

氧化石墨烯被动锁模掺镜光纤激光器多脉冲现象的实验研究*

黄诗盛¹⁾ 王勇刚²⁾ 李会权¹⁾ 林荣勇¹⁾ 闫培光^{1)†}

1)(深圳大学电子科学与技术学院, 深圳市激光工程重点实验室, 深圳 518060)

2)(中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2013年11月1日收到; 2013年12月3日收到修改稿)

利用氧化石墨烯作为可饱和吸收体, 在被动锁模全正常色散掺镜光纤激光器中研究了多脉冲的现象. 在同一抽运功率不同偏振态下, 实验获得了矩形脉冲谐波锁模、耗散孤子谐波锁模、准谐波锁模, 脉冲峰值周期性调制, 脉冲簇、脉冲束、混沌多重脉冲的多脉冲现象. 插入激光腔内的 2 nm 窄带滤波器具有限制增益带宽、对脉冲塑形、诱导多脉冲产生的作用. 调节偏振控制器相当于改变腔内增益, 是实现不同类型多脉冲现象的主要原因. 本实验研究有利于加深对多脉冲动力学行为在正常色散区域氧化石墨烯锁模掺镜光纤激光器中的理解.

关键词: 氧化石墨烯, 全正常色散, 掺镜光纤激光器, 多脉冲

PACS: 42.55.Wd, 42.65.Re, 42.65.Sf

DOI: 10.7498/aps.63.084202

1 引言

被动锁模光纤激光器作为研究孤子非线性动力学过程的理想平台, 一直受到极大的关注. 光纤激光器中孤子脉冲的各种动力学行为, 如孤子碰撞^[1]、混沌多重孤子^[2]、孤子簇^[3]、高阶谐波锁模^[4]、多波长锁模^[5,6]、孤子分子^[7]、脉冲输出的不均匀性^[8]、孤子雨^[9]等现象都是目前研究的热点. 基于非线性光纤环境 (NOLM) 和非线性偏振旋转 (NPR) 实现人造快速可饱和吸收效应的被动锁模光纤激光器是当下研究孤子非线性动力学的主要装置, 但这两种装置受环境影响大, 具有不稳定性的缺点, 因此实用程度低. 利用材料具有的真实可饱和吸收效应实现激光器的被动锁模是解决上述装置缺点的有效方法. 半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 作为可饱和吸收体具有稳定性高、可靠

性好等优点, 但其制备成本高、结构复杂、可饱和吸收带宽有限、易损伤. 对比 SESAM, 单壁碳纳米管 (SWNTs) 作为可饱和吸收体具有恢复时间快、饱和光强低、成本低、结构简单、制备处理容易等优点, 但其可饱和吸收特性与管径和手性 (chirality) 有关, 可饱和吸收带宽有限. 石墨烯 (graphene) 自 2004 年问世以来, 以其独特的电学性质受到极大的关注. 由于泡利阻塞原理导致其独特的能量带隙结构, 石墨烯作为可饱和吸收体与 SESAM 与 SWNTs 相比较具有明显的优势: 大的饱和吸收调制深度、低的吸收强度、超快的恢复时间、高的损坏阈值、超宽的可饱和吸收范围 (300—2500 nm)、价格低廉、易制作、与光纤耦合损耗小. 2009 年, 石墨烯作为可饱和吸收体首次被用于光纤激光器锁模并取得成功^[10], 此后, 对于石墨烯锁模产生各类脉冲的研究就从未间断. 最近, Liu 等^[11] 利用 SWNTs 实现了三个波长的锁模脉冲; 利用碳纳米管和石墨烯混

* 广东省自然科学基金 (批准号: S2013010012235)、广东省高校科技创新项目 (批准号: 2013KJJCX0161) 和深圳市科技计划项目 (批准号: JCYJ20120613172042264, JCYJ20130329142040731) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yanpg@szu.edu.cn

