

doi:10.3788/gzxb20184703.0314001

基于非线性放大环镜锁模铥钬共掺光纤激光器的 多孤子脉冲现象实验

王小发,张俊红,彭晓玲,毛雪峰

(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)

摘 要:利用非线性放大环镜作为人工可饱和吸收体,在铥钬共掺光纤激光器中研究了多孤子脉冲现象.在同一泵浦功率不同偏振状态下,实验不仅获得了稳定的单个孤子脉冲,还观察到由单个孤子脉冲演化为 2 至 4 个孤子的锁模脉冲现象;在保偏光运行条件下增加泵浦功率,获得了孤子能量量化的演化过程.所得结果主要源于腔内弱的双折射效应等效的滤波器具有限制增益带宽和诱导多脉冲产生的作用.而调节偏振控制器对腔内增益的改变,是不同类型多脉冲现象出现的主要原因.研究结果对 2 μm 波段非线性放大环镜光纤激光器多孤子锁模脉冲动力学特性的研究具有一定参考价值.

关键词:非线性放大环镜;锁模;光纤激光;铥钬共掺;多孤子脉冲

中图分类号:TN248

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)03-0314001-7

Experiment of Multi-soliton Pulses in a Mode-locked Tm/Ho Co-doped Fiber Laser Based on a Nonlinear Amplified Loop Mirror

WANG Xiao-fa, ZHANG Jun-hong, PENG Xiao-ling, MAO Xue-feng

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

Abstract: The phenomenon of multi-soliton pulse is studied in Tm/Ho-codoped fiber laser based on a nonlinear amplified loop mirror as an artificial saturable absorber. By simply adjusting the polarization angle of Polarization Controller (PC), the experiment not only obtained a stable single-soliton pulse, but also observed the pulse sequences of the two-soliton, three-soliton and four-soliton. Increase the pump power under polarization maintaining operation, the evolution of soliton energy quantization is also obtained. The weak birefringence effect in the cavity is important for limiting the gain bandwidth and inducing the generation of multi-soliton. Adjusting the PC is equivalent to changing the gain in the cavity, which is the main reason for the formation of different multiple pulses states. We believe that the results obtained will be helpful in the investigation of multi-soliton pulses dynamics in 2 μm mode-locked fiber lasers.

Key words: Nonlinear amplifying loop mirror; Mode-locked; Fiber laser; Tm/Ho-codoped; Multi-soliton pulses

OCIS Codes: 140.4050; 140.3538; 190.4370

0 引言

光纤激光器是新型激光光源领域的研究热点^[1-2],与其它激光器相比,具有光束质量好、转换效率高、使用寿命长且性价比高等显著优势^[3].为了获得所需高性价比的锁模激光脉冲,被动锁模技术在光纤激光器中

基金项目:国家自然科学基金(No.11304409),重庆市自然科学基金(No.CSTC2013jcyjA4004),重庆市教委科学技术研究项目(No.KJ1500422)和重庆市研究生科研创新项目(No.CYS17240)资助

