

石墨烯锁模的全保偏光纤激光器

陈 恺¹, 祝连庆^{1,2}, 娄小平^{1,2}, 姚齐峰¹, 骆 飞¹

(1. 北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100016; 2. 北京信息科技大学 生物医学检测技术及仪器北京实验室, 北京 100192)

摘要:报道了一种基于反射式石墨烯可饱和吸收镜锁模的全保偏掺铒光纤激光器。分别使用单层和十层石墨烯作为可饱和吸收器件,通过全保偏结构,避免了外界环境对腔内偏振态的影响,获得了高稳定性、高偏振度、易自启动的锁模脉冲输出,脉冲宽度分别为 697 fs 和 502 fs。实验表明,十层石墨烯相比于单层石墨烯能够获得更窄的脉冲宽度,更高的峰值功率,具有好的锁模效果。研究同时发现,经十层石墨烯锁模,进一步提高泵浦功率,可在全保偏光纤腔中获得重复频率 62.94 MHz 的二阶谐波锁模脉冲输出。并通过非线性薛定谔方程对谐波锁模产生的机理进行了分析。这种基于反射式可饱和吸收镜的全保偏锁模光纤激光器有望成为实现基频锁模与谐波锁模可切换的单偏振激光源。

关键词: 锁模光纤激光器; 全保偏; 反射式石墨烯可饱和吸收镜

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1005004

All-polarization-maintaining fiber laser mode-locked by graphene

Chen Kai¹, Zhu Lianqing^{1,2}, Lou Xiaoping^{1,2}, Yao Qifeng¹, Luo Fei¹

(1. Beijing Key Laboratory for Optoelectronics Measurement Technology, Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China;

2. Beijing Laboratory for Biomedical Detection Technology and Instrument, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: An all-polarization-maintaining erbium-doped fiber laser mode-locked by graphene saturable absorber mirror was reported. The laser with monolayer and ten-layer graphene as saturable absorbers devices avoided the influence of environment on the intracavity polarization and generates high stability, high degree of polarization and self starting mode-locked pulse output with pulse width of 697 fs and 502 fs. Compared to single layer graphene, the ten layers graphene can obtain shorter pulse width, higher peak power and better mode locking effect. While the pump power increases, a two harmonic mode-locked pulse with 62.94 MHz repetition frequency can be generated. The mechanism of harmonic mode locking was analyzed by nonlinear Schrodinger equation. The mode-locking laser cavity based on the reflection mirror was

收稿日期:2017-02-10; 修订日期:2017-03-20

基金项目:教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT1212);北京市科技计划项目(Z151100003615010);北京市教委 2015 年度创新能力提升计划项目(TJSHG201510772016)

作者简介:陈恺(1990-),男,硕士生,主要从事光纤激光器等方面的研究。Email: 347248645@qq.com

导师简介:祝连庆(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感、激光器技术及生物医学检测技术与仪器方面的研究。
Email: zhulianqing@sina.com

expected to be the excellent single polarization femtosecond fiber laser source which can be switched between the fundamental frequency and the two harmonic.

Key words: mode-locked fiber laser; all-polarization-maintaining; reflection type graphene saturated absorber mirror

0 引言

脉冲光纤激光器^[1-3]作为脉冲光源具有结构紧凑,稳定性高,转化效率高,光束质量好,易维护和成本低等优势,在工业加工、医疗、通信等领域具有广泛的应用前景。尤其基于光纤锁模技术的超短脉冲研究在精细加工,光纤传感,精密光学测量等领域潜力巨大。目前所报道的主要锁模光纤激光技术包括非线性偏振旋转(Nonlinear Polarization Evolution, NPR)锁模^[4]、非线性光纤环镜(Nonlinear Optical Loop Mirrors, NOLM)锁模^[5]、半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM)锁模^[6]以及单壁碳纳米管(Single-Walled Carbon Nanotubes, SWNT)锁模^[7-8]等。NPR与NOLM技术的缺点是在激光腔内加入的起偏器和偏振控制器等元件导致了腔内更多损耗。SESAM制作和封装工艺复杂,价格昂贵且可饱和吸收谱范围较窄。SWNT因其作用波长与其纳米管直径尺寸相关,对波长具有选择性,从而限制了其应用。

