

基于氧化石墨烯的类噪声脉冲拉曼光纤激光器

徐 佳¹ 吴思达² 刘 江¹ 任 军¹ 杨铁山¹ 杨全红² 王 璞¹

(¹ 北京工业大学激光工程研究院国家产学研激光技术中心, 北京 100124)
² 天津大学化工学院, 天津 300072)

摘要 报道了基于氧化石墨烯可饱和吸收体的类噪声脉冲拉曼光纤激光器。该激光器采用了一种由掺铒光纤谐振腔和拉曼光纤谐振腔构成的全光纤双环形腔结构。拉曼增益介质为长约 700 m 的商用硅基高非线性光纤。当半导体激光器的抽运功率为 4.16 W 时,得到了中心波长为 1690.2 nm,重复频率为 250 kHz,脉冲宽度为 500 ns 的稳定的脉冲激光,其信噪比为 53 dB。

关键词 激光器; 光纤激光器; 受激拉曼散射; 被动锁模; 氧化石墨烯

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0302006

Noise-Like Pulsed Raman Fiber Lasers Using Graphene Oxide Saturable Absorber

Xu Jia¹ Wu Sida² Liu Jiang¹ Ren Jun¹ Yang Tieshan¹ Yang Quanhong² Wang Pu¹

(¹ National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)
² School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A noise-like pulsed Raman fiber laser using graphene oxide saturable absorber is reported, which adopts the all-fiber double-ring configuration, comprised by an Er-doped fiber resonator and a Raman fiber resonator. The Raman gain fiber is a 700 m commercial silicon-based high nonlinear fiber. When the pump power of the diode laser is 4.16 W, the Raman fiber laser generates stable 500 ns pulse trains at 250 kHz repetition rate. The central wavelength is 1690.2 nm and the ratio of signal to noise is 53 dB.

Key words lasers; fiber lasers; stimulated Raman scattering; passively mode-locking; graphene oxide

OCIS codes 140.3510; 290.5910; 140.4050; 160.4330

1 引 言

利用稀土掺杂光纤作为增益介质的光纤激光器,由于受到掺杂元素的限制只能产生固定波段的激光输出,且输出波长覆盖范围通常只有几十个纳米。与这类光纤激光器相比,拉曼光纤激光器不仅具有结构紧凑、稳定性高和光束质量好等优势,还具有极宽的波长覆盖范围和灵活的输出波长。其中,基于硅基光纤的拉曼光纤激光器的输出波长范围可从 300 nm 覆盖至 2200 nm,且通过对抽运光波长以

及拉曼增益介质的合理选择及设计,再结合级联技术,可以实现特殊波长的激光输出,极大地满足了探测、传感、生物、医学等领域对特殊波长激光的需求。例如,以激光钠导星为应用背景的 1178 nm 波段连续拉曼光纤激光器^[1]和应用用于甲烷气体探测的 1653 nm 波段连续拉曼光纤放大器^[2]。

脉冲拉曼光纤激光器不仅输出波长灵活,还能产生高的单脉冲能量以及峰值功率,极富应用潜力,也是目前研究的热点。相对于同步抽运^[3-4]技术,

收稿日期: 2013-09-03; **收到修改稿日期**: 2013-10-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61235010)、国家自然科学基金面上项目(61177048)

作者简介: 徐 佳(1988—),女,博士研究生,主要从事超短脉冲掺铒光纤激光器、光纤放大器等方面的研究。

E-mail: xujia@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王 璞(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

被动锁模技术由于价格低廉、结构简单,已成为实现脉冲拉曼光纤激光器的主要手段。目前,被动锁模拉曼光纤激光器主要采用的技术手段包括:基于非线性偏振旋转(NPR)^[5-6]和非线性光纤环镜(NOLM)^[7-8]的被动锁模技术,以及基于半导体可饱和吸收体(SESAM)^[9-10]、碳纳米管(CNT)^[11-12]和石墨烯^[13-14]等可饱和吸收材料的被动锁模技术。然而,上述几种方法都存在一些缺点:NPR和NOLM的环境稳定性较低,易受外界应力及温度变化的影响;SESAM制备工艺复杂,价格较贵,且常用的SESAM吸收带宽较窄;CNT的带隙大小由纳米管直径和手性决定,不同直径的CNT混合虽然可以获得宽的工作波段,却引入了较大的插入损耗。近年来,石墨烯作为一种新型的、宽带可饱和吸收材料,受到了国内外研究人员的青睐,并分别应用于基于稀土掺杂光纤的锁模光纤激光器^[15-16]以及拉曼锁模光纤激光器中^[13-14]。但是,石墨烯的化学稳定性高,难溶于水以及其他常用的有机溶剂,这大大限制了石墨烯的成品率及其应用范围。