第一作者:王小发(1978-),男,副教授,博士,主要研究固态激光器和光纤激光器技术.Email: wangxf@cqupt.edu.cn

收稿日期:2017-08-28; **录用日期:**2017-11-27

<http://www.photon.ac.cn>

应用广泛^[4-7]。作为被动锁模核心器件的可饱和吸收体(Saturable Absorber, SA)主要分为真实 SA 和人造 SA 两大类,其中真实 SA 以半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorber Mirrors, SESAMs)^[4]和碳纳米管(Carbon Nano Tubes, CNTs)^[5]为代表,而人造 SA 以非线性偏振旋转效应(Nonlinear Polarization Rotation, NPR)^[6]和非线性放大环镜(Nonlinear Amplifying Loop Mirror, NALM)^[7]为典型。虽然真实 SA 可以通过各种耦合方式灵活插入腔内,但这类 SA 的损伤阈值较低,限制了其应用范围。而人造 SA 具备了真实 SA 所不具有的一些独特优势,其中基于 NPR 效应锁模技术的人造 SA 可以解决真实 SA 应用中损伤阈值偏低的难题,目前该锁模方式在光纤激光器中的应用主要分为两种方式:一种是在激光器中插入空间结构的偏振透镜;另一种是通过偏振相关隔离器、保偏光纤和其他可以用来起偏的光学无源器件配合偏振控制器来对脉冲进行塑形,然而该锁模方式还存在调试和维护难度高、成本较高和制作难度大等问题。与 NPR 效应锁模方式相比,NALM 锁模方式具有价格低廉、结构紧凑、易集成化且可以实现全光纤化结构等优点,在实际中应用更为广泛。NALM 锁模最早由英国电信实验室的 N. J. Donnan 和 D. Wood 于 1988 年提出^[8],基本思想由非线性光学环镜(Nonlinear Optical Loop Mirror, NOLM)发展而来。到 1990 年,奥地利的 M. E. Fermann 等在 NOLM 的基础上,在腔内加入了掺铒光纤放大器,形成熟知的 NALM 结构^[9]。Ning 等^[10]利用 NALM 锁模方式,在不同的工作条件下研究了多孤子锁模脉冲的输出特性;Cui 等^[11]利用 CNTs 与 NALM 构成的混合锁模谐振腔,研究了各种情况下的多孤子脉冲输出特性。随后,也有不少科研人员将 NALM 锁模方式应用于被动锁模光纤激光器中产生种类丰富的锁模脉冲输出,但涉及的激光增益介质都为掺镱或掺铒光纤^[12-16]。

近年来,2 μm 波段的锁模脉冲光纤激光器在激光雷达、激光医疗、光电对抗以及特殊材料加工等领域扮演着越来越重要的角色^[17-18],因而获得了广泛关注。到目前为止,基于 NALM 锁模技术,仅有少量文献针对 2 μm 波段的光纤激光器中的孤子锁模脉冲进行了具体研究^[19-22]。Li 等^[19]在掺铥光纤激光器(Thulium-Doped Fiber Laser, TDFL)中同时实现了孤子锁模和类噪声锁模脉冲输出,Xu 等^[20-21]通过对 TDFL 谐振腔内的色散管理,在反常色散区中实现了传统孤子锁模、类噪声脉冲等多种孤子锁模脉冲输出;此外,Xu 等还进一步通过引入高数值孔径(Ultra High Numerical Aperture, UHNA)光纤作为色散补偿元件,在谐振腔内实现了净正色散,从而获得耗散孤子锁模以及可调谐矩形锁模脉冲。然而,目前虽然已有不少文献^[23-26]对孤子锁模脉冲的动力学特性进行了较为充分的研究,但是其主要集中在理论方面或短波段(1 μm 和 1.5 μm 波段)的实验方面。对于 2 μm 波段,因为其处于人眼安全范围内,水分子在 2 μm 附近有强烈的中红外吸收峰,再加上 SM28e 光纤带来的损耗或者 SM1950 光纤(纤芯比普通单模光纤细)带来的折射率上的变化,导致其在相同的外界环境下与短波段相比,激光器腔内的增益带宽、折射率以及各种非线性效应的表现会有所差异,而现有的 2 μm 波段孤子锁模脉冲的研究只是对激光器产生的各类型孤子脉冲现象的分析,因而有必要对 2 μm 波段涉及锁模脉冲演化规律的具体动力学特性进行深入研究。

基于此,本文报道了一种基于非线性光纤环境为人造 SA 的铥铒共掺被动锁模光纤激光器。通过 1 550 nm 半导体激光器纤芯泵浦铥铒共掺增益光纤,在泵浦功率一定的情况下,调节偏振控制器,先后获得了单个孤子脉冲及其演化产生的 2 到 4 个孤子的锁模脉冲输出;继续增加泵浦功率,还观察到了孤子雨到混沌多孤子锁模脉冲的演化过程,并对多孤子锁模脉冲现象出现的原因进行了具体分析。

