

基于石墨烯可饱和吸收体的纳秒锁模掺铥光纤激光器

王小发 张俊红 高子叶 夏光琼 吴正茂

Nanosecond mode-locked Tm-doped fiber laser based on graphene saturable absorber

Wang Xiao-Fa Zhang Jun-Hong Gao Zi-Ye Xia Guang-Qiong Wu Zheng-Mao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 114209 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.114209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.114209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微流芯片中消逝波激励的荧光辐射特性研究

Fluorescence radiation characteristics based on evanescent wave pumping in a microfluidic chip

物理学报.2017, 66(10): 104208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.104208>

新型高双折射微结构纤芯光子晶体光纤的可调谐超连续谱的特性研究

Experimental and numerical study of tuneable supercontinuum generation in new kind of highly birefringent photonic crystal fiber

物理学报.2017, 66(9): 094204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.094204>

光纤光热干涉气体检测技术研究进展

Advances in optical fiber photothermal interferometry for gas detection

物理学报.2017, 66(7): 074212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074212>

长距离分布式光纤传感技术研究进展

Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing

物理学报.2017, 66(7): 074207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074207>

保偏微纳光纤倏逝场传感器

Polarization-maintaining microfiber-based evanescent-wave sensors

物理学报.2017, 66(7): 074209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074209>

基于石墨烯可饱和吸收体的纳秒锁模掺铥光纤激光器*

王小发¹⁾²⁾³⁾ 张俊红²⁾ 高子叶¹⁾ 夏光琼¹⁾ 吴正茂^{1)3)†}

1)(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

2)(重庆邮电大学光电工程学院, 重庆高校光通信技术重点实验室, 重庆 400065)

3)(西南大学数学与统计学院, 重庆 400715)

(2017年2月14日收到; 2017年4月6日收到修改稿)

报道了一种基于石墨烯可饱和吸收体的纳秒锁模掺铥光纤激光器. 该激光器采用环形腔结构, 利用自制的三层石墨烯薄膜作为可饱和吸收体实现锁模. 同时在腔内插入一个窄带光纤光栅, 约束腔内起振的纵模数, 适当调节抽运功率和偏振控制器的角度, 得到了重复频率为3.8 MHz、脉宽在3.8—94.3 ns之间灵活可调的2 μm 纳秒锁模脉冲输出, 整个脉宽调节范围超过90 ns. 此外, 由于获得的兆赫兹纳秒锁模脉冲时间带宽积在49—1119范围内, 即存在强烈的啁啾, 因而可作为2 μm 波段啁啾脉冲放大系统中的种子源使用.

关键词: 光纤光栅, 掺铥光纤激光器, 纳秒锁模, 石墨烯

PACS: 42.81.-i, 42.55.Wd, 42.60.Fc

DOI: 10.7498/aps.66.114209

1 引言

掺铥光纤激光器除了能产生覆盖人眼安全波段和大气通信窗口的激光外, 还可以作为获得中红外波段激光器的抽运源, 因而被广泛应用于激光医疗、空间通信和激光雷达等领域^[1]. 目前, 被动锁模技术在掺铥光纤激光器中已经获得广泛应用^[2-9], 作为被动锁模核心器件的可饱和吸收体(SA)主要分为以下两类: 一类为腔内插入以半导体可饱和吸收镜(SESAMs)^[2,3]和碳纳米管(CNTs)^[4,5]为代表的真实SA; 另一类为以非线性偏振旋转效应(NPR)^[6,7]和非线性放大环形镜(NALM)^[8,9]为代表的人造SA. 然而, 上述几类SA均存在一定缺点, 诸如SESAMs的制作和封装工艺复杂; CNTs的工作波长与管径和手性相关, 在使用中有一定局限

