

石墨烯被动锁模全正色散掺镜光纤激光器中的暗脉冲及其谐波

傅宽 徐中巍 李海清 彭景刚 戴能利 李进延

Dark pulses and harmonic mode locking in graphene-based passively mode-locked Yb^{3+} -doped fiber laser with all-normal dispersion cavity

Fu Kuan Xu Zhong-Wei Li Hai-Qing Peng Jing-Gang Dai Neng-Li Li Jin-Yan

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 194205 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.194205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于 10 m 光子晶体光纤的放大自相似锁模振荡器研究

[Amplifier similariton oscillator using 10 m photonic crystal fiber](#)

物理学报.2015, 64(18): 184210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184210>

国产光纤实现直接抽运全光纤化 3000 W 级激光输出

[3000 W direct-pumping all-fiber laser based on domestically produced fiber](#)

物理学报.2015, 64(16): 164204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164204>

高速线性光采样用被动锁模光纤激光器重复频率优化

[Repetition rate optimization of passively mode-locked fiber laser for high-speed linear optical sampling](#)

物理学报.2015, 64(13): 134206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134206>

303MHz 高重复频率掺 Er 光纤飞秒激光器

[A 303 MHz fundamental repetition rate femtosecond Er: fiber ring laser](#)

物理学报.2015, 64(11): 114210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114210>

覆盖可见光波长的掺 Er 光纤飞秒光学频率梳

[Er-fiber femtosecond optical frequency comb covering visible light](#)

物理学报.2015, 64(9): 094204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094204>

石墨烯被动锁模全正色散掺铒光纤激光器中的暗脉冲及其谐波*

傅宽¹⁾ 徐中巍¹⁾ 李海清¹⁾ 彭景刚¹⁾ 戴能利¹⁾ 李进延^{1)2)†}

1)(武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

2)(华中科技大学光学与电子信息学院, 武汉 430074)

(2015年1月13日收到; 2015年5月15日收到修改稿)

报道了一种基于石墨烯被动锁模的全正色散掺铒环形光纤激光器. 在激光器腔中应用激光诱导沉积法制备的石墨烯可饱和吸收体, 通过调节抽运光功率和偏振控制器的角度分别得到了明脉冲及其二阶谐波, 暗明脉冲对和暗脉冲及其二、三阶谐波这三类不同的脉冲. 其中, 暗明脉冲对和暗脉冲在基于石墨烯被动锁模的掺铒光纤激光器实验中都是第一次被观察到. 本文根据实验结果结合模拟分析了暗脉冲的产生机理, 并研究对比了明脉冲谐波和暗脉冲谐波产生的原因.

关键词: 光纤激光器, 石墨烯, 暗脉冲, 谐波

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Fc, 42.65.Tg, 78.67.Wj

DOI: 10.7498/aps.64.194205

1 引言

近年来, 因为石墨烯具有无波长选择, 调制深度大, 饱和强度低等特点^[1,2], 基于其的新型光电子器件在激光系统上的应用研究一直备受关注. 此外它价格低廉、易于制备且与光纤有较好的耦合性, 已被许多课题组作为一种新型可饱和吸收体用于激光器当中. 2009年, Tang等^[3]在石墨烯被动锁模掺铒光纤激光器中采用了色散管理机理, 得到了脉冲宽度为756 fs的C波段超短脉冲. 他们还通过改变石墨烯的厚度实现了可饱和吸收体的调制深度在6.2%—66.5%范围内可调. 2012年, 汪光辉等^[4]报道了石墨烯可饱和吸收体(GSA)的被动锁模环形掺铒光纤激光器, 产生的孤子脉冲的脉宽约为1.32 ps, 平均输出功率为1.07 mW, 并实现激光中心波长在1556.72—1558.76 nm之间可调谐. 尽管基于GSA的光纤激光器已被广泛研究, 但大部

分都是掺铒光纤激光器. 相比而言, 镱离子具有能级结构简单、激发态下的荧光寿命长、抽运波长与激光器工作波长间的量子缺陷小等优势^[5]. 而且, 相比于传统孤子脉冲光纤激光器和色散管理光纤激光器, 全正色散光纤激光器输出的脉冲能量更高而成为光纤激光器研究的热点.