石墨烯自 2004 年问世以来^[9],以其独特的非线性光学特性,及优秀的可饱和吸收特性而获得越来越多的关注。其独特的线性能带结构,使其在很宽的光谱范围(300~3 000 nm)实现非线性饱和吸收^[10-15];另外,石墨烯还具有较高的调制深度、高的损伤阈值、超快的恢复时间^[16],价格低廉、易于制作等优点。所以,基于石墨烯的光调制技术已经成为脉冲光纤激光器的研究热点。2009 年,南洋理工大学 Bao 等^[17]首次以石墨烯作为可饱和吸收体实现了脉冲宽度为 756 fs,重复频率为 1.79 MHz,中心波长为 1 565 nm 的掺铒锁模光纤激光输出。2010 年,剑桥大学 Sun 等^[18]采用石墨烯作为可饱和吸收体,通过腔内加入带通滤波器,获得中心波长在 1 525~1 559 nm 之间可调谐的孤子脉冲输出。2013 年,山东大学冯德军等^[19]采用少层石墨烯可饱和吸收体在环形腔中通过改变两个光纤活动接头之间的空气腔

的长度实现了激光波长在 1 557~1 561 nm 范围内连续可调谐脉冲输出。2014 年,香港理工大学 He 等^[20]基于石墨烯实现熔锥光纤倏逝场锁模,通过改变腔内的偏振态实现了脉冲宽度在 2.32~9.24 ps 的可调谐输出。2015 年,弗罗茨瓦夫科技大学 Jaroslaw 等^[21]以 60 层石墨烯作为可饱和吸收体结合色散补偿光纤实现了脉冲宽度为 88 fs 的锁模激光输出。同年,剑桥大学 Purdie 等^[22]基于透射式石墨烯可饱和吸收体实现全光纤结构锁模激光输出,并通过腔外压缩获得脉冲宽度 29 fs 的超短脉冲。

全保偏光纤谐振腔具有:(1) 可避免环境中外力(压力、弯曲等)引起的光纤双折射变化造成锁模激光不稳定^[23];(2)可保持激光以单一线偏振方向沿保偏光纤慢轴在腔内传输,更易实现锁模脉冲自启动;(3)可减少偏振控制器等元件的使用,降低腔内损耗等优势。这种谐振腔已被应用于多种光纤锁模技术中,如 NOLM^[24]、SESAM^[25]、SWNT^[26]、石墨烯^[27]、氧化石墨烯^[23]等。相比于目前报道的基于透射式结构石墨烯锁模的全保偏光纤激光器,文中采用反射式石墨烯可饱和吸收镜,通过调节反射镜的角度,改变光波在石墨烯中的往返光程和从反射镜返回并耦合到环形器的强度,实现了对腔内损耗和调制深度的调节。因此调节方式更具有灵活性。

文中报道了一种基于反射式石墨烯可饱和吸收镜锁模的全保偏掺铒光纤激光器。分别研究了单层和十层石墨烯可饱和吸收镜在同一掺铒光纤激光器中的锁模激光特征。研究发现,单层石墨烯可饱和吸收镜在泵浦功率 94 mW 时产生稳定的锁模脉冲,脉冲宽度为 697 fs,重复频率约为 31.47 MHz,单脉冲能量为 0.11 nJ,峰值功率为 138.7 W;十层石墨烯可饱和吸收镜在泵浦功率 102 mW 时也获得了具有近相同重复频率的稳定锁模脉冲,其脉冲宽度为 502 fs,单脉冲能量为 0.12 nJ,峰值功率为 202.4 W。通过对比发现,单层石墨烯产生锁模激光的泵浦功率阈值更低。相比于单层石墨烯,十层石墨烯具有较高的调

制深度^[4],能更有效地压缩脉冲边缘,缩短脉宽,提升峰值功率;另外,十层石墨烯锁模下,进一步增加泵浦功率至 108 mW 时,可获得重复频率 62.94 MHz 的二阶谐波锁模脉冲输出。

1 石墨烯的制备与测试

该实验中使用的石墨烯制备方法如下:首先,通过化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 法沉积在铜箔载片上,然后使用低温转移方法,利用 PMMA 高分子溶液逐层转移到保护金反射镜上,使石墨烯与反射镜金膜充分接触,避免产生气泡,最后利用丙酮将 PMMA 溶解去除。采用此方法可得到高质量的单层或多层石墨烯饱和吸收镜。试验中使用通过上述方法制备的单层及十层石墨烯。为检测石墨烯品质,将其分别置于拉曼光谱仪下,测得其拉曼光谱如图 1 所示。图 1(a)为单层石墨烯拉曼光谱,波数在 1 340 cm⁻¹的为石墨烯的 D 峰,波数在 1 588 cm⁻¹的为石墨烯的 G 峰,波数在 2 676 cm⁻¹的为石墨烯的 2D 峰。其中 D 峰为缺陷峰,G 峰和 2D 峰为石墨烯的特征峰。 $I_{2D}/I_G > 2$,表明该石墨烯为单层,且 D 峰强度低,表明该石墨烯缺陷较少,一致性好。图 1(b)为十层石墨烯拉曼光谱,可以看出 I_{2D}/I_G 的比值减小,表明石墨烯现在层数为多层。由于试验中使用的十层石墨烯为逐层转移。随着层数的增多,石墨烯缺陷会逐渐累积,表现为 D 峰强度升高。对比单层石墨烯拉曼光谱,石墨烯 2D 峰出现蓝移,可能为随着逐层转移,石墨烯受到的应力导致。

