线吻合较好。通过对实验结果的拟合,发现石墨烯薄膜(A、B、C)的调制深度分别为33.5%、18.1%和8.7%,对应的饱和强度分别为40、5.4、3.5 MW/cm²。可以看出颜色较深的石墨烯薄膜的调制深度和饱和强度更大。这是因为颜色较深的薄膜石墨烯含量较高,当激光打入薄膜,石墨烯会吸收更多的光子去激发价带中电子跃迁到导带中,使其拥有更高调制深度的潜力(本文实验也验证了这点),但同时也意味着更高的插入损耗。因此,石墨烯含量更高的薄膜实现饱和需要更强的光。
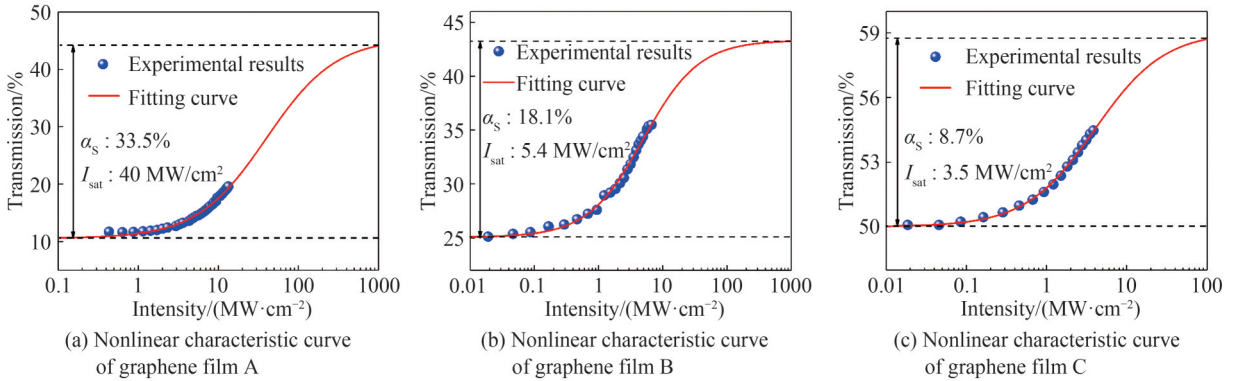

图 3　石墨烯薄膜的非线性特性曲线
Fig. 3　Nonlinear characteristic curves of graphene films

2　实验装置

实验中利用石墨烯薄膜作为全光调Q器件,研究了调Q激光器的输出特性。主/被动调Q光纤激光器的设置如图 4,由波长为 1 310 nm 的主动调制光和波长为 1 560 nm 的被动调Q掺铒环形腔光纤激光器(Erbium-Doped Fiber Laser,EDFL)组成。工作波长为 1 310 nm 的调制装置由 1 310 nm 的激光二极管(Laser Diode,LD)(FPL1053S)、数字信号发生器(Digital Signal Generator,DSG)和铌酸锂(LiNbO₃)电光调制器组成,其中 1 310 nm 的连续光通过 DSG 信号加载的 LiNbO₃ 调制器被调制为占空比为 50% 的激光,其频率通过 DSG 精确可调。LiNbO₃ 电光调制器购于 EOspace 公司,主要工作波段为 O、C、L 波段,可调频率最高为 20 GHz,光损伤阈值为 400 mW。1 560 nm 的激光腔采用 90 cm 的掺铒光纤(LIEKKI, Er110-4-125)作为增益介质,由 980 nm 的 LD 通过波分复用器(Wavelength Division Multiplexer,WDM)泵浦,使用偏振无关隔离器(Polarization-Independent Isolator,PI-ISO)保证激光的单向传输。偏振控制器(Polarization Controller,PC)来调节腔内传输光的偏振状态,通过仔细调节 PC 可以使脉冲的稳定性得到提高。调制光通过工作波长