在光通信应用上, 暗脉冲不仅可以实现传统脉冲相同的功能, 而且具有噪声更低、损耗更小、传输速度更快等优点, 因此其在信号处理、长途通信、精密测量等领域都具有广泛的应用前景^[6]. 2009年, Zhang等^[7]首次在一个腔内带有起偏器的掺铒光纤放大器(EDFA)中观察到暗脉冲. 后来, 暗脉冲还在其他类型的锁模光纤激光器中被发现, 例如非线性偏振旋转(NPR)锁模^[8]和半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模等^[9]. 但在基于石墨烯被动锁模的掺铒光纤激光器中却很少有关于暗脉冲的研究.

本文报道了基于石墨烯可饱和吸收体的被动

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2013AA031501)、国家自然科学基金(批准号: 61378070)和湖北省自然科学基金(批准号: ZRY0535)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ljj@mail.hust.edu.cn

锁模全正色散掺镱光纤激光器. 通过调节抽运功率以及改变偏振控制器的偏振角度, 在实验中观察到了包括明脉冲谐波, 暗明脉冲对, 暗脉冲谐波等不同类型的脉冲. 结合模拟分析了激光器中不同脉冲的形成原因, 并研究对比了明脉冲谐波和暗脉冲谐波的产生原因.

2 石墨烯可饱和吸收体的制备与实验装置

实验中采用了激光诱导沉积法^[10]将石墨烯直接转移到光纤端面. 如图1所示, 980 nm的半导体激光器(LD)输出20 mW的激光, 光纤的末端浸入少数层石墨烯的悬浊水溶液中. 由于激光产生的电泳效应^[11], 石墨烯会沉积到光纤端面上. 通激光5 min后取出光纤端头, 在常温下干燥20 min. 用光学显微镜观察沉积有石墨烯的光纤端面如图2所示, 能较明显地看到光纤端面沉积的石墨烯黑色沉积物.

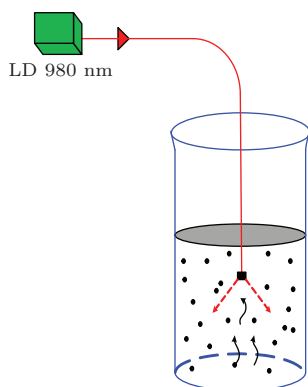


图1 (网刊彩色) 激光诱导沉积转移石墨烯示意图
Fig. 1. (color online) Schematic diagram for depositing graphene on the fiber end face by optical radiation.

激光器实验结构如图3所示. 抽运源采用中心波长为980 nm的带尾纤输出的LD, 通过980 nm/1060 nm波分复用器(WDM)将抽运光耦合入环形腔, 掺镱光纤(YDF)作为增益介质, 其在1061 nm处的峰值吸收率为93 dB/m, 经过优化后使用长度定为3 m. 偏振无关的光隔离器(ISO)更好地保证了环形腔内光的单向传输, 提高输出激光的信噪比. 偏振控制器(PC)用来调节激光腔的偏振态, 优化激光输出; 同时使锁模更容易启动. 通

过法兰盘连接两个FC/APC光纤接头, 其中一个接头上有制备好的石墨烯可饱和材料.

环形腔的总腔长为23 m, 推算出腔的基频约为8.996 MHz. 在激光器输出端分别采用光谱分析仪、光电探测器结合示波器测量脉冲激光的光谱、脉冲序列和时域波形.

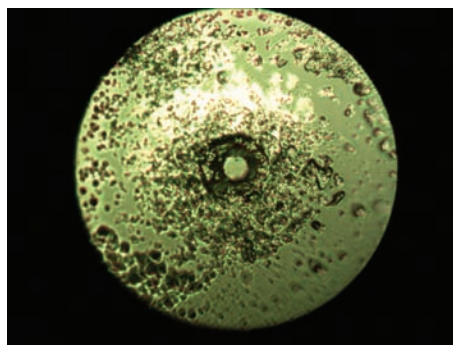


图2 (网刊彩色) 含石墨烯的光纤端面图
Fig. 2. (color online) Images of the fiber end face after the graphene was deposited.