1 实验方案与原理

图 1 为基于非线性放大环镜的铥铒共掺被动锁模光纤激光器实验装置,左右两侧分别是一个非线性放大环和一个单向环(Unidirectional Ring, UR),中间通过分光比为 50 : 50 的 2×2 光耦合器将其两部分连接在一起。在整个激光器谐振腔中,光放大可以理解为增益光纤与泵浦源的组合,具体过程为:NALM 中泵浦源为 1 550 nm 半导体激光器(Laser Diode, LD)(最大功率 1 W),通过 1 550/2 000 波分复用器(Wavelength Division Multiplexer, WDM)将泵浦光耦合进激光腔内,经过长 ~ 2.5 m 单包层铥铒共掺光纤(Coractive, TH512)的增益介质(其在 1 550 nm 处纤芯吸收率为 ~ 13.3 dB/m)时泵浦光被其所吸收。一捆 40 m 长的普通单模光纤被用来在 NALM 中顺时针(Clockwise, CW)和逆时针(Counter Clockwise, CCW)传输的光之间产生不对称的增益和足够多的非线性相移差,从而实现稳定锁模。与此同时,一个偏振无关隔离器(Polarization Independent Isolator, PI-ISO)放置在 UR 中保持光的单向传输,以此提供光反馈,而在

NALM 和 UR 中分别插入一个三环偏振控制器(Polarization Controller, PC)主要用于控制腔内偏振态.由于脉冲中间部分的强度比两边都要高,因此在传输过程中脉冲不同部分所获得的相位延迟不相同,相对两沿,CW 光脉冲和 CCW 光脉冲的中心部分透过率最大,因而在脉冲中心能获得相对高的增益,脉冲宽度逐渐变窄,最终实现稳定锁模.此外,通过一个分光比为 10 : 90 的 1×2 光耦合器的 10% 端口作为输出端外接光谱仪(北京卓立汉光定制)、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,而 90% 端口与中央耦合器熔接,形成环形腔结构,整个激光谐振腔的长度为~49 m.

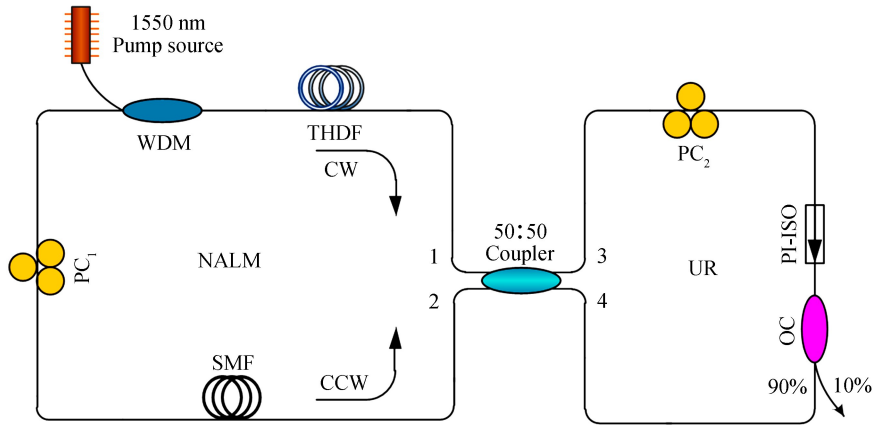


图1 实验装置

Fig.1 Experimental setup

2 实验结果与分析

2.1 单个孤子锁模脉冲现象

实验过程中,当泵浦功率达到 620 mW 时,通过调节两个 PC 的环臂角度给谐振腔施加一定扰动,在示波器上可以观察到单个孤子脉冲逐渐形成并且稳定传输.利用光电探测器配合示波器可以探测到稳定齐整的脉冲时间序列,所得结果如图 2.其中,输出脉冲重复频率一直稳定在 4.15 MHz 附近,与光在腔内往返一周的运行时间一致,表明输出脉冲是锁模作用的结果.图 3 为分辨率为 0.05 nm 的光谱分析仪测得的激光器单个孤子运行时的输出光谱图.从图中可以看出,激光输出中心波长为 1 923.21 nm,谱宽为 1.03 nm.由于实验中所用光纤在 2 μm 波段群速度色散均为负值,激光在实验谐振腔中运行呈现全反常色散的特性,光纤中的色散与非线性效应的平衡支持光孤子的产生,表现在光谱图上应该会有明显的 Kelly 边带,然而从图 3 中并没有观察到明显的 Kelly 边带,这种情况可以解释为 UR 环的滤波效应^[27-28]对光谱的整形.此外,限于实验条件,无法对输出脉冲的脉冲宽度进行自相关图谱的测试,但根据以上数据,假定获得的激光脉冲形状是