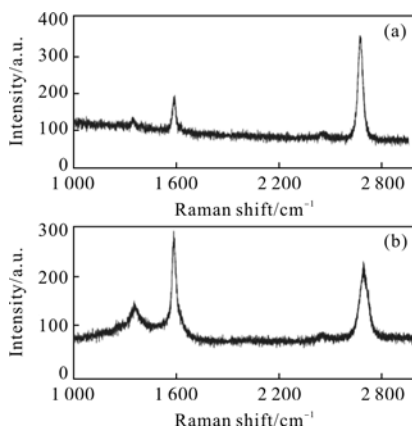


图 1 (a) 单层石墨烯拉曼光谱,(b) 十层石墨烯拉曼光谱
Fig.1 (a) Raman spectra of monolayer graphene,
(b) Raman spectra of ten-layer graphene

石墨烯是典型的两能级饱和吸收体,其非线性饱和吸收由下式给出:

$$a(I) = \frac{a_0}{1 + I/I_{sat}} + a_{ns} \quad (1)$$

式中: $a(I)$ 为吸收系数; I 为光强; I_{sat} 为饱和强度; a_0 为调制深度; a_{ns} 表示非饱和吸收。

图 2 为十层石墨烯在不同入射功率下石墨烯的非线性吸收。测试光源为中心波长为 1 556 nm,脉冲宽度 2 ps,重复频率 78 MHz 的 SESAM 锁模掺铒光纤激光器。通过对公式(1)拟合得到十层石墨烯的调制深度约为 14%,饱和强度约为 6.4 MW/cm²,非饱和吸收为 58%。

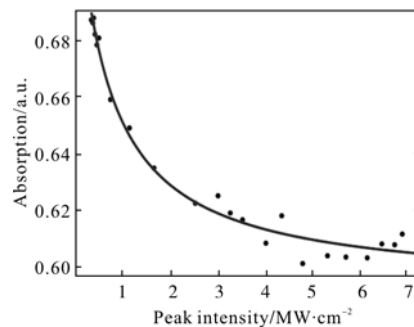


图 2 十层石墨烯非线性吸收曲线
Fig.2 Nonlinear absorption curve of ten-layer graphene

2 实验装置

文中研究所用实验装置主要由 1 m 熊猫型保偏掺铒光纤,一个 980/1 550 保偏波分复用器,石墨烯可饱和吸收镜,一个 30%输出保偏耦合器和一个保偏环形器组成,如图 3 所示。装置中的保偏光纤和保偏器件均由 Fujikura 光纤熔接机(FSM-100)沿慢轴精确对准熔接。该激光器是由带单模尾纤输出的 976 nm 激光二极管(Laser Diode,LD)进行反向泵浦。所用的保偏掺铒光纤 (Nufern 公司,PM-ESF-7/125) 在 976 nm 处的吸收系数约为 24 dB/m,在 1 550 nm 波长处具有约 -0.02 ps²/m 的群速度色散(Group Velocity Dispersion,GVD)。保偏环形器因具有较高的隔离度(~50 dB),可以实现激光在腔内的单向传输,并可把石墨烯可饱和吸收镜有效接入到谐振腔内。文中采用的环形器端口 2 是由一个直径约 2 mm,长度约 4 mm,输出端具有 8°倾角的短棒形光纤组成,耦合效率高,对 1 550 nm 近准直输出。总腔长约