自2012年起,具有极强的亲水性的氧化石墨烯材料也受到了科研人员的广泛关注。众多研究结果表明氧化石墨烯具有可与石墨烯相媲美的极快的恢复时间和极强的可饱和吸收特性^[17-22]。此外,氧化石墨烯可以通过化学合成的方法从天然石墨材料中大量制得,成本低廉,且制备工艺简单、成品率高。迄今为止,基于氧化石墨烯的掺铒、掺镱光纤激光器已有大量报道^[17-22],但未见其在拉曼激光器中的相关报道。

本文报道了采用氧化石墨烯作为可饱和吸收体的纳秒脉冲拉曼光纤激光器。该激光器采用全光纤结构,增益介质为商用硅基高非线性光纤。通过调节偏振控制器优化激光腔内偏振特性,可获得中心波长为1690.2 nm,重复频率为250 kHz,脉宽为500 ns的类噪声脉冲。

2 实验装置

图1为拉曼光纤激光器的实验装置图,该激光器采用由掺铒光纤环形谐振腔和拉曼光纤环形谐振腔组合而成的双环形腔结构。图1中上部的环形腔为正向抽运的掺铒光纤环形谐振腔,抽运源是中心波长为974 nm,最大输出功率为10 W,光纤耦合输出的多模半导体激光器。974 nm抽运光通过(2+1)×1的合束器耦合入长约6 m的铒镱共掺双包层光纤(EYDF)中。1550 nm偏振无关光隔离器

(ISO)用于保证腔内激光单向传输。1550 nm/1650 nm波分复用耦合器(WDM)用于将掺铒光纤产生的抽运光和拉曼信号光分离开。图1中下部的环形腔为反向抽运的拉曼光纤环形谐振腔。拉曼增益介质为商用的硅基高非线性光纤(HNLF),该光纤长为700 m,数值孔径为0.35,在1550 nm处的模场直径为2.23 μm,非线性系数为10 W⁻¹·km⁻¹,色散为-3.141 ps/(nm·km),损耗为1.07 dB/km。1650 nm偏振无关光隔离器用于保证腔内拉曼信号光单向传输。拉曼激光通过一个30/70耦合器的30%端口输出。

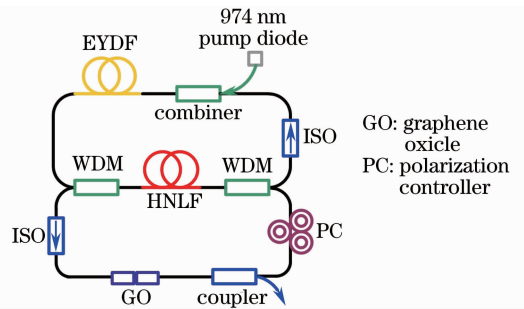


图1 脉冲拉曼光纤激光器装置图

Fig. 1 Schematic setup of pulsed Raman fiber laser

该激光器实现被动锁模的关键器件是“三明治”结构的氧化石墨烯可饱和吸收体,即在两个光纤跳线头端面间放置氧化石墨烯材料,然后通过法兰盘将两个跳线头连接起来。这种方法简单、方便、耦合效率高、可重复性高。氧化石墨烯的制备方法主要包括以下几个步骤:首先用改进的Hummers法从天然石墨中获得氧化石墨粉体,然后将氧化石墨粉体经超声波细胞粉碎机(宁波新芝JY92-II D,超声功率为200 W,超声时间为2 h)配制成质量浓度为2 mg/mL的氧化石墨烯水溶液,最后通过光吸附法(激光功率为20 mW,吸附时间为30 min)将氧化石墨烯附着在跳线端面上。通过调节氧化石墨烯溶液的浓度以及吸附时间可以改变氧化石墨烯薄膜的厚度、透光性等光学参数,进而优化氧化石墨烯可饱和吸收体的锁模性能。文献[17]中报道了这种氧化石墨烯材料的拉曼光谱以及其他主要的光学参数。