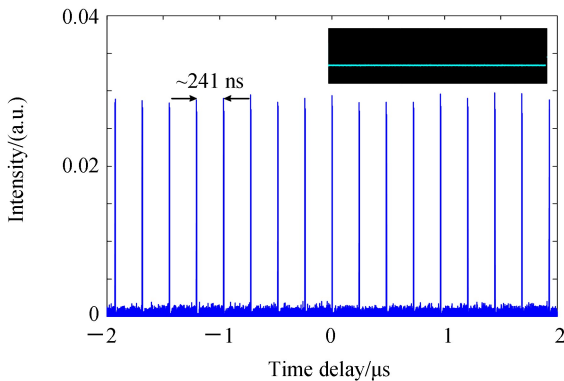


图2 单个孤子脉冲状态下的脉冲序列图(插图为示波器截图)

Fig.2 Output pulsetraces of the single-soliton pulse (Inset is the corresponding oscilloscope screen-shots)

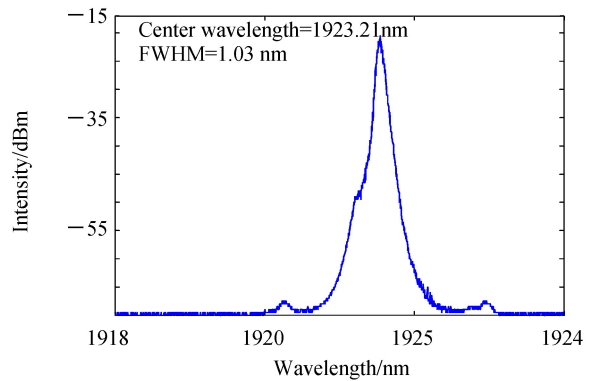


图3 单孤子脉冲时的输出光谱图

Fig.3 Output spectrum of the single-soliton pulse

理想高斯型,由时间带宽积(Time-Bandwidth Product, TBP)计算公式^[29]可反推其极限脉宽 $\Delta\tau$,即

$$\Delta\nu\Delta\tau = \frac{\Delta\lambda\Delta\tau}{\lambda^2}c \quad (1)$$

式中, $\Delta\lambda = 1.03$ nm, $\lambda = 1\,923.21$ nm, $c = 2.997\,9 \times 10^8$ m/s. 计算得 $\Delta\tau$ 约为 3.87 ps.

为验证激光器单个孤子脉冲的稳定性,实验中通过频谱分析仪对激光器重复频率在 4.15 MHz 时的输出射频频谱进行了测量,具体结果如图 4. 从图中可以看到,输出锁模脉冲的信噪比约为 50 dB,并且插图中 0~100 MHz 范围内频谱序列表现极为平坦,由此表明激光器运行在一个低噪声的环境中,得到的单个孤子脉冲状态非常稳定.

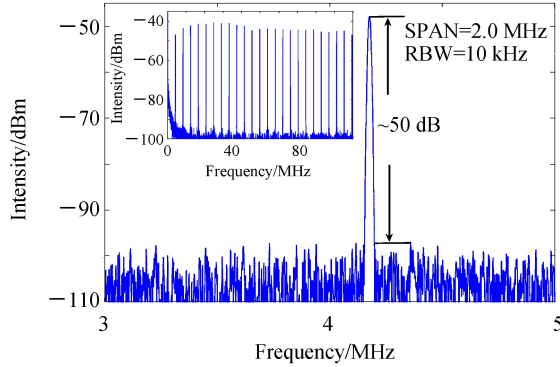


图 4 单个孤子脉冲状态下的频谱图(插图为 100 MHz 范围内的频谱图)

Fig.4 RF spectrum of the single-soliton pulse (Inset is 100 MHz range spectrum diagram)

2.2 多孤子锁模脉冲现象

保持泵浦功率不变,继续小角度调节 PC,获得了多孤子锁模脉冲现象,如图 5. 与单个孤子脉冲不同,多孤子锁模会出现两个及以上的脉冲序列,但周期不变.此外,为进一步对比多孤子锁模与单个孤子脉冲锁模的区别,对双孤子脉冲与单个孤子脉冲的频谱特性进行了对比分析,所得结果如图 6. 可见虽然双孤子的频谱间隔与单个孤子脉冲一致,但强度和一致性方面差异较大,说明其处于一个亚稳定状态.此外,由于三孤子脉冲及以上多孤子锁模脉冲的频谱特性更为复杂,为简便起见,这里不做讨论.