和体作为锁模器件, 通过改变激光腔内的条件, 可以实现耗散孤子与传统孤子的不同运转状态^[12]. 石墨烯具有很高的非线性系数, 这有利于激光腔内多脉冲的形成. 在基于石墨烯可饱和吸收体的被动锁模掺铒光纤激光器中, Song 等^[13]观察到多重矢量孤子运转及相互作用的实验现象; Meng 等^[14]获得了混沌多重孤子、孤子簇、高阶谐波锁模、孤子流的操作; Feng 等^[3]则实验研究了多重孤子的形成机制. 此外, 在石墨烯被动锁模掺铒光纤激光器中获得了高重复频率的谐波锁模^[15]. 然而, 目前绝大部分多脉冲现象的研究都集中于 1.5 μm 区域的反常色散区. 事实上, 脉冲在正常色散单模光纤传播具有很高的非线性啁啾, 腔内脉冲宽度很宽, 有效地降低了峰值功率, 因此脉冲可以支持很大的脉冲能量而不会分裂^[16-18]. 2013年, Bao 等^[19]基于 NPR 锁模技术, 在掺铒光纤激光器中插入双滤波器实现了孤子雨、孤子簇和谐波锁模的多孤子脉冲操作. 据我们所知, 目前还没有在石墨烯或氧化石墨烯 (graphene-oxide, GO) 锁模掺铒光纤激光器中观察到多脉冲现象的报道. 本文报道了在基于氧化石墨烯可饱和吸收体的全正常色散掺铒光纤激光器中观察到多种多脉冲现象的实验研究. 在同一抽运功率不同偏振态下, 实验获得了矩形脉冲谐波锁模、耗散孤子谐波锁模、准谐波锁模, 脉冲峰值周期性调制, 脉冲簇、脉冲束、混沌多重脉冲的多脉冲现象. 本研究有利于加深对多脉冲动力学行为在正常色散区域氧化石墨烯锁模掺铒光纤激光器中的理解.

2 氧化石墨烯的制备及实验装置

氧化石墨烯作为石墨烯的派生物, 有着与石墨烯可媲美的可饱和吸收特性和极快的恢复时间. 此外, 氧化石墨烯不仅价格低廉, 而且制备工艺比石墨烯更为简单, 有利于实现锁模激光器的产业化. 制作氧化石墨烯可饱和吸收体的方法为垂直蒸发法, 制造过程可以参照本课题组的前期工作^[20-22]. 本文只做简单的描述: 首先, 将石墨粉未经化学氧化获得氧化石墨烯薄片, 再将氧化石墨烯薄片倒入 10 mL 0.1% 的十二烷基硫酸钠 (sodium dodecyl sulfate, SDS) 溶液中, 进行 10 h 的超声振荡. 然后, 把聚乙烯醇 (polyvinylalcohol, PVA) 粉末倒进上述溶液之中, 并在 90 $^{\circ}\text{C}$

下超声处理 3 h. 最后, 将 GO/PVA 溶液在 40 $^{\circ}\text{C}$ 的干燥箱内垂直蒸发超过 40 h. 测得的线性透射曲线如图 1 所示, 其中插图样品, 其拉曼光谱在文献^[22]中给出. 实验装置如图 2 所示, 抽运源采用中心波长 974 nm、最大输出功率 600 mW 带尾纤输出的 LD, 通过 980 nm/1060 nm 波分复用耦合器 (WDM) 将抽运光耦合进环形腔内. 增益介质为 3.5 m 的掺铒光纤 (YDF), 其在 975 nm 处的吸收系数为 250 dB/m. 偏振无关的隔离器 (ISO) 用来保证环形腔内激光的单向运行, 提高输出激光的信噪比. 10 : 90 光耦合器 (OC) 的 10% 端口作为激光输出端, 用于信号的检测. 偏振控制器 (PC) 用来调节激光腔内的偏振态, 改变脉冲的操作状态. 中心波长 1064 nm, 3 dB 带宽 2 nm 的窄带滤波器 (filter) 用来限制脉冲的频谱带宽和脉冲宽度, 进而限制最大单脉冲能量, 有利于实现多脉冲的运行. 将氧化石墨烯可饱和吸收体 (GOSA) 切成 1 mm \times 1 mm 放置于两个光纤接头中间, 并用法兰盘连接固定. 总的腔长约为 195 m, 计算得腔内总色散为 3.486 ps², 腔的基频为 $f = c/nL$ 为 1.062 MHz.