3 实验结果及分析

在974 nm半导体激光器的抽运功率为4.16 W时,拉曼激光器产生了重复频率为250 kHz的脉冲输出。图2为通过25 GHz的光电探头和25 GHz的实时示波器(Agilent DSO-X92504A)观察到的稳定的脉冲串,其脉冲间隔为4 μs,且脉冲间隔不随抽运功率

的变化而发生改变。图3为用分辨率为0.02 nm的光谱仪(Yokogawa AQ6370B)测得的拉曼光纤激光器的光谱图(实线为对数坐标下的光谱,虚线为线性坐标下的光谱),其中心波长为1690.2 nm,3 dB光谱带宽为2.0 nm。实验测得由掺铒环形谐振腔发出的抽运光中心波长为1568 nm,故可计算出该拉曼激光器的频移量为13.8 THz。

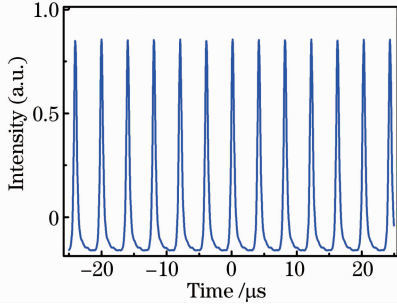


图2 脉冲拉曼光纤激光器脉冲串

Fig. 2 Pulse train of pulsed Raman fiber laser

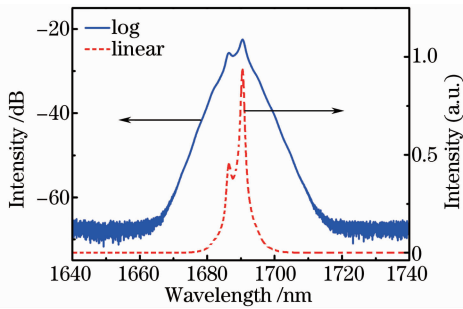


图3 脉冲拉曼光纤激光器光谱图

Fig. 3 Optical spectrum of pulsed Raman fiber laser

由于激光腔内包含700 m长的高非线性光纤,腔内正色散很大(约为 3.33 ps^2),输出脉冲并非孤子脉冲。图4为利用25 GHz高速示波器测得的单个脉冲形状,其内部含有复杂、随机的次脉冲结构,通过高斯拟合后的脉冲包络宽度约为500 ns。这种在时域上的微结构特性以及平滑的输出光谱特性都符合类噪声锁模的特征。目前所报道的类噪声锁模现象主要发生在采用长环形腔结构的NPR锁模光纤激光器(包括稀土掺杂光纤激光器^[23-25]和拉曼光纤激光器^[26])中。Tang等^[24]通过建立扩展的耦合非线性薛定谔方程,对类噪声脉冲的产生机理和特性进行了理论模拟。研究表明引发类噪声锁模的主要原因是孤子坍塌效应与腔内正反馈。同时,理论结果与实验结果的一致性也进一步证实了关于“类噪声脉冲是由多个随机的、非相干的超短脉冲叠加而成的”这一猜测。类噪声脉冲的另一个重要特点是其自相关轨迹具有在平坦底座上的小尖峰结

构^[26],但由于本实验中拉曼光纤激光器输出功率较低,无法对其自相关信号进行观测和分析。

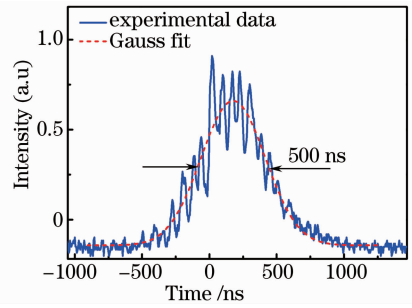


图4 脉冲拉曼光纤激光器输出脉宽

Fig. 4 Pulse duration of pulsed Raman fiber laser

如图5所示,通过带宽为7.5 GHz的频谱仪(Agilent N900A-507)测得该脉冲拉曼光纤激光器的基频为250.0 kHz,信噪比为53 dB。当974 nm半导体激光器抽运功率增至5.47 W时,拉曼信号光最大输出功率为1.8 mW,单脉冲能量为7.2 nJ。此时拉曼信号输出光谱中未出现二阶斯托克斯分量,且通过示波器可观察到激光器输出脉冲非常稳定。