为 6.5 m, 总群速度色散约为 -0.13 ps^2 。

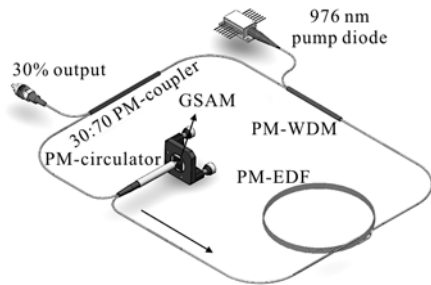


图 3 基于反射式石墨烯可饱和吸收镜锁模的全保偏掺铒光纤激光器原理图

Fig.3 Schematic diagram all-polarization-maintaining erbium-doped fiber laser mode-locked by graphene saturable absorber mirror

实验中用于测量锁模激光输出特征的设备有: 光谱分析仪(Yokogawa AQ6375, 分辨率 0.05 nm)、频谱分析仪(Keysight EXA N9010A)、偏振消光比测试仪(PEM-330)、光电探测器(ThorLabs, 5 GHz 带宽), 示波器(LeCroy 610 Zi 1 Ghz 带宽) 和自相关仪(Fem-tochrome FR103XL), 分别用于测量脉冲激光的光谱、频谱、偏振消光比、脉冲序列和时域波形等, 如图 4 所示。

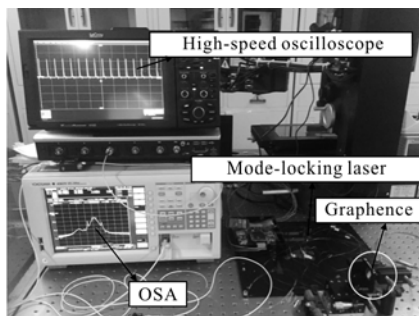


图 4 基于石墨烯可饱和吸收镜锁模的全保偏掺铒光纤激光器实验装置图

Fig.4 Experimental diagram all-polarization-maintaining erbium-doped fiber laser mode-locked by graphene saturable absorber mirror

3 实验结果与分析

首先, 实验研究了单层石墨烯可饱和吸收镜在全保偏掺铒光纤腔中的锁模激光特性。当泵浦功率升至 69 mW 时, 调节单层石墨烯可饱和吸收镜, 可获得稳定的自启动锁模脉冲输出。因单层石墨烯具

有较低的线性吸收, 泵浦功率明显比 SESAMs 和 SWCNTs 锁模激光泵浦阈值低很多^[6,8]。图 5 为数字示波器测得的锁模脉冲序列, 脉冲序列稳定, 相邻脉冲间隔约为 31.80 ns, 与激光器的腔长符合, 说明此时激光器处在连续锁模状态。此时激光器的锁模光谱如图 6(a)所示, 中心波长为 1 558.95 nm, 3 dB 谱宽为 4.48 nm。当泵浦功率升至 94 mW 时, 3 dB 谱宽为 4.97 nm, 平均功率为 3.478 mW, 对应的单脉冲能量为 0.11 nJ。从光谱上可以观察到明显的凯利

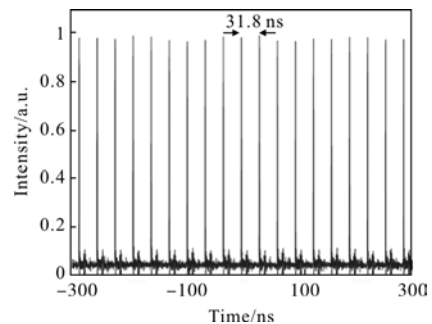


图 5 石墨烯可饱和吸收镜锁模脉冲序列

Fig.5 Sequence of mode-locked pulse by the graphene saturable absorber mirror

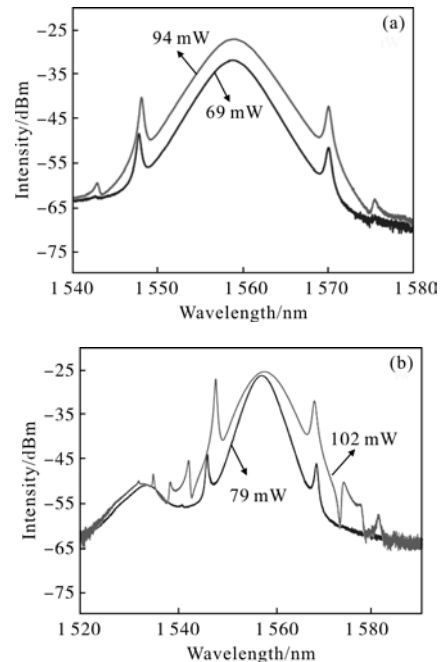


图 6 (a) 单层石墨烯可饱和吸收镜锁模激光光谱, (b) 十层石墨烯可饱和吸收镜锁模激光光谱

Fig.6 (a) Optical spectrum of the mode-locked laser by the monolayer graphene saturable absorber mirror, (b) optical spectrum of the mode-locked laser by the ten-layer graphene saturable absorber mirror