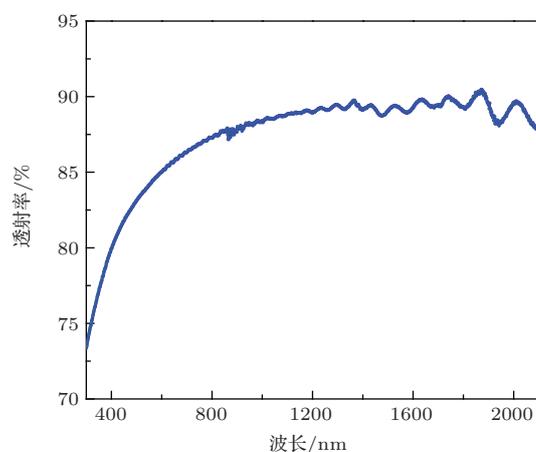


图 1 氧化石墨烯可饱和吸收体的线性透过曲线

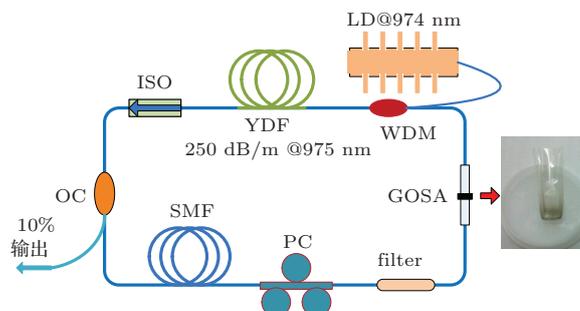


图 2 基于氧化石墨烯可饱和吸收体的全正常色散被动锁模掺铒光纤激光器的实验装置

3 实验结果与讨论

3.1 矩形脉冲谐波锁模、耗散孤子谐波锁模、准谐波锁模状态

为了获得丰富的多脉冲操作现象, 实验中直接将抽运源功率增至 500 mW. 适当地调节 PC, 首先获得的是矩形脉冲序列, 如图 3(a) 所示, 其重复频率为 1.062 MHz, 脉冲与脉冲之间的时间间隔约为 942 ns, 与光在腔内来回一周的时间比较一致, 这表明脉冲的出现是激光锁模的结果. 图 4(a) 为矩形脉冲锁模序列的单个脉冲展示, 其脉冲宽度为 30.9 ns, 而且有着较为平坦的顶端和类似矩形的脉冲形状, 说明脉冲在腔内传输积累了很强的线性啁啾, 这正是激光脉冲在正常色散区运行的特征. 实验还测得此情况下的输出功率为 9.3 mW, 对应单脉冲能量为 8.68 nJ, 比传统孤子锁模的单脉冲能量低于 0.1 nJ 要高出近两个数量级. 相应的输出光谱如图 4(b) 所示, 中心波长为 1063.3 nm, 3 dB 谱宽为 0.177 nm. 轻微而连续地调节 PC, 可得到稳定的 2 阶, 3 阶, 4 阶, 5 阶可调的矩形脉冲谐波锁模序列, 如图 3(b)—(e) 所示, 相应的重复频率分别为 2.125, 3.184, 4.248 和 5.357 MHz. 继续调节 PC, 未能获得更高阶数的矩形脉冲谐波锁模, 反而得到 16 阶耗散孤子谐波锁模序列, 如图 5 所示, 有 16 个光脉冲共存于单脉冲运转周期内 (round-trip time), 脉冲与脉冲之间的时间间隔相等、峰值强度几乎一致, 脉冲宽度约 1 ns. 图 5 插图为其相对应的光谱, 光谱有着陡峭的两沿, 沿与沿之间的宽度约为 0.8 nm, 这是耗散孤子工作在全正常色散区激光器的典型特征. 实验中还获得了准谐波锁模状态, 如图 6 所示, 与谐波锁模不同之处在于准谐波锁模脉冲与脉冲之间的时间间隔不再相等, 但却同样有规律地在腔内传输. 轻微调节 PC, 可以实现 2 阶, 3 阶, 4 阶可调的稳定准谐波锁模运转, 对应图 6(a)—(c).

3.2 脉冲峰值周期性调制现象

在调节 PC 的过程中, 实验中发现了一个有趣的现象: 脉冲序列峰值强度出现了明显的周期性调制现象, 如图 7 所示. 脉冲序列峰值强度周期性调制与抽运功率和腔内偏振态有着密切联系. Chen 等 [8] 认为, 在 NPR 激光器中, 脉冲序列峰值强度周