若想进一步提高激光器输出功率,可以通过增大激光器的输出比,以及提高高非线性光纤与单模光纤的熔接效率等方法。由于高非线性光纤的模场直径远远小于单模光纤的模场直径,若采用拉锥或扩芯处理后再熔接可以有效降低由模场不匹配引发的损耗。

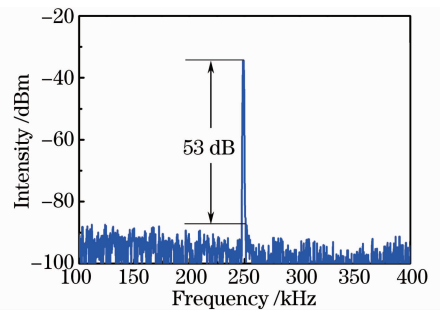


图5 脉冲拉曼光纤激光器频谱图

Fig. 5 Frequency spectrum of pulsed Raman fiber laser

此外,当用反射式的SESAM代替该激光器中的透射式氧化石墨烯可饱和吸收体时,在抽运源和腔内其他条件保持不变时,仍然可以获得重复频率为250 kHz,脉宽为500 ns的类噪声脉冲输出。2012年,Zhang等^[14]报道了1180 nm石墨烯锁模拉曼光纤激光器,获得了重复频率为400 kHz,脉宽为200 ns的脉冲输出,并通过示波器观测到了单个脉冲里的700 ps的尖峰结构。上述两个实验结果表明类噪声的产生主要是由激光腔的设计导致的,并

非由氧化石墨烯可饱和吸收体引发。

4 结 论

报道了一种小型化、全光纤结构的 1690 nm 纳秒脉冲拉曼光纤激光器。该激光器采用了一种新颖的、包含掺铟光纤谐振腔和拉曼光纤谐振腔的双环形腔结构,其中拉曼增益介质为长约 700 m 的高非线性光纤。实验中将氧化石墨烯材料作为可饱和吸收体用于拉曼光纤激光器中,并在 4.16 W 的半导体激光器抽运功率下,实现了重复频率为 250 kHz、脉宽为 500 ns 的类噪声锁模,其输出脉冲信噪比为 53 dB。此类基于氧化石墨烯的类噪声脉冲拉曼光纤激光器的研制对类噪声锁模现象的进一步研究有着重要意义。