性; NPR和NALM则对外界环境要求较高且不能实现自启动^[10,11]. 因而, 近年来一些新的锁模材料不断涌现, 其中基于石墨烯材料的SA以其低吸收强度、可控调制深度、超快恢复时间(100—200 fs)、宽工作光谱范围(300—2500 nm)、低廉价格以及易于制作且与光纤耦合性好等优点^[12,13], 在众多锁模材料中脱颖而出. 在已报道的相关工作中, Zhang等^[14]通过聚乙烯醇(PVA)混合石墨分散液制作了石墨烯-PVA薄膜, 最终获得了重复频率为6.46 MHz、脉宽为3.6 ps的掺铥锁模脉冲输出. Sobon等^[15]利用化学气象沉积(CVD)法制备了单层石墨烯薄膜, 并将其转移到光纤端面作为SA, 在掺铥光纤激光器中获得了重复频率为20.5 MHz、脉宽为1.2 ps的锁模脉冲. 随后, 也有不少科研人员将石墨烯或石墨烯衍生物应用于掺铥锁模光纤激光器中^[16-18], 但上述激光器工作时的一个共同特

* 国家自然科学基金(批准号: 11304409, 61475127, 61575163)、重庆市自然科学基金(批准号: CSTC2013jcyjA4004)、重庆市教委科学技术研究项目(批准号: KJ1500422)和液晶面板产业共性技术创新专题项目(批准号: CSTC2015zdcy-ztzz40003)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zmwu@swu.edu.cn

点为输出脉宽为皮秒或飞秒量级。

实际上,在掺铥锁模光纤激光器中同样可以产生脉宽为纳秒量级、重复频率为兆赫兹的激光脉冲。与飞秒或皮秒锁模脉冲相比,纳秒锁模脉冲一般具有强啁啾、大脉宽、低峰值功率以及非线性相位累积小等优点,因而可作为啁啾脉冲放大(CPA)系统中的种子源使用。目前虽然已有一些关于纳秒锁模光纤激光器的报道^[19-24],但所涉及的激光器增益介质一般为掺镱或掺铒的光纤,只有极少数文献集中在掺铥光纤激光器中^[25-27]。最近,Fu等^[27]利用石墨烯作为SA,在铥钬共掺光纤激光器中实现重复频率为0.964 MHz,脉宽在122—143 ns之间可调的锁模脉冲输出,可调范围为21 ns。然而由于上述文献中采用的抽运源为1570 nm LD,相比于793 nm LD抽运成本较高,功率受限;此外,文献^[27]中对纳秒锁模机制还缺乏有力的解释。基于此,本文根据锁模的基本原理,通过在腔内插入一个窄带光纤光栅,利用自制石墨烯作为SA,793 nm LD作为抽运源,在仅53 m长的短腔长掺铥光纤激光器中实现了重复频率为3.8 MHz、脉宽在3.8—94.3 ns之间灵活可调的2 μm纳秒锁模脉冲输出,可调范围超过90 ns。同时,对纳秒锁模出现的原因也进行了分析。此外,由于获得的兆赫兹纳秒锁模脉冲存在强烈的啁啾,因而可作为2 μm波段啁啾脉冲放大系统中的种子源使用。

2 石墨烯SA的制作和特性

本文采用CVD法^[28]制备得到了实验所用的石墨烯。具体操作时,将旋涂了一层聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)胶体的石墨烯转移到光纤端面后,利用丙酮溶液使PMMA层溶解从而得到单层石墨烯。实验中利用拉曼光谱仪(Horiba HR-800)对自制的单层石墨烯薄膜进行拉曼光谱检测,所得光谱如图1所示。从图中可以看出,波数在2695.81 cm⁻¹的为石墨烯2D峰,1587.51 cm⁻¹为碳的G峰,1350.17 cm⁻¹为石墨烯的缺陷峰D峰。根据以往的研究^[29,30],通过计算拉曼光谱中2D峰和G峰的强度比(I_{2D}/I_G)可以确定石墨烯的层数,单层石墨烯的2D峰强度通常为G峰2—4倍。本实验中得到的 I_{2D}/I_G 大于2,表明制备的石墨烯为单层结构,D峰的强度较弱说明石墨烯的缺陷很少。