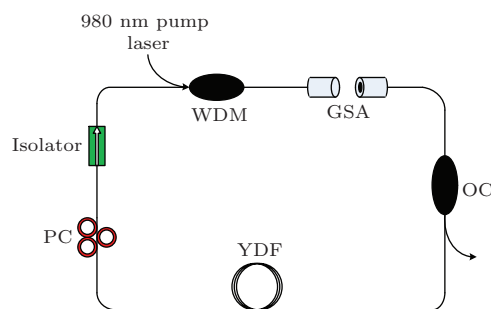


图3 (网刊彩色) 激光器结构图
Fig. 3. (color online) Experimental setup of laser.

3 实验结果与分析

在抽运功率为200 mW时调节PC, 由示波器测量得到的脉冲序列如图4(a)所示, 其重复频率为8.890 MHz. 这与激光腔的基频是一致的, 表明激光器实现了锁模. 由光谱分析仪得到的激光光谱如图4(b)所示, 激光的中心波长为1073 nm, 3 dB带宽为4 nm. 图中边缘陡峭的光谱特性表明产生的是耗散孤子脉冲^[12].

提高抽运功率到210 mW以及调节PC到合适角度, 可以观察到暗明脉冲对. 图5(a)和(b)分别是脉冲序列和对应的脉冲光谱. 从光谱上来看, 激光的中心波长为1073 nm, 3 dB带宽为2 nm.

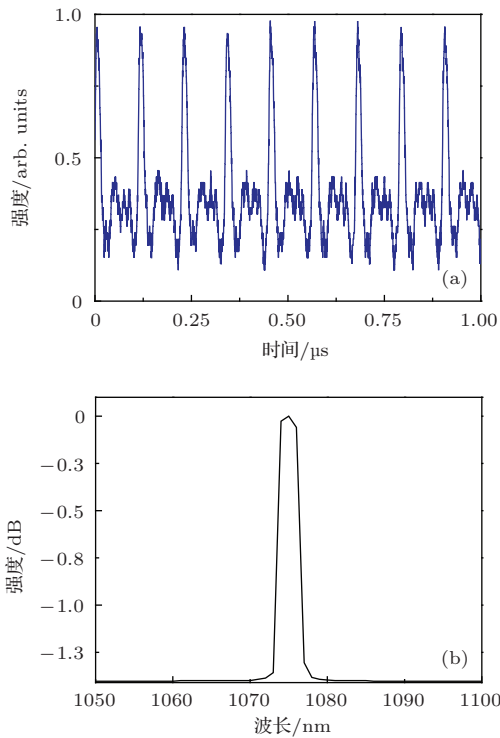


图4 (网刊彩色) 明脉冲 (a) 脉冲序列; (b) 脉冲光谱
Fig. 4. (color online) (a) Oscilloscope trace; (b) spectrum of bright pulse train.

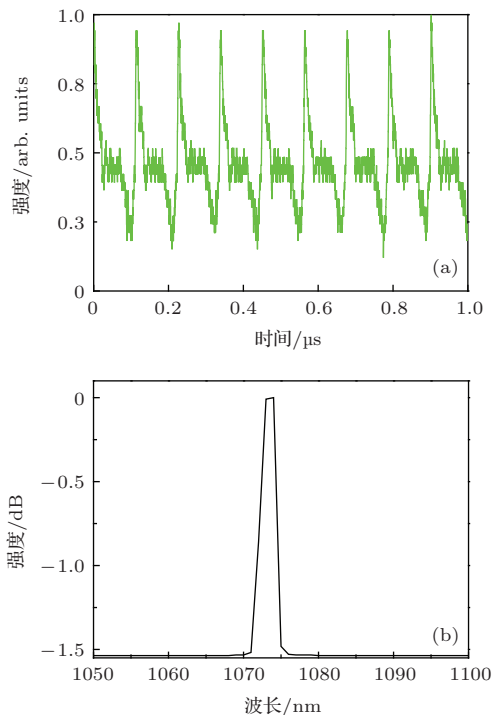


图5 (网刊彩色) 暗明脉冲对 (a) 脉冲序列; (b) 脉冲光谱
Fig. 5. (color online) (a) Oscilloscope trace; (b) spectrum of dark-bright pulse pairs train.