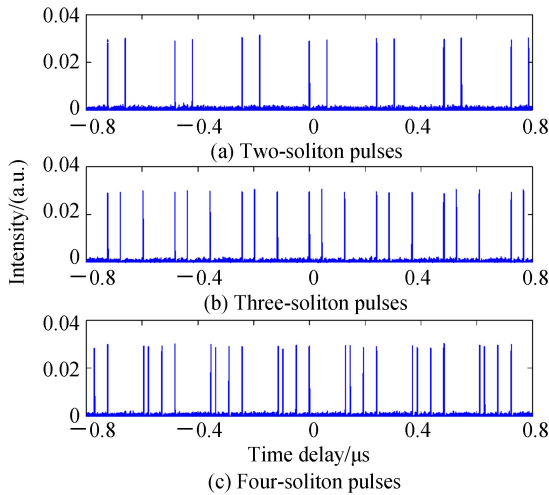


图 5 多孤子脉冲序列

Fig.5 Multi-soliton pulse sequences

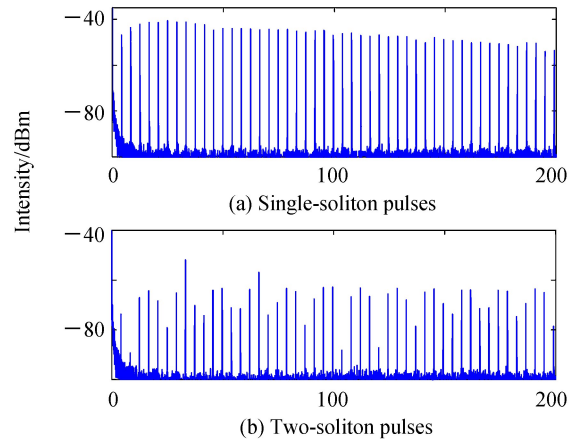


图 6 单个孤子脉冲和双孤子脉冲的频谱对比

Fig.6 RF spectrum of the single-soliton pulse and two-soliton pulses

继续增加泵浦功率到 720 mW 时,之前稳定的锁模状态被打破,通过调节两个 PC 同样能得到多孤子锁模脉冲的输出.不同之处在于,此时不管如何调节 PC 都很难得到之前规律变化的多孤子锁模脉冲,更多的是呈现占满整个时域的混沌多孤子脉冲状态,对此可以解释为:腔内能量增加,加大了谐振腔的环境敏感性,导致多孤子锁模脉冲处于一个动态切换的状态.此外,调节 PC,在一个适当的腔内偏振态下,一个有趣的孤子动力状态“孤子雨”被观察到,类似的现象在短波段早有报道^[24-25],所得结果如图 7. 根据以往的报道^[24-25],孤子雨的组成主要分为噪声背景(Noise background)、凝聚相(Condensed phase)和流动脉冲(Drifting pulses)三

部分.其中,凝聚相看似是一个不规则的脉冲,但它实际上是由很多孤子紧密地束缚在一起形成的包络,其宽度取决于孤子的数量.除此之外,从图中还可以清晰地观察到孤子雨的流动方向:两个凝聚相之间的间隔为激光在谐振腔内传输一圈的周期 ~ 241 ns,众多的孤子脉冲从噪声背景的右侧出现,然后以相同的速度向左流动,逐渐靠近凝聚相,最终与凝聚相发生碰撞,这种孤子的出现、流动、碰撞和循环过程可以在短时间内(30~60 min)保持着一个相对稳定的状态运行.与此同时,在相同的偏振状态下小幅度地增加泵浦功率(720~760 mW)时,可以明显看到,流动的孤子数量也随着泵浦功率的增加而增加,流动速度也得到加快.继续增加泵浦功率(760 mW~1W),除了之前观察到的孤子数量和速度增加外,流动脉冲强度也得到极大提高,而凝聚相脉冲强度略有下降,最终两者达到一样高度,具体结果如图 8.这是由于孤子能量量化效应^[26]所致:由于调制的不稳定性,线性波会被调制形成背景脉冲,在可饱和吸收效应下,背景脉冲被放大并形成新的孤子,因为增益竞争的存在,强的孤子脉冲会变弱,而弱的孤子脉冲会变强,最终达到平衡状态,拥有同样的峰值功率.