重复上述方法三次,可以在光纤端面获得本文中所需的三层石墨烯薄膜。

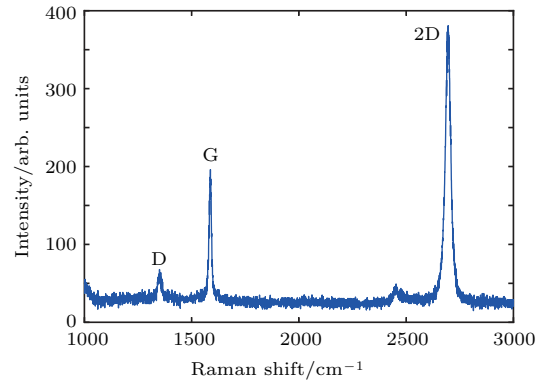


图1 自制单层石墨烯薄膜拉曼光谱图

Fig. 1. Raman spectrum of the homemade monolayer graphene film.

3 实验方案与原理

图2为纳秒锁模掺铥光纤激光器实验装置图。其中,激光器采用总腔长为53 m的环形腔结构。抽运源(最大功率12 W)为793 nm LD(BW-LD793-12S),通过(2+1) × 1的合束器将抽运光耦合进激光腔内,经过长4 m双包层掺铥光纤(IXF-2CF-Tm-O-10-130, IXFiber)的增益介质(其在793 nm处包层吸收率为5 dB/m)时抽运光被其所吸收。而产生的2 μm波段激光最终将通过70 : 30光耦合器(OC)的30%端口耦合输出,利用光谱分析仪(AQ6375B, Yokogawa)、频谱分析仪(FSL3, Rohde&Schwarz)和光电探测器(ET-5000F, EOT)配合示波器(Wave Runner 610Zi, Leroy)对其进行光谱、频谱和时域波形的探测。为使输出激光脉冲得到优化,实验中加入偏振无关隔离器(ISO)用于保证激光的单向传输,最终达到消除激光后向散射的目的;加入偏振控制器(PC)来控制输出激光的偏振态,以此来优化输出脉冲。与此同时,激光腔内插入一段30 m长的普通单模光纤(SMF)用来稳定锁模脉冲。此外,利用中心波长为2009.862 nm、反射率约为94%和3 dB带宽为0.38 nm的光纤光栅限制起振的纵模数,获取窄带纳秒锁模脉冲。在激光腔内插入一个三个端口环形器,便于引入法兰盘连接的两个FC/APC光纤接头(其中一个接头上转移了三层石墨烯薄膜)组成的锁模器件。

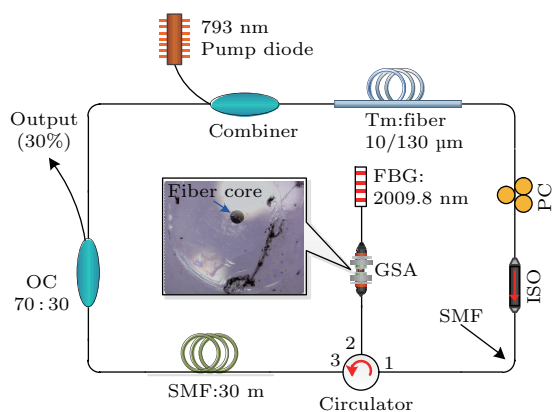


图2 纳秒锁模掺铥光纤激光器实验装置图

Fig. 2. Experimental setup of the nanosecond mode-locked Tm-doped fiber laser.

4 实验结果与分析

适当调节抽运功率(在1.67—2.13 W范围内)和PC的偏转角度,在示波器上能观测到稳定的兆赫兹纳秒锁模脉冲输出,所得结果如图3所示.其中,输出脉冲重复频率一直稳定在3.8 MHz附近,说明该脉冲因锁模而非调Q产生.图4为纳秒锁模掺铥光纤激光器脉冲宽度随抽运功率的变化关系曲线.从图中可以看出,当抽运功率从1.67 W增加到2.13 W的过程中,激光器输出的脉冲宽度从94.3 ns减小到3.8 ns.而纳秒锁模脉冲的产生是由于腔内插入一个窄带光纤光栅,约束腔内起振的纵模数,导致最终锁定的纵模数有限,达不到皮秒或飞秒的脉宽量级.此外,造成脉宽变窄的原因为石墨烯的非线性吸收效应[27],即在一定范围内,抽运功率越高,腔内增益越高,腔内能量整体会得到提升,通过石墨烯可饱和吸收体的选择性吸收后,获得的脉冲宽度将逐渐变窄.实验中我们还观察到,当抽运功率超过2.13 W时,脉冲立即产生分裂而不能维持在之前的锁模状态.