当抽运功率提高到220 mW时, 通过细微的旋转PC可以观察到连续光背景下出现一些局部的强度凹陷. 在合适的运行条件下, 激光器实现单波长

振荡, 如图6(a)所示, 表明获得了暗脉冲, 其单个脉冲尖峰之间间隔的重复频率为8.904 MHz, 间距为111.2 ns. 真正的暗脉冲的强度凹陷会从背景光的最大值降到零, 但是从图中看出, 我们得到的暗脉冲强度凹陷了70%左右, 这是由于使用的光电探测器的带宽限制, 对于暗脉冲产生一定的滤波作用. 由光谱分析仪得到的激光光谱如图6(b)所示, 激光的中心波长为1073 nm, 3 dB 带宽为1 nm.

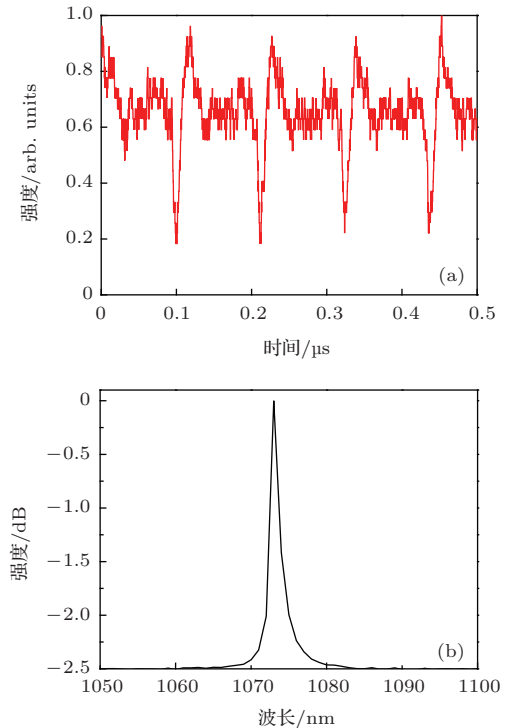


图6 (网刊彩色) 暗脉冲 (a) 脉冲序列; (b) 脉冲光谱
Fig. 6. (color online) (a) Oscilloscope trace; (b) spectrum of dark pulse train.

实验中还观察到了明、暗脉冲对应谐波的产生. 当抽运功率提高到350 mW时, 得到的明脉冲如图7(a)所示. 脉冲重复频率与基频一致, 平均功率为5.01 mW, 对应的单脉冲能量为0.56 nJ. 改变PC角度可以得到其稳定的二阶谐波, 测得重复频率为17.500 MHz, 脉冲序列如图7(b)所示. 抽运光功率的增大会提高激光增益, 同时也导致了激光腔内的背景噪声获得有效增益而起振. 调节PC改变激光腔内的偏振态, 使得腔内光脉冲发生重组最终演变为稳定的二阶谐波锁模脉冲.