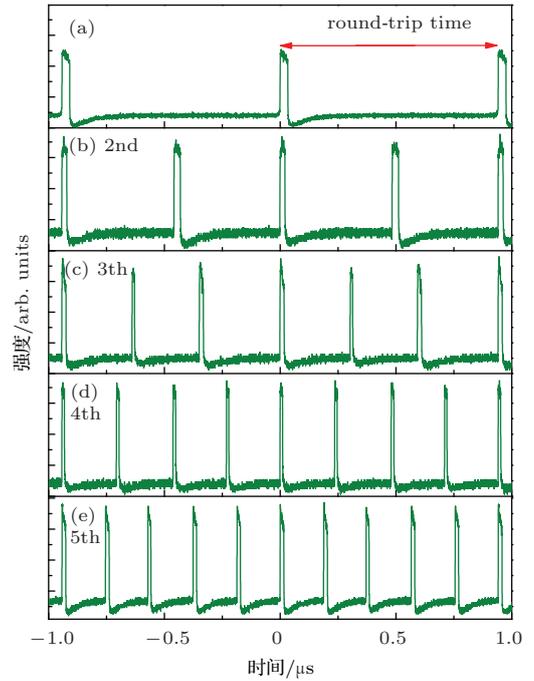


图3 基频 (a) 2 阶, (b) 3 阶, (c) 4 阶, (d) 5 阶, (e) 矩形脉冲谐波锁模序列

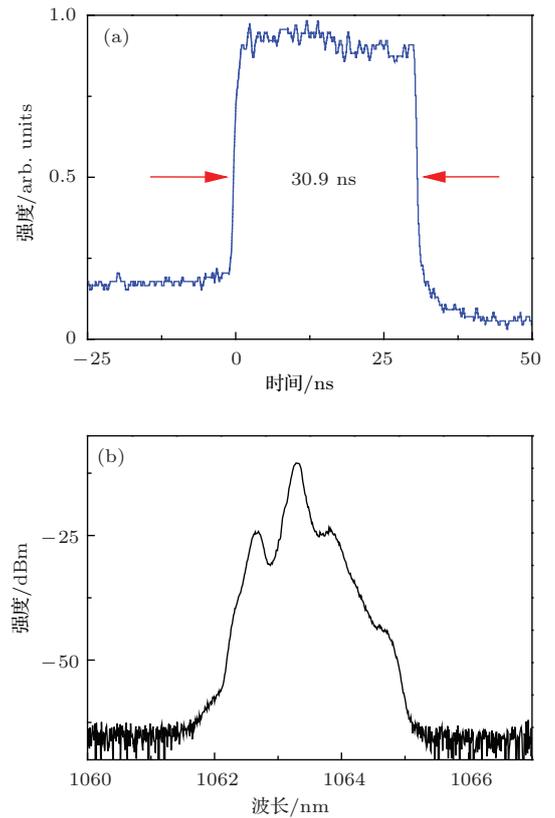


图4 (a) 矩形脉冲锁模序列的单个脉冲; (b) 矩形脉冲锁模序列对应的光谱

期性调制是由于偏振相关 ISO 中的起偏器对激光腔中的光脉冲序列进行了周期性偏振调制, 抽运功率越大, 单孤子运转周期内的脉冲数目就越多. 本

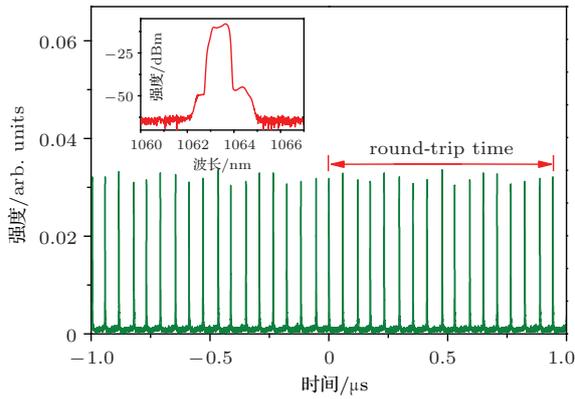


图5 16阶耗散孤子谐波锁模, 插图为相应的光谱

实验中将抽运功率固定不变, 仅仅调节PC, 同样发现脉冲数目变化的现象, 可获得3阶, 5阶, 12阶, 19阶多脉冲周期性调制, 但随着阶数的增加, 周期性变得不再严格, 而是准周期性的调制, 这个过程可以过渡到谐波锁模. 本实验中所用的ISO是与偏振无关的, 不存在起偏器, 但氧化石墨烯具有的起偏特性与激光腔内双折射相结合, 其效果类似于偏

振相关ISO中的起偏器的作用, 同样可以起到对脉冲序列进行周期性调制的效果.