为 1 310/1 550 nm 的 WDM 耦合入环形腔内,与腔内的信号光共同作用于全光调 Q 器件后,调制光被滤波器 (Filter)滤除。腔内 1 560 nm 的信号光经过 30∶70 的 OC 输出后被光谱仪(Agilent,HP70951B)和示波器 (Tektronix TDS2024)检测,输出功率通过功率计(Thorlabs PM100USB)测量。环形腔的总腔长为 16.5 m。
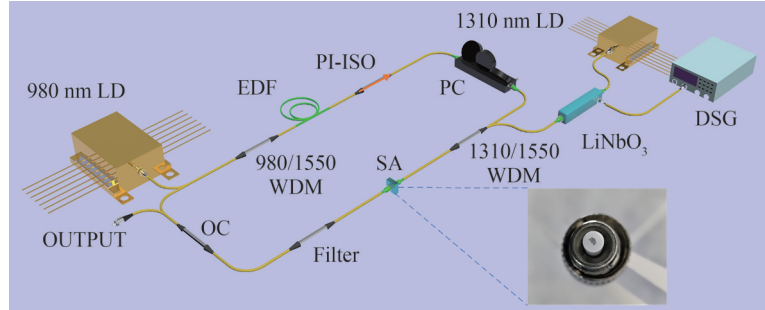

图 4 基于石墨烯全光调制器的主/被动调 Q 光纤激光器

Fig. 4 Active-passive Q-switched fiber laser based on graphene all-optical modulator

实验先将石墨烯薄膜 A 作为可饱和吸收体置于腔内。在实验过程中发现当 DSG 使用不同的电压加载 在 LiNbO₃ 电光调制器上时,激光腔的输出脉宽是不同的。因此,为了探明获得最窄脉冲时的电压(即最佳电 压),将调制光的泵浦功率和重复频率分别设置为 60 mW 和 18 kHz。当 EDFL 的泵浦功率增加到 140 mW 时,分别用 1~8 V 的电压加载在 LiNbO₃ 电光调制器上,测得的激光腔输出信号如图 5。可以看出当负载电 压为 4 V 时,激光腔的输出脉宽是最窄的,其对应的脉冲强度也是最大的。因此,在之后的实验中,LiNbO₃ 电 光调制器的负载电压设置为 4 V。
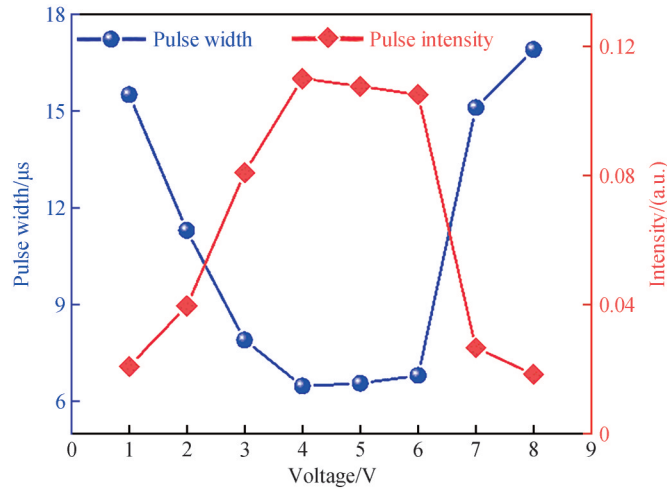
图 5 脉冲宽度和脉冲强度随 LiNbO₃ 调制器负载电压的变化

Fig. 5 Pulse width and pulse intensity vary with LiNbO₃ modulator load voltage

3 结果与讨论

首先,本文研究了 EDFL 被动调 Q 的输出性能。当泵浦功率设置为 140 mW 时,缓慢调整 PC 获得了稳 定的脉冲,如图 6(a),其脉冲间隔为 53.4 μs,对应重复频率为 18.7 kHz,脉冲宽度为 10.3 μs。之后将调制光的 泵浦功率、重复频率和负载电压分别设置为 60 mW、18 kHz 和 4 V,其输出占空比为 50% 的激光序列如图 6(c) (顶部),将占空比设为 50% 也适用于调制光为方波或正弦波的情况。然后,将调制光通过 WDM 耦合入 EDFL 形成一个主/被动调 Q 装置,通过调整 PC 获得了如图 6(b)所示的稳定脉冲,其脉冲间隔为 55.46 μs,对应的重 复频率恰好为 18 kHz,脉冲宽度为 6.34 μs。可以看出输出脉冲的重复频率被调制光的重复频率所控制,且相 比被动调 Q,脉宽明显被压窄。图 6(d)显示了主/被动调 Q 的光谱,调 Q 激光的中心波长为 1 564 nm,激光线 宽和边模抑制比分别为 0.06 nm 和 31 dB。光谱比较光滑,意味着无寄生连续波,调 Q 更加稳定有效[27]。