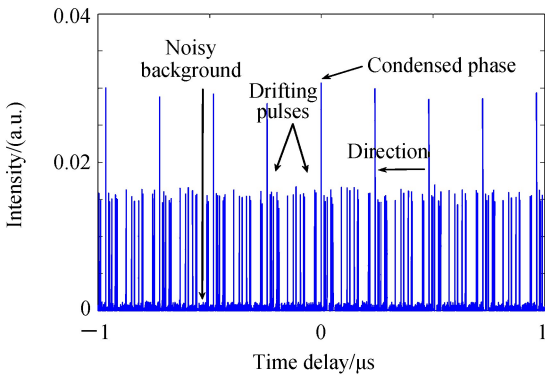


图 7 孤子雨脉冲轨迹
Fig.7 Soliton rain pulse traces

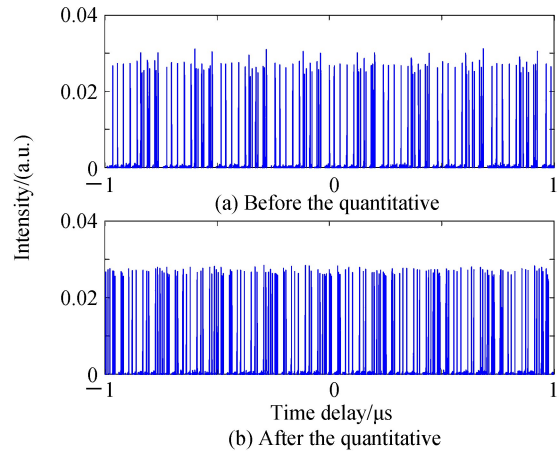


图 8 混沌多孤子脉冲轨迹的量化过程
Fig.8 Quantization process of chaotic multi-soliton pulse traces

从整个实验过程来看,多孤子锁模脉冲的产生非常依赖于 PC 的调节,不同调节角度下得到的多孤子锁模脉冲状态也存在较大差异.对此可以解释为:在 NALM 的锁模特性、腔内光纤色散以及非线性效应共同作用下,腔内光纤弱的双折射相当于一个双折射滤波器,其中心透射率波长间隔可以表示为^[30]

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / (LB) \quad (2)$$

式中, λ 是激光的中心波长, L 为激光器的腔长, B 为腔内双折射量.调节 PC 改变双折射量,相当于改变激光的增益带宽^[31].与此同时,由于孤子能量与激光器的腔体结构相关,在固定的结构下,其孤子所能包含的最大能量也就确定了,并不会随着泵浦能量的增加而增加.因此,将 PC 调节到某一位置,腔内损耗降低或增加,等效于增加或减少抽运功率,增加或减小腔内增益,表现在示波器上的现象即为 2 到 4 个孤子甚至其他多孤子形式的锁模脉冲.

2.3 激光器功率输出特性分析

为了衡量激光器的整体特性,对整个激光器工作范围内的平均输出功率进行了分析,所得结果如图 9.从图中可以看出,泵浦功率从 500 mW 至 1 000 mW 变化时,输出平均功率基本呈线性增加趋势,但实验中获得的斜效率不是太理想,只有 0.7%,低效率的主要原因为 2 μ m 波段激光在普通单模光纤中存在较大的传输损耗.在今后的工作中,将进一步对谐振腔参数(特别是光纤种类)进行优化,例如使用 2 μ m 波段低损耗传输的 SM1950 光纤,期望使该型激光器的斜效率得到显著提高.