不同于明脉冲, 当抽运功率达到210 mW时调节PC就可以观察到暗脉冲. 逐渐提高抽运功率, 暗脉冲不再稳定并出现分裂的趋势. 当抽运功率达到250 mW时, 可以观察到不稳定的二、三阶暗脉冲

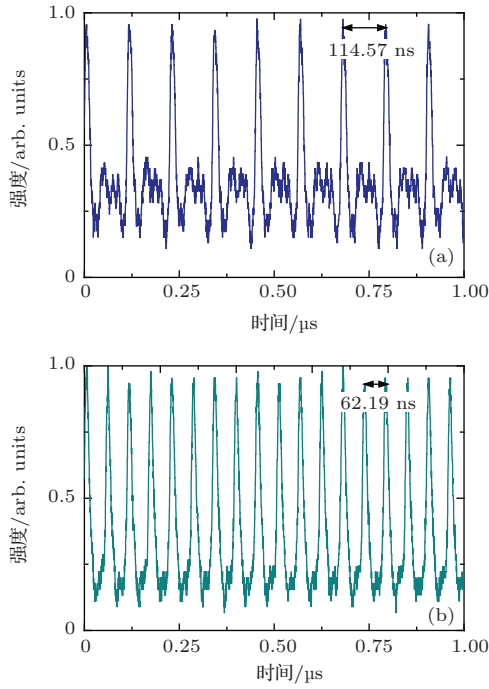


图7 (网刊彩色) (a) 明脉冲序列及其 (b) 二阶谐波
Fig. 7. (color online) Oscilloscope trace of (a) bright pulse train and (b) corresponding harmonic pulse train.

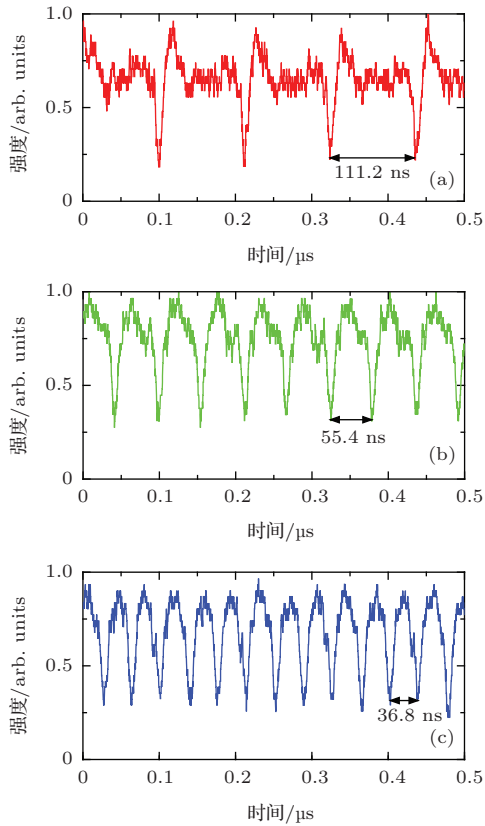


图8 (网刊彩色) (a) 暗脉冲; (b) 二阶谐波; (c) 三阶谐波
Fig. 8. (color online) Oscilloscope trace of (a) dark pulses train, (b) second-harmonic pulse train, (c) third-harmonic pulse train.

谐波, 如图8, 对应的暗脉冲间隔分别为55.4 ns和36.8 ns. 暗脉冲谐波则是由于脉冲的交叉相位调制存在固有的调制不稳定性所导致的. 太强的抽运光会使得腔内产生新的暗脉冲分量. 由于激光器工作在非锁模区并且石墨烯可饱和吸收体具有较低的调制深度, 这使得新产生的暗脉冲分量无法稳定存在于激光腔内, 而无法像明脉冲最终形成稳定的谐波锁模.

4 模拟结果与分析

为了研究脉冲在激光器内的演化过程还做了相应的模拟. 根据耦合金兹堡-朗道方程组:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + i\gamma \left(|u|^2 + \frac{2}{3}|v|^2 \right) u + \frac{i\gamma}{3} v^2 u^* \\ &\quad + \frac{g}{2} u + gT_2^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial v}{\partial z} &= \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + i\gamma \left(|v|^2 + \frac{2}{3}|u|^2 \right) v + \frac{i\gamma}{3} u^2 v^* \\ &\quad + \frac{g}{2} v + gT_2^2 \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 u 和 v 是两个正交的偏振方向上的脉冲包络. β_2 是二阶色散系数, γ 是非线性系数, T_2 是偶极子弛豫时间. 饱和增益系数

$$g = G_0 \exp \left[-\frac{\int (|u|^2 + |v|^2) dt}{E_{\text{sat}}} \right],$$

其中 G_0 是小信号增益系数, E_{sat} 是饱和能量. 石墨烯可饱和吸收体的透过率为

$$T(\tau) = 1 - \frac{\Delta R}{1 + |A(\tau)|^2/P_A}, \quad (2)$$

其中 ΔR 是非饱和损耗, P_A 是饱和功率.