(a) Passive Q-switched time domain pulse train

(b) Active-passive Q-switched time domain pulse train

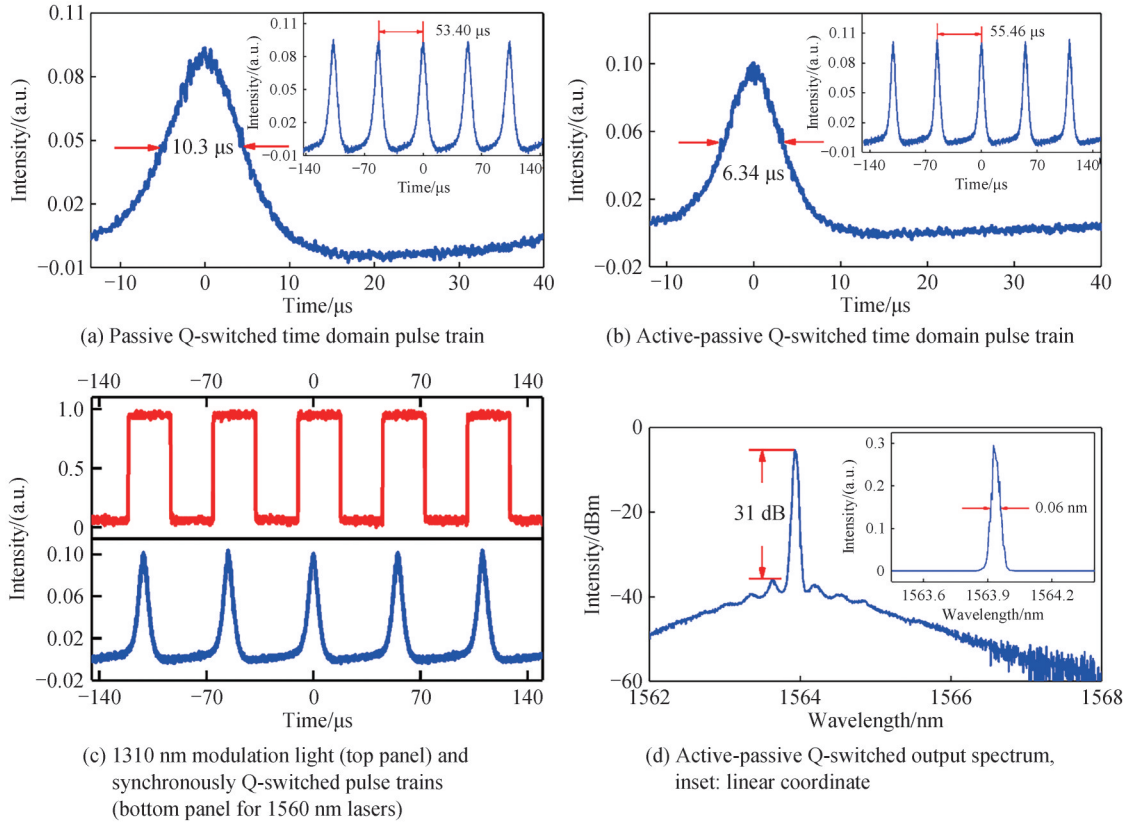(c) 1310 nm modulation light (top panel) and synchronously Q-switched pulse trains (bottom panel for 1560 nm lasers)

(d) Active-passive Q-switched output spectrum, inset: linear coordinate

图 6　调 Q 光纤激光器的输出特性

Fig. 6　Output characteristics of Q-switched fiber laser

　　由于泡利阻塞,当注入1 310 nm的调制光时,石墨烯开始吸收调制光,逐渐达到饱和,此时石墨烯对1 560 nm的光吸收减弱,1 560 nm的光在激光腔内由高损耗状态变为低损耗状态,这种状态随着调制光的周期而改变,因此输出脉冲的重复频率随着调制光的重复频率而变化,如图6(c)所示,可以发现调Q脉冲序列和调制光同步输出。调制光的入射加速了石墨烯的漂白状态,缩短了1 560 nm脉冲的形成时间,因此与1 560 nm的被动调Q激光器的输出脉冲相比,主/被动调Q激光器产生的脉冲宽度变窄[24]。