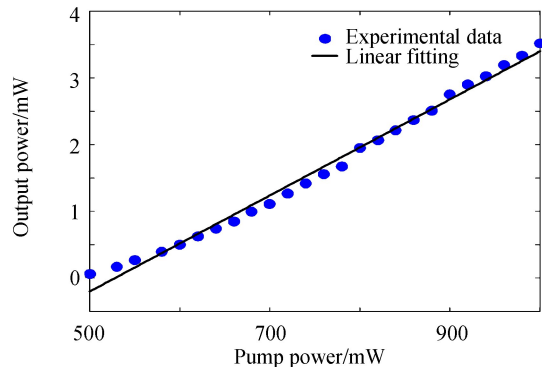


图 9 平均输出功率随泵浦功率的变化曲线
Fig.9 Average output power with the increase of pump power

3 结论

实验研究了利用非线性放大环境作为人工 SA 的铥钕共掺光纤激光器中多孤子锁模脉冲现象.在泵浦功率(620 mW)一定的条件下,通过调节 PC 的角度分别获得了单个孤子脉冲及其演化得到的 2 到 4 个孤子脉冲输出;继续增加泵浦功率(720 mW)并仔细调节 PC,获得了短时间稳定的孤子雨运行状态;保持如上偏振状态并增加泵浦功率(720 mW ~ 1 W),还观察到了孤子能量量化的演化过程,而这些多孤子锁模脉冲的产生和演化主要原因归为 PC 角度变化和泵浦功率的增加对腔内增益的改变,最终导致多孤子锁模脉冲的出现.研究结果有助于 2 μm 波段非线性放大环境锁模光纤激光器产生多孤子锁模脉冲动力学行为的研究.

参考文献

- [1] LIU Peng, WANG Tian-shu, ZHANG Peng, *et al.* Multi-wavelength Thulium-doped mode-locking fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(6): 06140003.
刘鹏, 王天枢, 张鹏, 等. 基于非线性偏振旋转效应的多波长掺铥锁模光纤激光器[J]. 光子学报, 2016, **45**(6): 06140003.
- [2] XIA Lin-zhong, DU Ge-guo, RUAN Shuang-chen, *et al.* Cladding pumped high power thulium doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1089-1092.
夏林中, 杜戈果, 阮双琛, 等. 包层泵浦的高功率掺铥光纤激光器[J]. 光子学报, 2008, **37**(6): 1089-1092.
- [3] MAJEWSKI M R, JACKSON S D. Highly efficient mid-infrared dysprosium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(10): 2173-2176.
- [4] YANG Nan, TANG Yu-long, XU Jiang-qiu. High-energy harmonic mode-locked 2 μm dissipative soliton fiber lasers[J]. *Laser Physics Letters*, 2015, **12**(8): 085102.
- [5] WANG Yu, ALAM S, OBRAZTSOVA E, *et al.* Generation of stretched pulses and dissipative solitons at 2 μm from an all-fiber mode-locked laser using carbon nanotube saturable absorbers[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(16): 3864.
- [6] YAN Zhi-yu, LI Xiao-hui, TANG Yu-long, *et al.* Tunable and switchable dual-wavelength Tm-doped mode-locked fiber laser by nonlinear polarization evolution[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(4): 4369.
- [7] RUDY C W, URBANEK K E, DIGONNET M J F, *et al.* Amplified 2 μm Thulium-doped all-fiber mode-locked figure-eight laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(11): 1809-1812.
- [8] DORAN N J, WOOD. Nonlinear-optical loop mirror[J]. *Optics Letters*, 1988, **13**(1): 56.
- [9] FERMAN M E, HABERL F, HOFER M, *et al.* Nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Optics Letters*, 1990, **15**(13): 752-754.
- [10] NING Qiu-yi, LIU Hao, ZHENG Xu-wu, *et al.* Vector nature of multi-soliton patterns in a passively mode-locked figure-eight fiber laser[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(10): 11900.
- [11] CUI Yu-dong. Carbon-nanotube-based passively mode-locked fiber lasers modulated with sub-loop[J]. *International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, **126**(6): 618-621.
- [12] NIANG A, AMRANI F, SALHI M, *et al.* Rains of solitons in a figure-of-eight passively mode-locked fiber laser[J]. *Applied Physics B*, 2014, **116**(3): 771-775.
- [13] NICHOLSON J W, ANDREJCO M. A polarization maintaining, dispersion managed, femtosecond figure-eight fiber laser[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(18): 8160.
- [14] LIU Shuo, YAN Feng-ping, FENG Ting, *et al.* Switchable and spacing-tunable dual-wavelength thulium-doped silica fiber laser based on a nonlinear amplifier loop mirror[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(24): 5522.
- [15] LIU Yang, LI Wen-xue, SHEN Xu-ling, *et al.* Square nanosecond mode-locked laser based on nonlinear amplifying loop mirror[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(19): 1932-1935.
- [16] WEI Kai-hua, CHEN Tao, JIANG Pei-pei, *et al.* Fiber laser pumped high power mid-infrared laser with picosecond pulse bunch output[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(21): 25364.
- [17] WANG Tian-shu, WEI Yi-zhen, HU Kai, *et al.* All-fiber laser generating at 3.8 μm pumped by 1565 nm fiber laser and the second-order laser at 1.9 μm [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, **56**(4): 848-850.
- [18] XING Ying-bin, YE Bao-yuan, JIANG Zuo-wen, *et al.* Development of high efficiency Tm³⁺-doped fiber and Tm³⁺-doped fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(1): 014209.
邢颖滨, 叶宝圆, 蒋作文, 等. 高效率掺 Tm³⁺ 双包层光纤及光纤激光器的研制[J]. 物理学报, 2014, **63**(1): 014209.
- [19] LI Jian-feng, ZHANG Zu-xing, SUN Zhong-yuan, *et al.* All-fiber passively mode-locked Tm-doped NOLM-based oscillator operating at 2- μm in both soliton and noisy-pulse regimes[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(7): 7875.
- [20] XU Yi, SONG Yu-li, DU Ge-guo, *et al.* Soliton dynamic patterns of a passively mode-locked fiber laser operating in a 2 μm region[J]. *Laser Physics Letters*, 2015, **12**(4): 045108.
- [21] XU Yi, SONG Yu-li, DU Ge-guo, *et al.* Dissipative soliton resonance in a wavelength-tunable Thulium-doped fiber laser with net-normal dispersion[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(3): 1-7.