边带,说明激光器工作在孤子锁模状态。并且研究发现,随着泵浦功率的增加,输出锁模激光光谱逐渐展宽,同时各级边带逐渐增强,说明孤子脉宽变窄,逐渐逼近理论极限。

在同一谐振腔中,换以十层石墨烯可饱和吸收体,可实现在中心波长 1 557.57 nm 处锁模激光输出。当泵浦功率到达 79 mW 时,调节石墨烯可饱和吸收镜,得到稳定的锁模脉冲输出,3 dB 谱宽为 4.60 nm;当泵浦功率为 102 mW 时,3 dB 谱宽为 6.61 nm,平均功率为 3.634 mW,对应的单脉冲能量为 0.12 nJ,如图 6(b)所示。随着泵浦功率增加,同样各级边带逐渐增强。

相对于单层石墨烯,十层石墨烯可饱和吸收体激发锁模激光的泵浦功率阈值明显提高了 10 mW。可归因于石墨烯的线性损耗。根据透射率公式:

$$T(N)=(1-\pi a)^N \quad (2)$$

式中: T 为透射率; N 为石墨烯层数; a 为精细结构常数($=1/137$)。随石墨烯层数增加,其线性损耗升高,从而提高了腔内总体损耗,进而锁模激光泵浦功率阈值升高。不同层数锁模中心波长漂移亦与损耗变化有关,随石墨烯层数增加,腔内损耗增大,光谱中心波长蓝移^[29]。

利用自相关仪分别测量了单层和十层石墨烯锁模脉冲自相关信号,如图 7 所示。经单层石墨烯锁模,泵浦功率为 94 mW 时,假设输出锁模激光脉冲形状为双曲正割(Sech2)类型,获得输出脉冲的宽度约为 697.7 fs,峰值功率为 138.7 W,对应的时间带宽积为 0.427,接近理论极限值 0.315。经十层石墨烯锁模下泵浦功率 102 mW 时,可获得输出脉冲的宽度约为 502 fs,峰值功率为 202.4 W,对应的时间带宽积为 0.411。从上述实验结果中可以看出在具有相似单脉冲能量的情况下,十层石墨烯相比于单

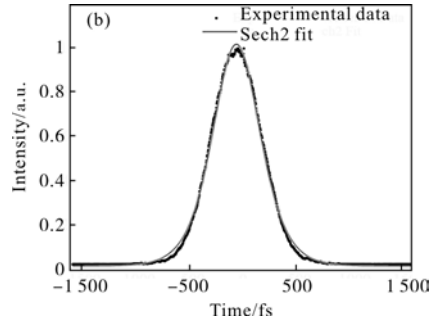
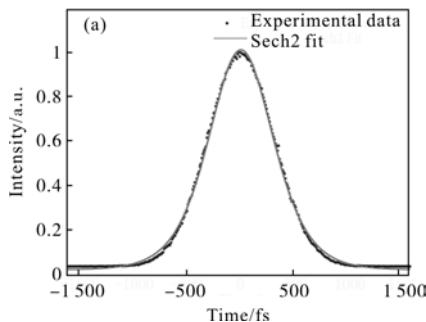


图 7 (a) 单层石墨烯可饱和吸收镜锁模激光器的自相关轨迹, (b) 十层石墨烯可饱和吸收镜锁模激光器的自相关轨迹
Fig.7 (a) Self correlation trajectory of the mode-locked laser by the monolayer graphene saturable absorber mirror, (b) self correlation trajectory of the mode-locked laser by the ten-layer graphene saturable absorber mirror

层石墨烯能够更好地缩短脉宽,提高峰值功率。与参考文献[27]报导的结果相符。

实验利用频谱分析仪研究了锁模激光脉冲的频谱特征。在 50 kHz 测量范围内和 50 Hz 分辨率下测得锁模激光的基频信息,如图 8 所示。基于单层石墨烯和十层石墨烯的锁模脉冲基频分别为 31.468 6 MHz