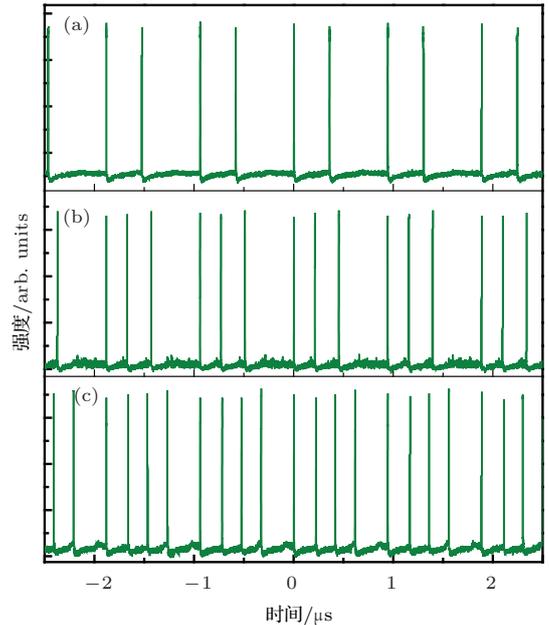


图6 2阶(a), 3阶(b), 4阶(c)准谐波锁模序列

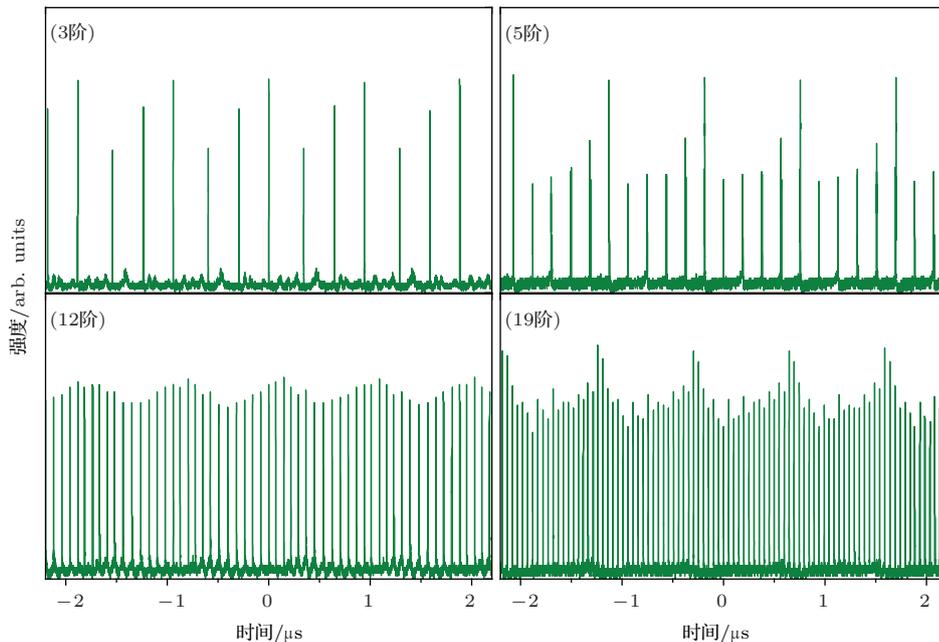


图7 3阶, 5阶, 12阶, 19阶周期性调制脉冲序列

3.3 脉冲簇、脉冲束、混沌多重脉冲状态

随着PC的调节, 观察到另一个多脉冲运行状态——脉冲簇, 如图8所示. 脉冲簇的形成可以解释为峰值功率受限效应 (peak power clamping effect)^[23]. 脉冲簇里面的脉冲数目会随着抽运功率的减少(增加)而减少(增加), 并表现出滞后现

象 (hysteresis phenomena)^[24], 最后形成单脉冲锁模序列, 实验中我们也观察到了类似的现象. 此外, 轻微连续地调节偏振控制器, 多脉冲的数量同样会连续增加(减少), 这是因为调节偏振控制器会增加(减少)腔内增益, 相当于增加(减少)抽运功率. 图8(a), (b)为抽运功率500 mW不同偏振态下的