　　将泵浦功率固定在140 mW,通过DSG将调制光的重复频率从12 kHz连续变化到32 kHz,获得了稳定的1 560 nm的调Q脉冲,其重复频率随调制光重复频率的变化而变化,图7为激光输出特性随调制光重复频率的变化曲线。可以观察到输出脉冲宽度随着调制光重复频率的增加先变窄再逐渐变宽,输出脉冲能量随重复频率的增加而减小,对应的峰值功率也同样减小。这是由于脉冲周期的初始反转率和能量存储减少所致。泵浦功率为140 mW时,激光器被动调Q的重复频率为18.7 kHz。当调制频率比较低时(低于被动调Q的重复频率),每个开关周期存储在增益光纤中的能量较多,因此释放出较高脉冲能量的较长脉冲;随着调制频率增加到被动调Q的本征重复频率,激光器获得最佳窄脉冲;随着调制频率的进一步增加,每个开关周期存储在增益光纤中的能量减少,因此释放出具有较低脉冲能量的较长脉冲[21]。还可以看出,在泵浦功率固定的情况下,平均输出功率随重复频率的变化不明显。

　　之后测量了在不同的泵浦功率下,输出脉冲的重复频率和脉冲宽度的可调谐范围,如图8。图8(a)显示了输出脉冲重复频率随着泵浦功率的变化,其中蓝色的点为最大可调谐值,红色的点为最小可调谐值,黑色的点表明了在没有调制光参与时,EDFL被动调Q时脉冲的重复频率的变化。可以看出,随着泵浦功率的增加,被动调Q的重复频率从18.7 kHz增加到47.17 kHz,其对应的脉冲宽度从10.3 μs减小到5.32 μs,如图8(b)。在图中,输出脉冲重复频率的调谐范围随着泵浦功率的增大而增大,而脉冲宽度的调谐范围随着泵浦功率的增大而减小。

　　在泵浦功率较低时,被动调Q脉冲宽度下降速度快,很可能是因为电子在高能级的快速积累。然而,当泵浦功率较高时,由于石墨烯可饱和吸收体趋于饱和,电子累积速度减慢,导致脉冲宽度变化趋于平稳。同
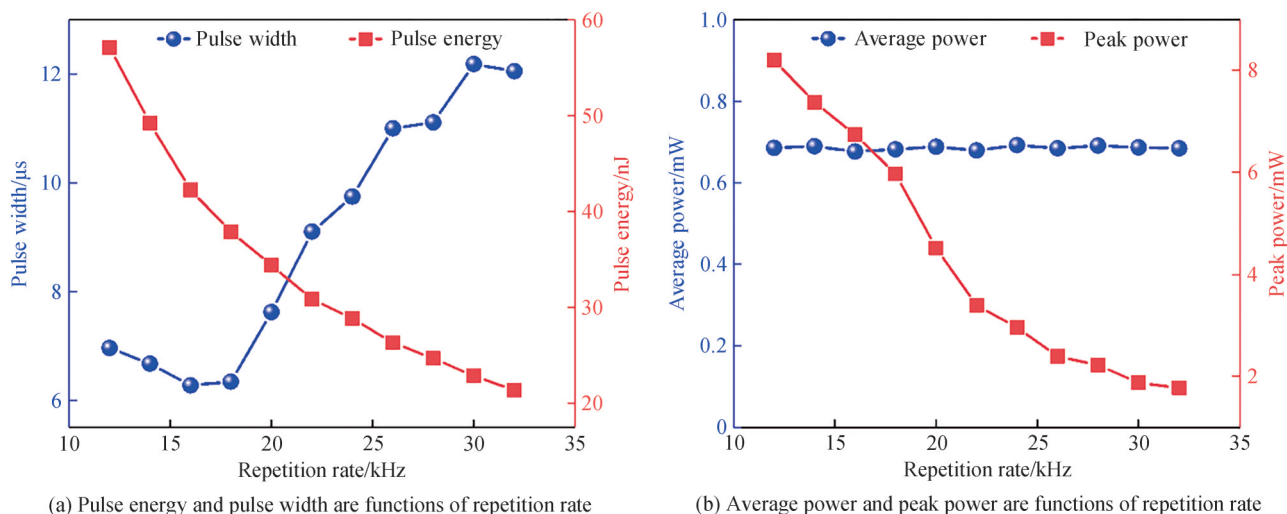
(a) Pulse energy and pulse width are functions of repetition rate

(b) Average power and peak power are functions of repetition rate

图 7 泵浦功率为 140 mW 的主/被动调 Q 光纤激光器的输出特性

Fig. 7 Output characteristics of active-passive Q-switched fiber laser with pump power of 140 mW