当抽运功率调节到2.09 W时,利用分辨率为0.05 nm的光谱分析仪对激光器输出光谱进行了测量,所得结果如图5所示.其中,中心波长为2010.15 nm,谱宽为0.16 nm,产生如此窄谱宽的原因是由于腔内插入的窄带光纤光栅对光谱窄化效应所致,类似的结果在文献[31]中也有报道.此外,从图5中可以看到明显的Kelly旁瓣,表明激光器输出脉冲为典型的孤子锁模脉冲.根据时间带宽积(TBP)定义[32]计算得到TBP的范围为45—1119,

远大于极限双曲正割脉冲的0.315[33],说明脉冲存在强烈的啁啾[34].为验证锁模的稳定性,实验中通过频谱分析仪测量了纳秒锁模掺铥光纤激光器重复频率在3.8 MHz时输出激光脉冲的射频频谱,如图6所示.从图6中可以看到,激光信噪比约50 dB,表明激光锁模状态非常稳定.另外,实验中还记录了输出平均功率随抽运功率的变化趋势,如图7所示.从图7中可以看出,输出基本呈线性关系,但获得的斜效率只有0.97%,低效率的主要原因是由于腔内存在较大的连接和传输损耗.在以后的工作中,将进一步对谐振腔参数进行优化,期望使激光器的斜效率得到显著提高.

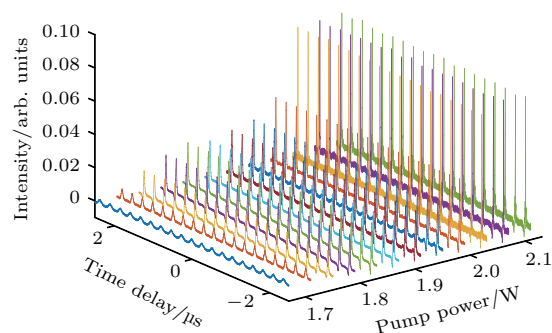


图3 (网刊彩色) 纳秒锁模掺铥光纤激光器输出脉冲序列随抽运功率的演化

Fig. 3. (color online) Output pulse trains evolution of the nanosecond mode-locked Tm-doped fiber laser with the increase of pump power.

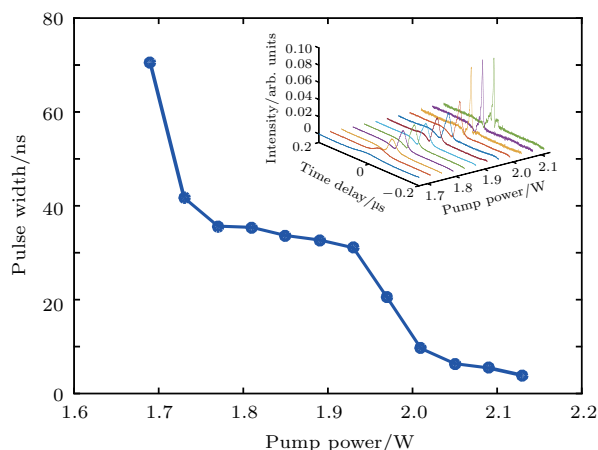


图4 (网刊彩色) 纳秒锁模掺铥光纤激光器脉冲宽度随抽运功率的变化(插图为对应脉宽随抽运功率的演化图)

Fig. 4. (color online) Pulse width curve of the nanosecond mode-locked Tm-doped fiber laser with the increase of pump power. Inset, detailed pulse width trains evolution with the increase of pump power.