两个典型脉冲簇, 脉冲簇里面的脉冲相互分开, 具有一定的时间间隔, 可以很清楚地分辨出每一个脉冲, 随着脉冲数目的增加, 它们会逐渐占据整个激光腔. 实验中还发现一个与脉冲簇类似的运行状态——脉冲束, 如图 9 所示. 脉冲束与脉冲簇的不同之处在于脉冲束里面的所有脉冲是紧紧地束缚在一起的, 仅仅占据激光腔的很小一部分. 图 9 中的插图为脉冲束的部分细节, 脉冲之间有一定的时间间隔, 但比脉冲簇脉冲之间的间隔要小, 时域位置很清晰. 轻微地调节 PC, 实验中还获得了 29 阶脉冲束谐波锁模, 如图 10 所示, 每个脉冲束由 3 或 4 个脉冲组成. 实验中最常见的是混沌多重脉冲状态, 如图 11 所示, 有的占据腔的很小一部分 (图 11 (a)), 有的则整个激光腔被脉冲占据 (图 11 (b)). 这种情况下脉冲任意地分布在激光腔内, 脉冲与脉冲之间出现相对移动. 这个现象可以解释如下: 混沌多重脉冲状态下不同脉冲所对应的频率成分是不同的, 加上激光腔内的色散不为零, 所以不同脉冲会有不同的群速度 (group velocity) 和单脉冲运转周期, 即出现相对移动 [25].

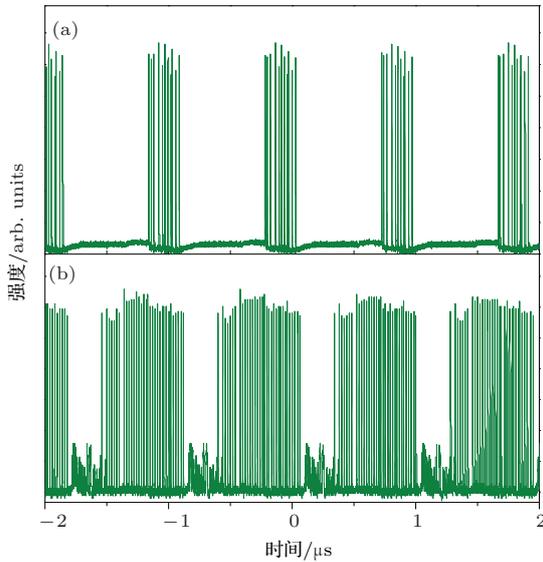


图 8 同一抽运功率下不同偏振态的脉冲簇状态

实验过程中为了验证激光腔内是否存在类似于 NPR 的可饱和效应, 我们将 GOSA 从腔内移除. 除去 GOSA 的激光腔内, 不管怎么改变抽运功率和调节 PC 都没有观察到任何脉冲现象. 说明 GOSA 是激光腔内惟一存在的可饱和吸收体. 实验中 195 m 的长腔可以使得脉冲具有很高的正啁啾和很大的单脉冲能量, 2 nm 窄带滤波器的引入起到消