为了尽可能的接近于实验条件, 我们使用了以下参数并采用分步傅里叶算法进行模拟: 单模光纤的长度为20 m, 掺镜光纤的长度为3 m, 单模光纤和掺镜光纤的群速度色散系数(GVD)分别为 $-28 \text{ ps}^2/(\text{nm}/\text{km})$ 和 $-30 \text{ ps}^2/(\text{nm}/\text{km})$, 激光腔内的净色散为 0.33 ps^2 . 非线性系数 $\gamma = 5.7 \text{ W}^{-1}/\text{km}$, 增益带宽 $\Delta\lambda_g = 40 \text{ nm}$, 增益饱和能量 $E_{\text{sat}} = 1 \text{ nJ}$, 小信号增益系数 $G_0 = 2.8 \text{ m}^{-1}$, 非饱和损耗 $\Delta R = 47.2\%$. 考虑到石墨烯可饱和吸收体处空间对接所引入的损耗和激光器30%的功率耦合输出, 耦合传输比设为45%.

由图9(a)可以看到初始信号 $u_0, v_0 = \text{Asech}(Bt)$ 时, 经过大约50次循环后形成稳定的明脉冲. 由图9(b)可以看出最终稳定的脉冲光谱具有明显陡峭的边沿, 与实验中观测到的明脉冲光谱是一致的. 对比图9(a), 图10(a)可知, 暗脉冲是由 $u_0, v_0 = \text{Atanh}(Bt)$ 在锁模部件和光纤色散与非线性共同作用下演化而成. 由图10(b)可以看出, 暗脉冲的光谱明显窄于明脉冲脉冲. 如图11(a)所示, 当 $u_0 = \text{Asech}(Bt), v_0 = \text{Atanh}(Bt)$ 时, 经过大

约30次循环后形成稳定的暗明脉冲对. 如图11(b)所示, 其光谱宽度介于明脉冲和暗脉冲之间, 并具有两种光谱的部分特征. 由模拟结果总结出初始信号决定最终的脉冲类型: 背景噪声中的凸起会演化成明脉冲; 而连续光背景下的强度凹陷则会演化成暗脉冲; 当两种不同的初始信号同时存在于激光腔内时, 在合适的条件下会形成暗明脉冲对. 结合实验可知, 调节PC这一步骤等效于选择初始信号, 经过激光腔内的增益放大, 最终输出稳定的脉冲.

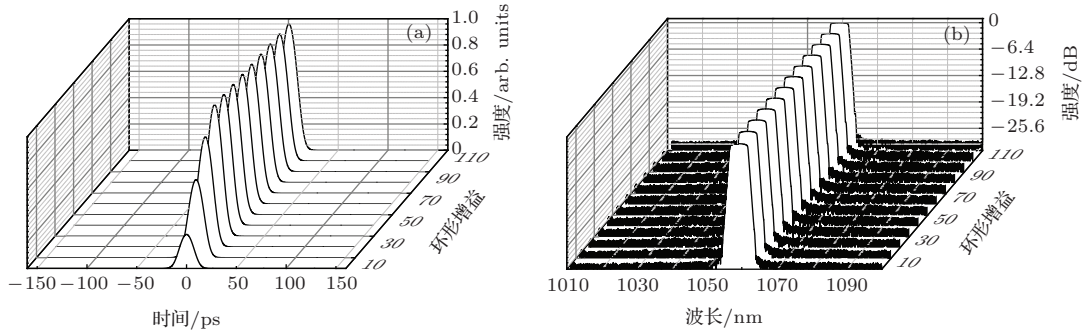


图9 明脉冲 (a) 时域演化, (b) 光谱演化

Fig. 9. (a) temporal evolution, (b) spectrum evolution of bright pulse.