(a) Tunable range of pulse repetition rates
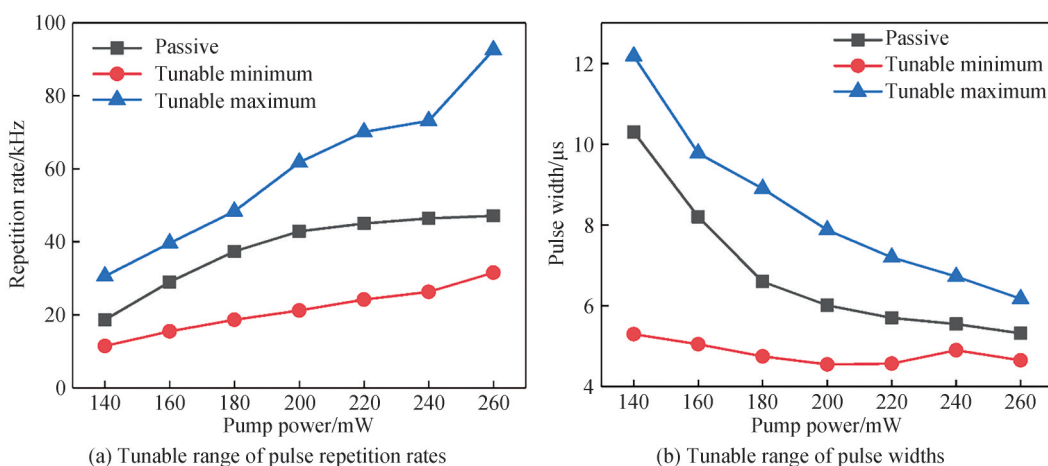

(b) Tunable range of pulse widths

图 8 不同泵浦功率下输出脉冲重复频率和脉冲宽度的可调谐范围变化

Fig. 8 Tunable range of output pulse repetition rate and pulse width varies at different pump powers

样,随着泵浦功率的增大,更多的能量将与石墨烯相互作用,从而导致石墨烯更高的调制深度,响应速度也更高[9]。由此可见,随着泵浦功率的增加,重复频率的响应范围增大,而脉冲宽度因其越平稳而调谐范围越小。

实验又分别使用石墨烯薄膜 B 和 C 置换薄膜 A,也可以获得如图 6 和图 7 的可调谐性质。图 9 显示了三块石墨烯薄膜分别在不同的泵浦功率下,输出脉冲的重复频率和脉冲宽度的可调谐范围。从中可以明显看出,石墨烯薄膜 B 和 C 的调谐性质与 A 的相似,都是随着泵浦功率的增加,其频率的可调谐范围逐渐增大,而脉宽的可调谐范围逐渐减小。当泵浦功率为 120 mW 时,薄膜 C 的频率调谐范围为 46.8 kHz,而薄膜 B 的频率调谐范围为 33.9 kHz。这是因为薄膜 B 的饱和强度比较大,此时的光强还不足以使其达到饱和,而薄膜 C 的饱和强度比较小,此时的光强足以使其达到饱和,从而调制深度更大。在图 9(b)中可以看出在泵浦功率为 120 mW 时,薄膜 C 的脉宽调谐范围很小,进一步证明了薄膜 C 已经饱和。同理,在泵浦功率小于 200 mW 时,因为薄膜 A 的饱和强度大于薄膜 B,薄膜 B 更快达到饱和,此时薄膜 B 的频率调谐能力大于薄膜 A。饱和强度越大的薄膜拥有越大的调谐潜力,当泵浦功率大于 200 mW 时,薄膜 A 渐趋于饱和,其调制深度相比薄膜 B 更大,因此可以获得更大的调谐范围。图 9 中的黄色曲线表示使用不同石墨烯的被动调制获得的频率和脉宽,其明显符合被动调 Q 的特征。