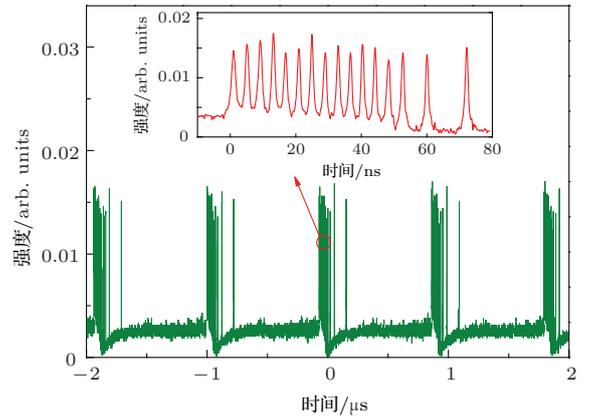


图 9 脉冲束状态, 插图为脉冲束细节

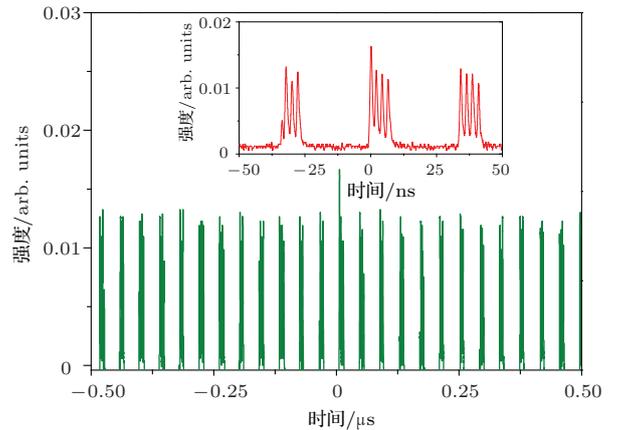


图 10 29 阶脉冲束谐波锁模状态, 插图为脉冲束细节

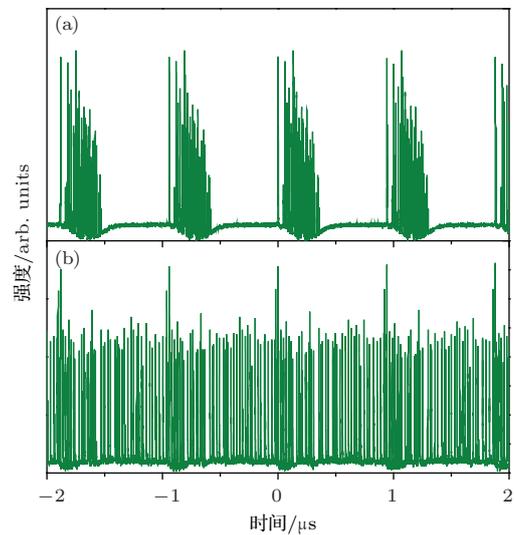


图 11 混沌多重脉冲状态 (a) 脉冲占据部分激光腔; (b) 脉冲占据整个激光腔

减脉冲啁啾、窄化光谱的作用, 从而实现多脉冲的运转. 此外, 多脉冲的运行状态很大程度上依赖于对 PC 的调节, 将 PC 调节到不同位置可以实现不同类型的多脉冲运行. 这种情况可以做如下解释: 氧化石墨烯的可饱和和吸收特性、腔内光纤的色散以

及非线性效应的共同作用下,腔内光纤弱的双折射等效于一个双折射滤波器,其中心透射波长间隔可以由公式 $\Delta\lambda = \lambda^2/(LB)$ 给出,其中 λ 是激光的中心波长, L 为激光腔的长度, B 为腔内双折射量^[26].调节PC改变双折射量,相当于改变激光的增益带宽^[27].因此,将PC调节到某一位置,腔内损耗降低(增加),等效于增加(减小)抽运功率,增加(减小)光增益,从而实现多脉冲的不同运行状态.

4 结 论

实验研究了基于氧化石墨烯可饱和吸收体的被动锁模全正常色散掺镜光纤激光器中多脉冲的现象.在同一抽运功率不同的偏振态下,实验获得了矩形脉冲谐波锁模、耗散孤子谐波锁模、准谐波锁模,脉冲峰值周期性调制,脉冲簇、脉冲束、混沌多重脉冲的多脉冲现象.调节PC相当于改变腔内损耗,是实现不同多脉冲现象的主要原因.本研究有利于加深对多脉冲动力学行为在正常色散区域氧化石墨烯锁模掺镜光纤激光器中的理解.