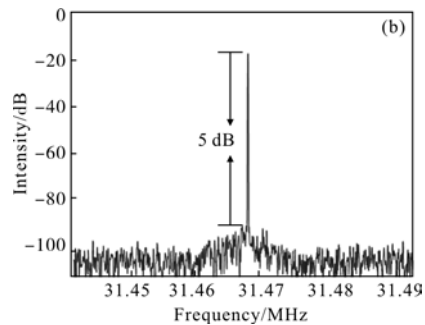
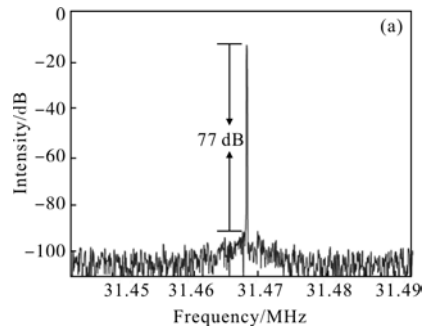


图 8 (a) 单层石墨烯可饱和吸收镜锁模激光器的频谱, (b) 十层石墨烯可饱和吸收镜锁模激光器的频谱
Fig.8 (a) RF spectrum of the mode-locked laser by the monolayer graphene saturable absorber mirror, (b) RF spectrum of the mode-locked laser by the ten-layer graphene saturable absorber mirror

和 31.4687 MHz,因在同一腔内,具有相似的脉冲基频;激光器的信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)分别大于 77 dB 和 75 dB,说明激光器处于高稳定的锁模状态。同时,通过消光比测试仪研究了输出激光的偏振度。结果发现,输出锁模激光的偏振消光比均大于 18.0 dB,具有很高的偏振度。

研究还发现,基于十层石墨烯在同一环形腔中可实现二阶谐波锁模。当泵浦功率升至 108 mW 时,通过示波器可以观测到相邻脉冲间隔为 15.95 ns 的二阶谐波锁模脉冲序列,如图 9(a)所示。在较高泵浦功率下产生谐波锁模的机理主要是高阶光孤子的不稳定性与孤子间相互作用力造成的^[28]。

光纤中的非线性薛定谔方程为:

$$j \frac{dA}{dz} = -\frac{\beta''_0 d^2 A}{dt^2} + \gamma |A|^2 A \quad (3)$$

式中: A 为归一化电场包络; β''_0 为光纤二阶群速度色散; γ 为光纤非线性参数。可以得到在反常色散区的一阶孤子解:

$$A(t,z) = \sqrt{\frac{|\beta''_0|}{\gamma \tau}} \operatorname{sech}\left(\frac{t}{\tau}\right) e^{j \frac{\pi}{4z_0} z} \quad (4)$$

$$z_0 = \frac{\pi}{2} \frac{|\beta''_0|}{\tau} \quad (5)$$

一阶孤子的能量可由对公式(4)积分算出:

$$E = \frac{2|\beta''_0|}{\gamma \tau} \quad (6)$$

从公式(6)可以看出,光孤子的能量 E 与脉冲宽度 τ 成反比,但是由于凯利边带的产生限制了脉冲宽度的进一步缩小,所以对于一定的激光腔,对于孤子能量都有一定的限制。当泵浦功率上升时,就会产生不稳定的高阶孤子,高阶孤子在腔内周期性的改变形状就会与低阶孤子发生相互作用,最终形成谐波锁模。另外,可以观察到脉冲幅值出现了调制,这是由孤子激光器中色散波的调制不稳定性造成的。在孤子激光器中,色散波的强度超过产生调制不稳定性效应的阈值后,它们就会变得不稳定,因此孤子脉冲的峰值出现一定的幅度调制^[29]。图 9 (b) 为二阶谐波锁模脉冲的频谱,重复频率为 62.94 MHz。其 SNR 大于 54 dB,表明系统稳定运行。图 9(c)为自相关仪采集的脉冲自相关信号,脉冲宽度为 852 fs,与基频锁模脉冲相比出现了展宽。二

阶谐波锁模的光谱图见图 9(d),3 dB 谱宽为 3.61 nm。尽管提高了泵浦功率,相比于基频锁模,二阶谐波锁模激光光谱明显谱宽变窄,而且光谱边带强度有明显减弱,这可归因于脉冲完全分裂致使单脉冲能量的大幅降低。