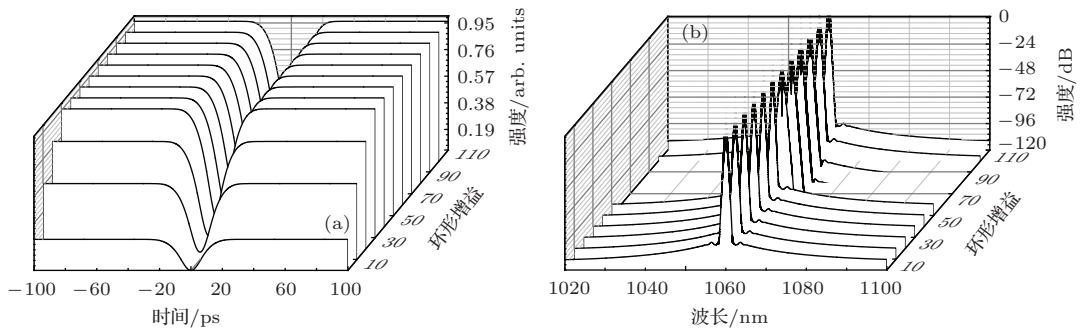


图10 暗脉冲 (a) 时域演化, (b) 光谱演化

Fig. 10. (a) temporal evolution, (b) spectrum evolution of dark pulse.

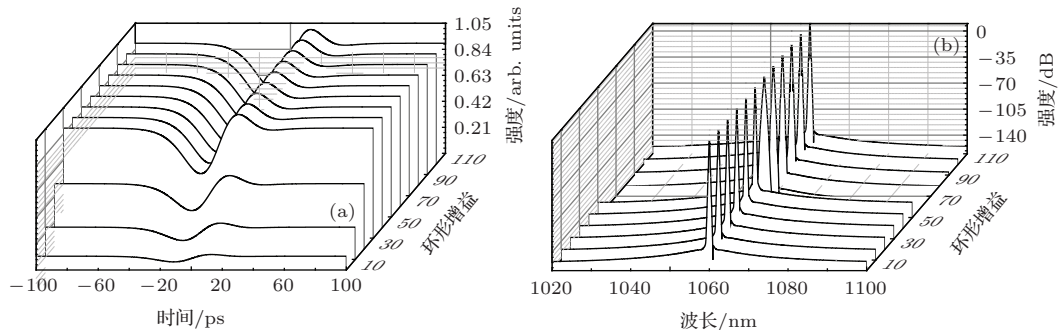


图11 暗明脉冲对 (a) 时域演化; (b) 光谱演化

Fig. 11. (a) temporal evolution, (b) spectrum evolution of dark-bright pulse pairs.

5 结 论

在基于石墨烯可饱和吸收体的被动锁模全正色散掺镱光纤激光器中观察到了明脉冲及其二阶谐波分量、暗明脉冲对、暗脉冲及其二、三阶谐波分量三种类型脉冲. 这些不同的脉冲的产生原因主要是腔内的石墨烯锁模部件引起的非线性效应. 无论是明脉冲、暗明脉冲对还是暗脉冲都是由初始信号和激光器结构共同决定的. 明脉冲谐波产生是因为腔内增益增大时, 噪声获得有效增益而起振形成二阶谐波锁模. 而暗脉冲的谐波分量产生是激光器工作在非锁模区时, 脉冲在光纤中的交叉相位调制所导致的调制不稳定性引起的. 若进一步优化腔的结构, 改进石墨烯可饱和吸收体的质量, 有望获得更稳定、更高功率的激光输出.