- [22] JIN Xiao-xi, WANG Xiong, WANG Xiao-lin, *et al.* Tunable multi-wavelength mode-locked Tm/Ho-doped fiber laser based on a nonlinear amplified loop mirror[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(28): 8260-8264.
- [23] WEI Huai, LI Bin, WEI Shi, *et al.* General description and understanding of the nonlinear dynamics of mode-locked fiber lasers[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):1292.
- [24] CHOULI S, GRELU P. Soliton rains in a fiber laser; an experimental study[J].*Physical Review A*, 2010, **81**(6): 063829.
- [25] CHOULI S, GRELU P. Rains of solitons in a fiber laser[J].*Optics Express*, 2009, **17**(14): 11776-11781.
- [26] TANG Ding-yuan, ZHAO Lu-ming, ZHAO B, *et al.* Mechanism of multisoliton formation and soliton energy quantization in passively mode-locked fiber laser[J]. *Physical Review A*, 2005, **72**(4): 043816.
- [27] HEEBNER J E, WONG V, SCHWEINSBEG, *et al.* Optical transmission characteristics of fiber ring resonators[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, **40**(6): 726-730.
- [28] HAYE P D, SCHLIESSER A, ARCIZET O, *et al.* Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator[J]. *Nature*, 2007, **450**(7173): 1214-1217.
- [29] ZHAO Jun-qing, WANG Yun-hai, YAN Pei-guang, *et al.* An L-band graphene-oxide mode-locked fiber laser delivering bright and dark pulses[J]. *Laser Physics*, 2013, **23**(7): 075105.
- [30] ZANG H, TANG Ding-yuan, WU X, *et al.* Multi-wavelength dissipative soliton operation of an erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(15): 12692-12697.
- [31] ZHANG Han, TANG Ding-yuan, KNIZE R J, *et al.* Graphene mode-locked, wavelength-tunable, dissipative soliton fiber laser[J]. *Applied Physics Letter*, 2010, **96**(11): 111112.