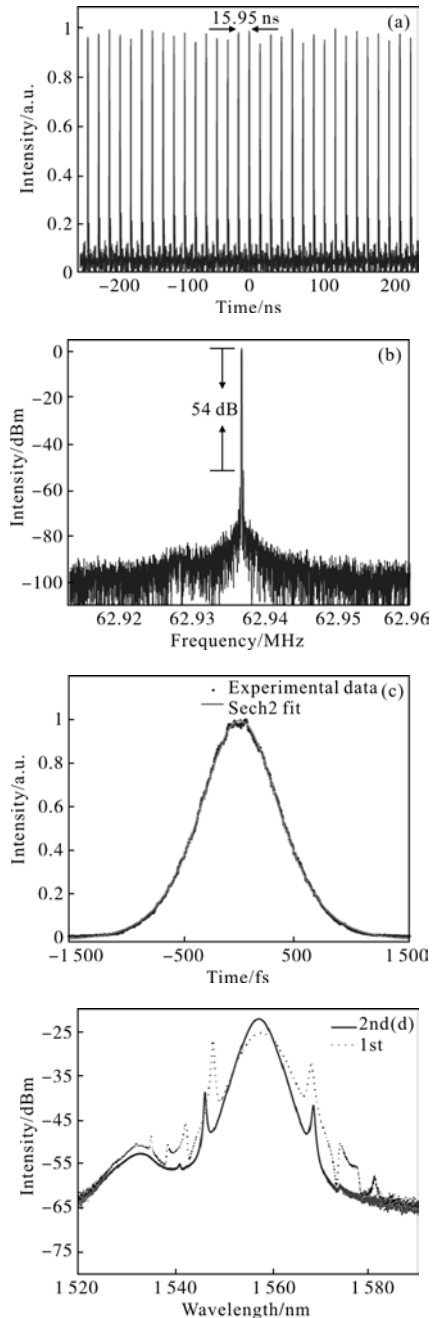


图 9 二阶谐波锁模激光的:(a) 脉冲序列 (b) 频谱, (c) 自相关轨迹, (d) 光谱

Fig.9 Second order harmonic mode-locked laser: (a) pulse train of mode-locked pulse, (b) RF spectrum, (c) self correlation trajectory, (d) optical spectrum

4 结 论

文中分别研究了基于单层和十层石墨烯反射式可饱和吸收镜锁模的全保偏掺铒光纤激光器。采用单层石墨烯可饱和吸收镜,实现了中心波长为 1 558.95 nm 的锁模激光输出,脉冲宽度 697 fs,峰值功率 138.7 W;采用十层石墨烯可饱和吸收镜获得了中心波长 1 557.57 nm 的锁模激光输出,脉冲宽度 502 fs,峰值功率 202.4 W。研究还发现,对于十层石墨烯可饱和吸收镜,增加泵浦功率至 108 mW 时,可获得稳定的二阶谐波锁模激光输出。通过对比发现,基于单层石墨烯锁模激光具有较低的泵浦功率阈值;基于十层石墨烯锁模激光具有更窄的脉宽和更高的峰值功率,并且增加泵浦功率可实现二阶谐波锁模输出。文中设计的基于反射式石墨烯锁模的全保偏脉冲光源,可实现基频锁模与谐波锁模切换的单一偏振飞秒激光输出。

参考文献:

- [1] Shen X, Zhang H, Hao H, et al. High energy, single-polarized, single-transverse-mode, nanosecond pulses generated by a multi-stage Yb-doped photonic crystal fiber amplifier[J]. *Optics Communications*, 2015, 345: 168-172.
- [2] Zhang H, Shen X, Chen D, et al. High energy and high peak power nanosecond pulses generated by fiber amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(22): 2295-2298.
- [3] Yuan Ruixia, Peng Jiying, Li Zuohan, et al. Nd:YVO₄ self-mode-locked picosecond laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0305001. (in Chinese)
袁瑞霞, 彭继迎, 李祚涵, 等. Nd:YVO₄ 自锁模皮秒激光器 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(3): 0305001.
- [4] Tao S, Xu L, Chen G, et al. Ultra-high repetition rate harmonic mode-locking generated in a dispersion and nonlinearity managed fiber laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(9): 2354-2357.
- [5] Chen H, Chen S, Jiang Z, et al. 0.4 μJ, 7 kW ultrabroadband noise-like pulse direct generation from an all-fiber dumbbell-shaped laser [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5490-5493.
- [6] Zhang L, Zhou J, Wang Z, et al. SESAM mode-locked, environmentally stable, and compact dissipative soliton fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(13): 1314-1316.
- [7] Krylov A A, Sazonkin S G, Arutyunyan N R, et al. Performance peculiarities of carbon-nanotube-based thin-film saturable absorbers for erbium fiber laser mode-locking [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 33(2): 134.
- [8] Dong Xinzhen, Yu Zhenhua, Tian Jinrong, et al. A 147 fs mode-locked erbium-doped fiber laser with a carbon nanotubes saturable absorber in evanescent field [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(3): 034202. (in Chinese)
董信征, 于振华, 田金荣, 等. 147 fs 碳纳米管倏逝场锁模全光纤掺铒光纤激光器 [J]. *物理学报*, 2014, 63(3): 034202.
- [9] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films [J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
- [10] Yamashita S, Martinez A, Xu B. Short pulse fiber lasers mode-locked by carbon nanotubes and graphene [J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(6): 702-713.
- [11] Baek I H, Lee H W, Bae S, et al. Efficient mode-locking of sub-70-fs Ti:Sapphire laser by graphene saturable absorber[J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(3): 339-345.
- [12] Zaugg C A, Sun Z, Wittwer V J, et al. Ultrafast and widely tuneable vertical-external-cavity surface-emitting laser, mode-locked by a graphene-integrated distributed Bragg reflector.[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 31548-31559.
- [13] Haris H, Harun S W, Anyi C L, et al. Generation of soliton and bound soliton pulses in mode-locked erbium-doped fiber laser using graphene film as saturable absorber [J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, 63(8): 1-6.
- [14] Sobon G, Sotor J, Pasternak I, et al. Multilayer graphene-based saturable absorbers with scalable modulation depth for mode-locked Er- and Tm-doped fiber lasers [J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(12): 2884-2894.
- [15] Zhu G, Zhu X, Wang F, et al. Graphene mode-locked fiber laser at 2.8 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 28(1): 7-10.
- [16] Brida D, Tomadin A, Manzoni C, et al. Ultrafast collinear scattering and carrier multiplication in graphene [J]. *Physics*, 2013, 4(3): 131-140.
- [17] Bao Q, Zhang H, Wang Y, et al. Atomic-layer graphene as