在实验过程中,EDFL 调 Q 激光器的重复频率始终等于调制光的重复频率,改变调制光的占空比也不会影响输出脉冲的重复频率,但当占空比过小(10%～15%)或过大(80%～85%)时,激光输出脉冲会变的不稳
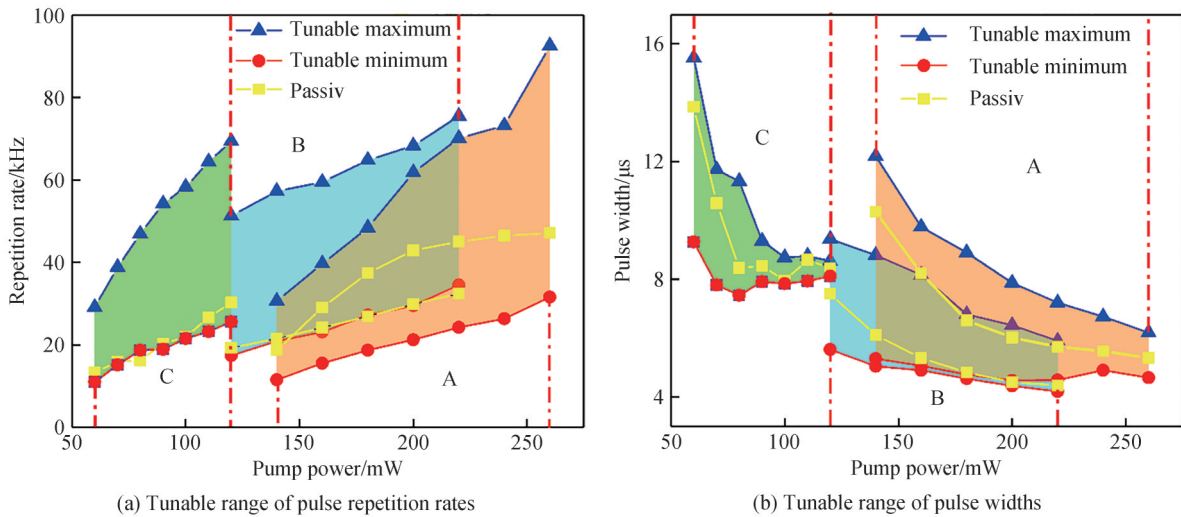
图 9 石墨烯薄膜 A、B、C 对不同泵浦功率下输出脉冲重复频率和脉冲宽度变化范围的影响

Fig. 9 Effects of graphene films A, B, C on pulse repetition rate and pulse width variation range at different pump powers

定,甚至无法工作。当关闭 1 310 nm 的泵浦光源时,EDFL 激光器立即恢复为被动调 Q 状态,证明了 1 560 nm 的可调谐调 Q 脉冲是由 1 310 nm 光调制产生的。在 EDFL 激光器泵浦功率不变的情况下,即使仔细调整 PC 也无法调谐其输出脉冲。这表明 1 310 nm 激光调制了腔的 Q 因子,有助于调谐 1 560 nm 激光脉冲。使用这种方式,不仅可以获得 1 560 nm 的稳定窄脉宽脉冲序列,还可以在不改变泵浦功率的情况下,在一定范围内实现输出脉冲重复频率和脉冲宽度的调谐操作。

4 结论

本文研究了一种基于石墨烯全光调制器的主/被动调 Q 光纤激光器。石墨烯全光调制器具有全光纤结构、全光调制、宽带应用等优点,可以作为被动调 Q 和主动调 Q 共同作用器件,使激光器同时结合了被动调 Q 和主动调 Q 的优势。在不改变泵浦功率的情况下,实现了激光器输出脉冲重复频率随调制光外加电场重复频率的变化而对应可调。研究发现,当石墨烯调制器的调制深度越大时,输出脉冲的重复频率变化范围越大,其可调脉宽范围越小,重频变化的最大范围为 31.6～92.6 kHz。这种石墨烯全光调制器比传统的调制器件更小且易于集成在光学系统中,对应用条件的要求更低,在非线性变频、多色泵浦探测光谱等领域具有广阔的应用前景。同时,本文研究还为调 Q 激光器选取合适的石墨烯薄膜提供了参考。

参考文献

[1] PETROPOULOS P, OFFERHAUS H L, RICHARDSON D J, et al. Passive Q-switching of fiber lasers using a broadband liquefying gallium mirror[J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(24): 3619-3621.

[2] OKAMOTO Y, KITADA R, UNO Y, et al. Cutting of solid type molded composite materials by Q-switched fiber laser with high-performance nozzle[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2008, 2(4): 651-660.

[3] ROHDE I, MASCH J M, THEISEN-KUNDE D, et al. Resection of calcified aortic heart leaflets in vitro by Q-switched 2 μm microsecond laser radiation[J]. Journal of Cardiac Surgery, 2015, 30(2): 157-162.

[4] SHI Wei, LEIGH M A, ZONG Jie, et al. High-power all-fiber-based narrow-linewidth single-mode fiber laser pulses in the C-band and frequency conversion to THz generation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 377-384.

[5] NELSON L E, JONES D J, TAMURA K, et al. Ultrashort-pulse fiber ring lasers[J]. Applied Physics B, 1997, 65(2): 277-294.