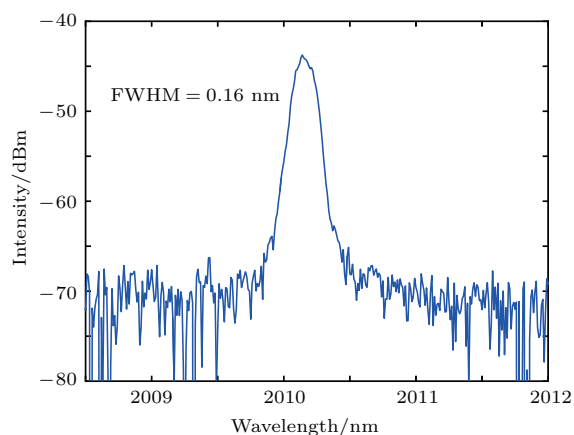


图5 纳秒锁模掺铥光纤激光器输出光谱
Fig. 5. Output spectrum of the nanosecond mode-locked Tm-doped fiber laser.

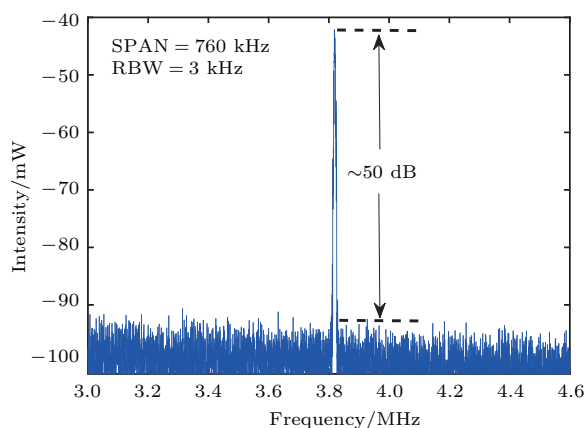


图6 纳秒锁模掺铥光纤激光器射频频谱
Fig. 6. RF spectrum of the nanosecond mode-locked Tm-doped fiber laser.

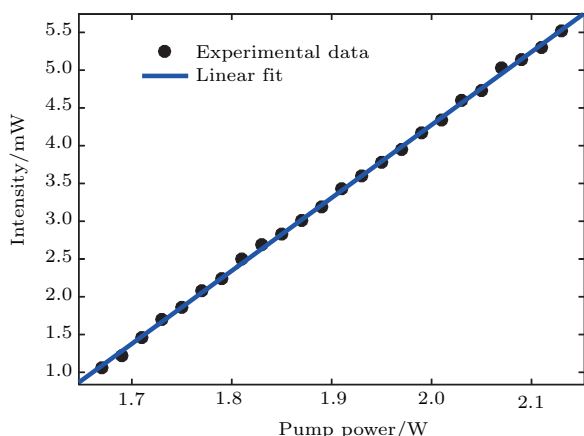


图7 纳秒锁模掺铥光纤激光器平均输出功率随抽运功率的变化
Fig. 7. Average output power of the nanosecond mode-locked Tm-doped fiber laser with the increase of pump power.

最后, 为验证激光器输出的纳秒锁模脉冲为石墨烯SA作用而非自锁模效应产生, 通过移除腔内

的石墨烯薄膜, 在相同实验条件下, 没有观察到锁模脉冲输出, 从而表明纳秒锁模脉冲的形成源于腔内石墨烯的作用.

5 结 论

基于石墨烯SA, 本文构建了兆赫兹纳秒锁模掺铥光纤激光器. 实验实现了中心波长为2010.15 nm、谱宽为0.16 nm、重复频率为3.8 MHz、脉宽在3.8—94.3 ns之间可调的2 μm锁模脉冲输出, 可调范围超过90 ns. 其中, 纳秒锁模脉冲的产生是由于腔内插入一个窄带光纤光栅约束腔内起振的纵模数导致, 而脉宽可调则是源于石墨烯的非线性吸收效应. 由于输出的纳秒锁模脉冲具有强烈的啁啾, 因而可作为种子脉冲源在2 μm波段啁啾脉冲放大系统中得到重要应用. 此外, 本文中获得的激光器效率较低, 在今后工作中将进一步减少腔内损耗, 以期提高输出效率.