- a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers [J]. *Advanced Functional Materials*, 2009, 19(19): 3077–3083.
- [18] Sun Z, Popa D, Hasan T, et al. A stable, wideband tunable, near transform-limited, graphene-mode-locked, ultrafast laser[J]. *Nano Research*, 2010, 3(9): 653–660.
- [19] Feng Dejun, Huang Wenyu, Jiang Shouzhen, et al. Few-layer graphene membrane as an ultrafast mode-locker in erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(5): 054202. (in Chinese)
冯德军, 黄文育, 姜守振, 等. 基于少数层石墨烯可饱和吸收的锁模光纤激光器[J]. *物理学报*, 2013, 62(5): 054202.
- [20] He X, Wang D N, Liu Z B. Pulse-width tuning in a passively mode-locked fiber laser with graphene saturable absorber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(4): 360–363.
- [21] Sotor J, Pasternak I, Krajewska A, et al. Sub-90 fs a stretched-pulse mode-locked fiber laser based on a graphene saturable absorber.[J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 27503–27508.
- [22] Purdie D G, Popa D, Wittwer V J, et al. Few-cycle from pulses from a graphene mode-locked all-fiber laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(25): 253101.
- [23] Xu J, Wu S, Liu J, et al. All-polarization-maintaining femtosecond fiber lasers using graphene oxide saturable absorber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(4): 346–348.
- [24] Bowen P, Singh H, Runge A, et al. Mode-locked femtosecond all-normal all-PM Yb-doped fiber laser at 1 060 nm[J]. *Optics Communications*, 2016, 364: 181–184.
- [25] Jang H, Jang Y S, Kim S, et al. Polarization maintaining linear cavity Er-doped fiber femtosecond laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(10): 105102.
- [26] Xu B, Martinez A, Set S Y, et al. Polarization Maintaining, nanotube-based mode-locked lasing from figure of eight fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(2): 180–182.
- [27] Huang P L, Lin S C, Yeh C Y, et al. Stable mode-locked fiber laser based on CVD fabricated graphene saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2460–2465.
- [28] Liu Dongfeng, Chen Guofu, Bai Jintao, et al. Generation and amplification of the ultrashort optical pulse sin passive harmonic mode-locking Er³⁺-doped fiber laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49(2): 241–246. (in Chinese)
刘东峰, 陈国夫, 白晋涛, 等. 被动高阶谐波锁模掺 Er⁽³⁺⁾ 光纤激光超短光脉冲的产生及其放大 [J]. *物理学报*, 2000, 49(2): 241–246.
- [29] Hu Tonghuan, Jiang Guobao, Chen Yu, et al. Passive harmonic mode-locking in Er-doped fiber laser based on mechanical exfoliated graphene saturable absorber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0802013. (in Chinese)
胡同欢, 蒋国保, 陈宇, 等. 机械剥离石墨烯被动谐波锁模掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0802013.