[6] JIANG Xiantao, LIU Shunxiang, LIANG Weiyuan, et al. Broadband nonlinear photonics in few-layer MXene $Ti_3C_2T_x$ (T = F, O, or OH)[J]. Laser & Photonics Reviews, 2018, 12(2): 1700229.

[7] KIVISTÖ S, KOSKINEN R, PAAJASTE J, et al. Passively Q-switched Tm^{3+}, Ho^{3+}-doped silica fiber laser using a highly nonlinear saturable absorber and dynamic gain pulse compression[J]. Optics Express, 2008, 16(26): 22058-22063.

[8] LI Diao, DEL RIO CASTILLO A E, JUSSILA H, et al. Black phosphorus polycarbonate polymer composite for pulsed fibre lasers[J]. Applied Materials Today, 2016, 4: 17-23.

［9］ LI Wei，CHEN Bigeng，MENG Chao，et al. Ultrafast all-optical graphene modulator［J］. Nano Letters，2014，14(2)：955-959.

［10］ LIU Xueming，HAN Dongdong，SUN Zhipei，et al. Versatile multi-wavelength ultrafast fiber laser mode-locked by carbon nanotubes［J］. Scientific Reports，2013，3：2718.

［11］ MARTINEZ A，ZHOU Kaiming，BENNION I，et al. Passive mode-locked lasing by injecting a carbon nanotube-solution in the core of an optical fiber［J］. Optics Express，2010，18(11)：11008-11014.

［12］ SUN Zhipei，HASAN T，TORRISI F，et al. Graphene mode-locked ultrafast laser［J］. ACS Nano，2010，4(2)：803-810.

［13］ SYNTJOKI A，KARVONEN L，ROSTAMI H，et al. Ultra-strong nonlinear optical processes and trigonal warping in MoS_2 layers［J］. Nature Communications，2016，8(1)：893.

［14］ YAN Xiaoxin，JIANG Man，LI Erkang，et al. Tunable high-order harmonic and dual-wavelength mode-locking in Er-doped fiber laser based on $Ti_3C_2T_x$-Mxene［J］. Applied Physics Express，2021，14(1)：012009.

［15］ YU Zhangwei，MALMSTRÖM M，TARASENKO O，et al. Actively Q-switched all-fiber laser with an electrically controlled microstructured fiber［J］. Optics Express，2010，18(11)：11052-11057.

［16］ KEE H H，LEES G P，NEWSON T P. Narrow linewidth CW and Q-switched erbium-doped fibre loop laser［J］. Electronics Letters，1998，34(13)：1318-1319.

［17］ ALVAREZ-CHAVEZ J A，OFFERHAUS H L，NILSSON J，et al. High-energy，high-power ytterbium-doped Q-switched fiber laser［J］. Optics Letters，2000，25(1)：37-39.

［18］ WILLIAMS R J，JOVANOVIC N，MARSHALL G D，et al. All-optical，actively Q-switched fiber laser［J］. Optics Express，2010，18(8)：7714-7723.

［19］ HU T，HUDSON D D，JACKSON S D J O L. Actively Q-switched 29 μm $Ho^{3+}Pr^{3+}$-doped fluoride fiber laser［J］. Optics Letters，2012，37：2145-2147.

［20］ ESCALANTE-ZARATE L，BARMENKOV Y O，KOLPAKOV S A，et al. Smart Q-switching for single-pulse generation in an erbium-doped fiber laser［J］. Optics Express，2012，20(4)：4397-4402.

［21］ LI Diao，XUE Hui，WANG Yadong，et al. Active synchronization and modulation of fiber lasers with a graphene electro-optic modulator［J］. Optics Letters，2018，43(15)：3497-3500.

［22］ WANG Ruiduo，LI Diao，WU Hao，et al. All-optical intensity modulator by polarization-dependent graphene-microfiber waveguide［J］. IEEE Photonics Journal，2017，9(6)：7105708.

［23］ HAN Jing，QI Mei，WU Hao，et al. All-optical modulator based on reduced graphene oxide coated D-shaped fiber waveguide［J］. Applied Physics Express，2019，12(11)：112002.

［24］ REN Aibing，FENG Ming，SONG Feng，et al. Actively Q-switched ytterbium-doped fiber laser by an all-optical Q-switcher based on graphene saturable absorber［J］. Optics Express，2015，23(16)：21490-21496.

［25］ LI Duidui，ZHU Jiwen，JIANG Man，et al. Active-passive Q-switched fiber laser based on graphene microfiber［J］. Applied Physics B，2019，125(11)：203.