参 考 文 献

- Xu Jiangming, Leng Jinyong, Han Kai, *et al.*. Experimental research on single-frequency fiber Raman amplifier [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(7): 074204.
许将明, 冷进勇, 韩凯, 等. 单频光纤拉曼放大器的实验研究 [J]. *物理学报*, 2012, 61(7): 074204.
- Xu Jia, Wang Lei, Liu Jiang, *et al.*. Narrow line-width 1653 nm Raman fiber amplifiers [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602001.
徐佳, 汪磊, 刘江, 等. 1653 nm 窄线宽拉曼光纤放大器 [J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602001.
- D Lin, S Alam, P S Teh, *et al.*. Tunable synchronously-pumped fiber Raman laser in the visible and near-infrared exploiting MOPA-generated rectangular pump pulses [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(11): 2050–2052.
- A Agnesi, E Caracciolo, L Carra, *et al.*. 150-ps pulse Raman generator pumped by a 1-kHz sub-nanosecond passively Q-switched laser system [J]. *Applied Physics B*, 2012, 107(3): 691–695.
- A Chamorovskiy, A Rantamäki, A Sirbu, *et al.*. 1.38- μm mode-locked Raman fiber laser pumped by semiconductor disk laser [J]. *Opt Express*, 2010, 18(23): 23872–23877.
- Stéphane Randoux, Pierre Suret. Toward passive mode locking by nonlinear polarization evolution in a cascaded Raman fiber ring laser [J]. *Opt Commun*, 2006, 267(1): 145–148.
- C Aguergaray, D Méchin, V Kruglov, *et al.*. Experimental realization of a mode-locked parabolic Raman fiber oscillator [J]. *Opt Express*, 2010, 18(8): 8680–8687.
- D A Chestnut, J R Taylor. Wavelength-versatile subpicosecond pulsed lasers using Raman gain in figure-of-eight fiber geometries [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(22): 2982–2984.
- A Chamorovskiy, J Rautiainen, J Lyytikäinen, *et al.*. Raman fiber laser pumped by a semiconductor disk laser and mode locked by a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(20): 3529–3531.
- S Kivistö, T Hakulinen, M Guina, *et al.*. Tunable Raman soliton source using mode-locked Tm-Ho fiber laser [J]. *IEEE Photon Techno Lett*, 2007, 19(12): 934–936.
- C E S Castellani, E J R Kelleher, D Popa, *et al.*. CW-pumped short pulsed 1.12 μm Raman laser using carbon nanotubes [J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10(1): 015101.
- C E S Castellani, E J R Kelleher, J C Travers, *et al.*. Ultrafast Raman laser mode-locked by nanotubes [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(20): 3996–3998.
- C E S Castellani, E J R Kelleher, Z Luo, *et al.*. Harmonic and single pulse operation of a Raman laser using graphene [J]. *Laser Phys Lett*, 2012, 9(3): 223–228.
- Lei Zhang, Gaozhong Wang, Jinneng Hu, *et al.*. Linearly polarized 1180-nm Raman fiber laser mode locked by graphene [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1809–1815.
- Liu Jiang, Wu Sida, Wang Ke, *et al.*. Passively mode-locked and Q-switched Yb-doped fiber lasers with graphene-based saturable absorber [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0802001.
刘江, 吴思达, 王科, 等. 基于石墨烯可饱和吸收体的被动锁模、被动调 Q 掺镱光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0802001.
- Liu Jiang, Wei Rusheng, Xu Jia, *et al.*. Passively mode-locked Yb-doped fiber laser with graphene epitaxially grown on 6H-SiC substrates [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0802003.
刘江, 魏汝省, 徐佳, 等. 基于 6H-SiC 衬底外延石墨烯的被动锁模掺镱光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0802003.
- J Xu, J Liu, S D Wu, *et al.*. Graphene oxide mode-locked femtosecond erbium-doped fiber lasers [J]. *Opt Express*, 2012, 20(14): 15474–15480.
- J Xu, S D Wu, H H Li, *et al.*. Dissipative soliton generation from a graphene oxide mode-locked Er-doped fiber laser [J]. *Opt Express*, 2012, 20(21): 23653–23658.
- J Liu, S Wu, J Xu, *et al.*. Mode-locked 2 μm thulium-doped fiber laser with graphene oxide saturable absorber [C]. *CLEO*, 2012. 1–2.
- Xu Jia, Wu Sida, Liu Jiang, *et al.*. Narrow line-width picosecond erbium-doped fiber lasers passively mode-locked with graphene oxide [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0702000.
徐佳, 吴思达, 刘江, 等. 基于氧化石墨烯被动锁模的窄线宽皮秒脉冲掺铒光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0702002.
- Xu Jia, Wu Sida, Liu Jiang, *et al.*. Passively Q-switched erbium-doped fiber laser with graphene oxide saturable absorber [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(12): 2783–2786.
徐佳, 吴思达, 刘江, 等. 氧化石墨烯被动调 Q 掺铒光纤激光器 [J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(12): 2783–2786.
- Xu Jia, Wu Sida, Liu Jiang, *et al.*. Passively mode-locked traditional soliton, dissipative soliton Er-doped fiber lasers [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0702003.
徐佳, 吴思达, 刘江, 等. 被动锁模的传统孤子、耗散孤子掺铒光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0702003.
- Leiran Wang, Xueming Liu, Yongkang Gong, *et al.*. Observations of four types of pulses in a fiber laser with large net-normal dispersion [J]. *Opt Express*, 2011, 19(8): 7616–7624.
- D Y Tang, L M Zhao, B Zhao. Soliton collapse and bunched noise-like pulse generation in a passively mode-locked fiber ring laser [J]. *Opt Express*, 2005, 13(7): 2289–2294.
- L M Zhao, D Y Tang. Generation of 15-nJ bunched noise-like pulses with 93-nm bandwidth in an erbium-doped fiber ring laser [J]. *Applied Physics B*, 2006, 83(4): 553–557.
- A Boucon, B Barviau, J Fatome, *et al.*. Noise-like pulses generated at high harmonics in a partially-mode-locked km-long Raman fiber laser [J]. *Applied Physics B*, 2012, 106(22): 283–287.