参考文献

- [1] Wang Q, Geng J, Luo T, Jiang S 2009 *Opt. Lett.* **34** 3616
- [2] Liu J, Xu J, Liu K, Tan F, Wang P 2013 *Opt. Lett.* **38** 4150
- [3] Yang N, Tang Y, Xu J 2015 *Laser Phys. Lett.* **12** 085102
- [4] Kieu K, Wise F 2009 *Lasers and Electro-Optics* Baltimore, Maryland USA, June 2–4 2009 pCML7
- [5] Wang Y, Alam S, Obraztsova E, Pozharov A, Set S, Yamashita S 2016 *Opt. Lett.* **41** 3864
- [6] Yan Z Y, Li X H, Tang Y L, Shum P, Zhang Y, Wang Q J 2015 *Opt. Express* **23** 4369
- [7] Wang Q Q, Chen T, Chen K 2010 *Lasers and Electro-Optics* San Jose, California, USA, May 16–21, 2010 pCFK7
- [8] Rudy C, Urbanek K, Dignonnet M, Byer R 2013 *J. Light-wave Technol.* **31** 1809
- [9] Jin X X, Wang X, Wang X, Zhou P 2015 *Appl. Opt.* **54** 8260
- [10] Huang S S, Wang Y G, Yan P G, Zhang G L, Li H Q, Lin R Y 2014 *Laser Phys.* **24** 015001
- [11] Huang S S, Wang Y G, Yan P G, Zhao J Q, Li H Q, Lin R Y 2014 *Opt. Express* **22** 11417
- [12] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, Ferrari A C 2010 *Nature Photon.* **4** 611
- [13] Bao Q, Zhang H, Wang Y, Ni Z H, Yan Y L, Shen Z X, Loh K P, Tang Y T 2009 *Adv. Funct. Mater.* **19** 3077
- [14] Zhang M, Kelleher E, Torrisi F, Sun Z, Hasan T, Popa D, Wang F, Ferrari A, Popov S, Taylor J 2012 *Opt. Express* **20** 25077
- [15] Sobon G, Sotor J, Pasternak I, Krajewska A, Strupinski W, Abramski K 2013 *Opt. Express* **21** 12797

- [16] Wang Q Q, Chen T, Zhang B, Li M S, Lu Y F, Chen K 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 131117
- [17] Sobon G, Sotor J, Pasternak I, Krajewska A, Strupinski W, Abramski K 2015 *Opt. Express* **23** 9339
- [18] Boguslawski J, Sotor J, Sobon G, Kozinski R, Librant K, Aksienionek M, Lipinska L, Abramski K 2015 *Photon. Res.* **3** 119
- [19] Ismail M A, Harun S W, Zulkepely N R, Nor R M, Ahmad F, Ahmad H 2012 *Appl. Opt.* **51** 8621
- [20] Kelleher E, Travers J, Sun Z, Rozhin A, Ferrari A 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 111108
- [21] Zhang X M, Gu C, Chen G L, Sun B, Xu L X, Wang A T, Ming H 2012 *Opt. Lett.* **37** 1334
- [22] Xu J, Wu S D, Liu J, Wang Q, Yang Q H, Wang P 2012 *Opt. Commun.* **285** 4466
- [23] Kobtsev S, Kukarin S, Fedotov Y 2008 *Opt. Express* **16** 21936
- [24] Liu Z B, He X Y, Wang D N 2011 *Opt. Lett.* **36** 3024
- [25] Azooz S, Harun S, Ahmad H, Halder A, Paul M, Pal M, Bhadra S 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 014204
- [26] Wang X, Zhou P, Wang X L, Xiao H, Liu Z J 2014 *Opt. Express* **22** 6147
- [27] Fu B, Gui L, Li X, Xiao X S, Zhu H W, Yang C X 2013 *IEEE Photon. Tech. L.* **25** 1447
- [28] Wang W R, Zhou Y X, Li T, Wang Y L, Xie X M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 038702 (in Chinese) [王文荣, 周玉修, 李铁, 王跃林, 谢晓明 2012 物理学报 **61** 038702]
- [29] Ferrari A, Meyer J, Scardaci V, Casiraghi C, Lazzeri M, Mauri F, Piscanec S, Jiang D, Novoselov K, Roth S, Geim A 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 187401
- [30] Graf D, Molitor F, Ensslin K, Stampfer C, Jungen A, Hierold C 2007 *Nano Lett.* **7** 238
- [31] Liu J, Xu J, Wang P 2012 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **24** 539
- [32] Zhao J Q, Wang Y G, Yan P G, Ruan S C, Zhang G L, Li H Q, Tsang Y H 2013 *Laser Phys.* **23** 075105
- [33] Jin C, Yang S G, Wang X J, Chen H W, Chen M H, Xie S Z 2016 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **28** 1352
- [34] Kelleher E, Travers J, Ippen E, Sun Z, Ferrari A, Popov S, Taylor J 2009 *Opt. Lett.* **34** 3526