［26］ GARMIRE E. Resonant optical nonlinearities in semiconductors［J］. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics，2002，6(6)：1094-1110.

［27］ CHEN Bohua，ZHANG Xiaoyan，WU Kan，et al. Q-switched fiber laser based on transition metal dichalcogenides MoS_2，$MoSe_2$，WS_2，and WSe_2［J］. Optics Express，2015，23(20)：26723-26737.

Active-passive Q-switched Fiber Laser Based on Graphene All-optical Modulation（Invited）

WANG Tianqi[1,2]，LI Duidui[1,2]，LIU Beibei[1,2]，JIANG Man[1,2]，SUN Zhipei[3]，REN Zhaoyu[1,2]

(1 Institute of Photonics & Photon-technology，Northwestern University，Xi'an 710127，China)
(2 Shaanxi All Solid State Laser and Application Engineering Technology Research Centre，Xi'an 710127，China)
(3 Department of Electronics and Nanoengineering，Aalto University，Espoo FI-02150，Finland)

Abstract：Q-switching is a technology that converts continuous light into pulse light to obtain high pulse energy and peak power. It is widely used in material processing，biomedicine，nonlinear frequency conversion and other fields. Generally，Q-switching can be divided into passive and active mechanisms. The passive Q-switching is achieved by inserting a saturable absorber into the cavity. Its structure is simple，but the repetition frequencies of the output pulses depend only on the pump power. Active Q-

switching uses external drive electro-optic and acousto-optic modulator to adjust the Q factor of the laser to achieve pulse output. These types of Q-switching system can flexibly control the change of pulse repetition rate, but it breaks the all-fiber structure and leads to a high cost. More importantly, the modulator needs to be specially designed because of the narrow working bandwidth. However, we are inspired by the graphene all-optical modulator, which can regulate the attenuation of the specific light in graphene by introducing another frequency of light into the graphene, thus regulating the in-cavity Q factor. In addition, graphene acts as a saturable absorber in the laser cavity. Therefore, we have built an active-passive Q-switched fiber laser based on graphene all-optical modulator, which can not only obtain stable narrow pulse, but also flexibly change the repetition frequency without changing the pump power. It has an all-fiber structure and a wide working bandwidth. At the same time, we also studied the effects of different modulation depths of graphene on the pulse repetition rate and pulse width variation range. Here, the graphene-films are made by spin-coating the graphene Polyvinyl Alcohol (PVA) water solution, which are placed between two fiber connectors to form graphene modulators. We measured the modulation depths and saturation strengths of three graphene (A, B, C), of which the modulation depths are 33.5％, 18.1％ and 8.7％, corresponding to saturation strengths of 40, 5.4 and 3.5 MW/cm^2, respectively. Then, we built an active-passive Q-switched fiber laser, which consists of an active modulated light with a wavelength of 1 310 nm and a passive Q-switched Erbium-doped ring cavity fiber laser with a wavelength of 1 560 nm. First, a passive Q-switching pulse with a repetition frequency of 18.7 kHz and a pulse width of 10.3 μs is obtained when the active modulated light is turned off. After that, we turned on the modulation light and set the repetition frequency of the modulation light to 18 kHz, and obtained a output pulse with a repetition frequency of 18 kHz and the pulse width of 6.34 μs. It can be seen that the repetition frequency of the output pulse is controlled by the repetition frequency of the modulated light, and the output pulse width is significantly narrower than the passive Q-switched pulse width. Further study shows that the output pulse width gradually widens with the increase of the modulation repetition frequency, while the pulse energy and peak power decrease, which is attributed to as the modulation frequency increases, the energy stored in the gain fiber per switching cycle reduces and therefore releases longer pulse with lower pulse energy. The experiment also explored the effects of three graphene films with different saturation strengths on the repetition frequency and pulse width variation range of the output pulse at different pumping powers. It shows that when the modulation depth of graphene modulator is larger, the variation range of output pulse repetition rate is larger, the variation range of output pulse width is smaller, and the maximum variation range of repetition rate is 31.6 ～92.6 kHz. The modulator described in this paper is easier to be integrated into optical system than the traditional modulator, and has a broad application prospect in nonlinear frequency conversion, multi-color pump detection spectrum and other fields. At the same time, the research also provides a reference for selecting suitable graphene films in the field of Q-switched lasers.

Key words：Graphene all-optical modulation；Active-passive Q-switching；Pulse repetition rate；Modulation depth；Fiber laser

OCIS Codes：140.3500；140.3510；140.3540；060.3510