参考文献

- [1] Feng D J, Hang W Y, Jiang S Z, Ji W, Jia D F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 054202 (in Chinese) [冯德军, 黄文育, 姜守振, 季伟, 贾东方 2013 物理学报 **62** 054202]
- [2] Ge P G, Su L M, Liu J, Zheng L H, Su L B, Xu J, X., Wang Y G 2015 *Chin. Phys. B* **24** 014207
- [3] Bao Q, Zhang H, Wang Y, Ni Z, Yan Y, Shen Z X, Loh K P, Tang D Y 2009 *Adv. Funct. Maert.* **19** 3077
- [4] Wang G H, Wang Z T, Chen Y, Zhao C J, Zhang H, Wen S C 2012 *Chin. J. Lasers* **39** 0602003 (in Chinese) [汪光辉, 王志腾, 陈宇, 赵楚军, 张晗, 文双春 2012 中国激光 **39** 0602003]
- [5] Chen G, Jiang Z W, Peng J G, Li H Q, Dai N L, Li J Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 144206 (in Chinese) [陈瑰, 蒋作文, 彭景刚, 李海清, 戴能利, 李进延 2012 物理学报 **61** 144206]
- [6] Kivshar Y S, Luther-Davies B 1998 *Phys. Rep.* **298** 81
- [7] Zhang H, Tang D Y, Zhao L M, Wu X 2009 *Phys. Rev. A* **80** 045803
- [8] Zhang H, Tang D Y, Zhao L M, Knize R J 2010 *Opt. Express.* **18** 4428
- [9] Tang D Y, Zhang H, Zhao L M, Wu X 2009 *Proceedings of the 14th OptoElectronics and Communications Conference Hong Kong*, July13-17, 2009 p1
- [10] Song Y W, Jang S Y, Han W S, Bae M K 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 051122
- [11] Luo Z Q, Zhou M, Weng J, Huang G M, Xu H Y, Ye C C, Cai Z P 2010 *Opt. Lett.* **35** 3709
- [12] Xu Z W, Zhang Z X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104210 (in Chinese) [徐中巍, 张祖兴 2013 物理学报 **62** 104210]

Dark pulses and harmonic mode locking in graphene-based passively mode-locked Yb³⁺-doped fiber laser with all-normal dispersion cavity*

Fu Kuan¹⁾ Xu Zhong-Wei¹⁾ Li Hai-Qing¹⁾ Peng Jing-Gang¹⁾
 Dai Neng-Li¹⁾ Li Jin-Yan^{1)2)†}

¹⁾ (Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China)

²⁾ (School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 13 January 2015; revised manuscript received 15 May 2015)

Abstract

Graphene has recently been proposed as an attractive material in saturable absorption (SA) applications due to its broad operation range, low saturation power, easy fabrication, high reliability, and quick recovery time. In this paper, we use laser-induced deposition to prepare graphene saturable absorber, and apply it in a mode-locked all-normal-dispersion (ANDi) Yb-doped fiber laser to experimentally investigate different operational states. By adjusting a polarization controller (PC) and the pump power, bright pulses, dark-bright pulse pairs and their second-harmonic pulses, as well as dark pulses and their second, third-harmonic pulses can all be observed. In particular, it is the first time to our knowledge to report on the formation of dark-bright pulse pairs, dark pulses and their harmonic mode locking (HML) counterparts in graphene-based passively mode-locked Yb-doped fiber laser with ANDi cavity. According to simulation, the main causes of these pulses are different cavity nonlinear effects which result from the fiber mode-lock members including graphene. Bright pulses, dark pulses and dark-bright pulse pairs are determined both by the laser structure and their own initial signals. Bright pulse harmonic generation is ascribed to the noise gains which form new components. However, it is found that the multiple-time repetition rate of dark pulses is a result of square pulse splitting of each component. This consequence may be of potential application in new type mode-locked fiber lasers.

Keywords: fiber laser, graphene, dark pulse, harmonic

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Fc, 42.65.Tg, 78.67.Wj

DOI: 10.7498/aps.64.194205

* Project supported by the National High-Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2013AA031501), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61378070), and the Hubei Science Foundation, China (Grant No. ZRY0535).

† Corresponding author. E-mail: l jy@mail.hust.edu.cn