参考文献

- [1] Grelu P, Akhmediev N 2004 *Opt. Express* **12** 3184
- [2] Amrani F, Salhi M, Leblond H, Sanchez F 2010 *Opt. Commun.* **283** 5224
- [3] Feng Q, Chen Y, Zhao C, Li Y, Wen J G, Zhang H 2013 *Opt. Engineer.* **52** 44201
- [4] Chen H R, Lin K H, Tsai C Y, Wu H H, Wu C H, Chen C H, Chi Y C, Lin G R, Hsieh W F 2013 *Opt. Lett.* **38** 845
- [5] Chen W C, Luo Z C, Xu W C 2009 *Laser Phys. Lett.* **6** 816
- [6] 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]
- [7] Li X H, Wang Y S, Zhao W, Zhang W, Hu X H, Gao C X, Zhang H, Yang Z, Wang H S, Wang X L, Li C, Shen D Y 2012 *Opt. Commun.* **285** 1356
- [8] Chen W C, Xu W C, Cao H, Han D G 2007 *Asia Pacific Opt. Communications* 67813Q
- [9] Chouli S, Grelu P 2010 *Phys. Rev. A* **81** 63829
- [10] Bao Q L, Zhang H, Wang Y, Ni Z H, Yan Y L, Shen Z X, Loh K P, Tang D Y 2009 *Adv. Funct. Mater.* **19** 3077
- [11] Liu X M, Han D D, Sun Z P, Zeng C, Lu H, Mao D, Cui Y D, Wang F Q 2013 *Sci. Rep.* **3** 2718
- [12] Cui Y D, Liu X M 2013 *Opt. Express* **21** 18969
- [13] Song Y F, Li L, Zhang H, Shen D Y, Tang D Y, Loh K P 2013 *Opt. Express* **21** 10010
- [14] Meng Y C, Zhang S M, Li X L, Li H F, Du J, Hao Y P 2012 *Opt. Express* **20** 6685
- [15] Amrani F, Haboucha A, Salhi M, Leblond H, Komarov A, Grelu P, Sanchez F 2009 *Opt. Lett.* **34** 2120
- [16] Wang L R, Liu X M, Gong Y K, Hu X H, Wang Y S, Lu K Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4664 (in Chinese)[王播然, 刘雪明, 宫永康, 胡晓鸿, 王屹山, 卢克清 2009 物理学报 **58** 4664]
- [17] Zhang Z X, Dai G X 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 131 (in Chinese) [张祖兴, 戴国星 2011 光学学报 **31** 131]
- [18] Zhao H, Chai L, Ouyang C M, Hu M L, Wang Q Y 2010 *Chin. J. Lasers* **37** 2958 (in Chinese) [赵慧, 柴路, 欧阳春梅, 胡明列, 王清月 2010 中国激光 **37** 2958]
- [19] Bao C Y, Xiao X S, Yang C X 2013 *Opt. Lett.* **38** 1875
- [20] Zhao J Q, Wang Y G, Yan P G, Ruan S C, Cheng J Q, Du G G, Yu Y Q, Zhang G L, Wei H F, Luo J, Tsang Y H 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 114206
- [21] 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** 75105
- [22] Wang Y G, Chen H R, Wen X M, Hsieh W F, Tang J 2011 *Nanotechnology* **22** 455203
- [23] Tang D Y, Zhao L M, Zhao B, Liu A Q 2005 *Phys. Rev. A* **72** 43816
- [24] Liu X M 2010 *Phys. Rev. A* **81** 23811
- [25] Liu X M 2011 *Phys. Rev. A* **84** 53828
- [26] Zhang H, Tang D Y, Wu X, Zhao L M 2009 *Opt. Express* **17** 12692
- [27] Zhang H, Tang D, Knize R J, Zhao L M, Bao Q L, Loh K P 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 111112

Experimental studies of multiple pulses in a passively ytterbium-doped fiber laser based on graphene-oxide saturable absorber*

Huang Shi-Sheng¹⁾ Wang Yong-Gang²⁾ Li Hui-Quan¹⁾
Lin Rong-Yong¹⁾ Yan Pei-Guang^{1)†}

1) (Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

2) (State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(Received 1 November 2013; revised manuscript received 3 December 2013)

Abstract

The different multiple pulse phenomena are experimentally studied in a passively mode-locked ytterbium-doped fiber laser based on graphene-oxide saturable absorber (GOSA) with net normal dispersion cavity. At the same pump power with different polarization orientations, we observe the multiple pulse phenomena, including harmonic mode-locking of rectangular pulses, dissipative solitons, quasi-harmonic mode-locking, periodical peak modulation, multipulse bunches, multipulse cluster, and chaotic multipulse. The inserted 2 nm narrow bandwidth filter is important for limiting the gain bandwidth and shaping pulses. Adjusting the polarization controller is equivalent to changing the gain in the laser cavity, which is the main reason for the formation of different multiple pulses states. This is the first time that different multiple pulses states have been observed in an-normal-dispersion Yb-doped fiber laser with graphene-oxide saturable absorber. These results could extend the understanding of multiple pulse dynamics in GOSA mode-locked fiber lasers.

Keywords: graphene-oxide, all normal dispersion, ytterbium-doped fiber laser, multiple pulses

PACS: 42.55.Wd, 42.65.Re, 42.65.Sf

DOI: 10.7498/aps.63.084202

* Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. S2013010012235), the Foundation for Scientific and Technical Innovation in Higher Education of Guangdong, China (Grant No. 2013KJ CX0161), and the Science and Technology Project of Shenzhen City, China (Grant Nos. JCYJ20120613172042264, JCYJ20130329142040731).

† Corresponding author. E-mail: yanpg@szu.edu.cn