Nanosecond mode-locked Tm-doped fiber laser based on graphene saturable absorber*

Wang Xiao-Fa¹⁾²⁾³⁾ Zhang Jun-Hong²⁾ Gao Zi-Ye¹⁾
Xia Guang-Qiong¹⁾ Wu Zheng-Mao^{1)3)†}

1) (School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

2) (Key Laboratory of Optical Fiber Communication Technology, Chongqing Education Commission, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

3) (School of Mathematics and Statistics, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(Received 14 February 2017; revised manuscript received 6 April 2017)

Abstract

The Tm-doped mode-locked pulsed fiber lasers, which are known for their wide applications in optical communication, laser medical system and special material processing, have attracted considerable interest as novel laser sources. Up to now, many reported Tm-doped mode-locked fiber lasers focused on emitting picosecond or femtosecond pulses at a few megahertz (MHz) repetition rate. Actually, due to the strong chirp, large pulse width, low peak power and little nonlinear phase accumulation characteristics in the process of power amplifier, nanosecond mode-locked fiber laser is a representative of ideal seed source in the chirped pulse amplification (CPA) system. However, nanosecond mode-locked fiber lasers are generally implemented with the kilometerlong cavity length, corresponding to the fundamental repetition rate of hundreds of kilohertz. Usually, fiber lasers with such a low repetition rate are not desirable in applications of laser material processing, nor medical treatment nor scientific researches. In this paper, we report a nanosecond mode-locked Tm-doped fiber laser with MHz repetition rate based on graphene saturable absorber (SA). As the SA, graphene has excellent optical properties, such as optical visualization, high transparency, ultra-fast relaxation time and nonlinear absorption. It is not limited by the band gap either because of its zero-band-gap structure. Therefore, graphene can be used as fast SA, with wide spectral range operated. Generally, graphene suitable for mode-locked fiber lasers can be produced by using chemical vapor deposition (CVD), liquid phase exfoliation and mechanical exfoliation. Since the CVD technique can obtain high-quality graphene with precisely controlled number of layers, it is always the first choice for the manufacture of graphene. In our work, monolayer graphene layers are grown on copper foils by CVD, and then transferred onto the end face of the fiber connector three times. Meanwhile, a narrow-band fiber Bragg grating is used to constrain longitudinal modes of the laser intra-cavity. By simply adjusting the pump power and the polarization angle of polarization controller, stable 2 μm nanosecond mode-locked pulses are obtained in a wide range from 3.8 ns to 94.3 ns at 3.8 MHz repetition rate. We believe that the results obtained will be helpful for investigating the CPA system at 2 μm .

Keywords: fiber Bragg grating, Tm-doped fiber laser, nanosecond mode-locked, graphene

PACS: 42.81.-i, 42.55.Wd, 42.60.Fc

DOI: 10.7498/aps.66.114209

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11304409, 61475127, 61575163), the Natural Science Foundation of Chongqing City, China (Grant No. CSTC2013jcyjA4004), the Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission, China (Grant No. KJ1500422), and the Special Theme Projects on LCD Industrial Generic Technology Innovation of Chongqing, China (Grant No. CSTC2015zdcy-ztzz40003).

† Corresponding author. E-mail: zmwu@swu.edu.cn