

掺铒光纤激光器中增益支配光孤子的被动谐波锁模

赵鹭明, 唐定远, 郑世强, 谭华耀, 吕超

School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore;

香港理工大学电机工程学系, 香港;

香港理工大学电子及资讯工程学系, 香港

E-mail: lmzhao@ntu.edu.sg

2007-09-04 收稿, 2007-12-25 接受

摘要 报道了在全正色散掺铒光纤激光器和工作在正色散区的掺铒光纤激光器中产生的增益支配光孤子的被动谐波锁模实验观测结果, 产生的增益支配光孤子具有陡峭的光谱边缘, 实现了超模抑制大于 35 dB 的增益支配光孤子的被动谐波锁模。

关键词

增益支配光孤子

被动谐波锁模

正常色散

掺铒光纤激光器

谐波锁模是被动锁模光纤激光器的一种工作模式, 已经得到了广泛地研究^[1~11]。通过谐波锁模, 激光器的脉冲重复频率可以得到极大的提高。基于谐波锁模的高重复率激光器已被建议用于光通讯和精确光采样领域。被动锁模已经在各种类型的光纤激光器中被观察到, 如 8 字形光纤激光器^[11]、使用饱和吸收体锁模的光纤激光器^[6,7]和使用非线性偏振旋转技术锁模的光纤激光器^[3,8~11]等。当光纤激光器工作在反常色散区时, 一旦实现锁模, 作用在锁模脉冲上的反常色散效应和光纤非线性克尔效应的自发平衡会对锁模脉冲进行自发的光孤子整形。激光器的光孤子整形效应不但可以有效地压缩锁模脉冲的宽度, 而且可以增强锁模脉冲的稳定性。光纤激光器的光孤子整形效应的另一个产物是多光孤子脉冲的形成。在一定条件下, 这些光孤子可以自发移动并最终形成稳定的谐波锁模状态。

除了在工作于反常色散区的光纤激光器中观测到被动谐波锁模外^[1~9], Deng和Knox^[10]及Abedin等人^[11]还对工作在弱正常色散区的色散管理光纤激光器中形成的被动谐波锁模进行了研究。在这类光纤激光器中可以产生色散管理光孤子。事实上, 光孤子脉冲也可以在由全部正常色散光纤组成的光纤激光器^[12]或工作在正色散区的色散管理光纤激光器^[13]中形成。由于在这两类激光器中形成的光孤子是激光器增益色散、增益饱和与正色散效应共同作用的结果, 所形成的光孤子又被

称为增益支配光孤子^[14]。在光纤激光器中产生的增益支配光孤子可以由Ginzburg-Landau方程描述。此非线性方程也可用于描述工作在负色散区的光纤激光器中产生的光孤子。在光纤激光器中也可以形成多增益支配光孤子。但是到目前为止, 多增益支配光孤子的谐波锁模还没有被报道过。本文将展示实验观测结果, 与工作于反常色散区的光纤激光器中形成的传统光孤子一样, 激光器中形成的多增益支配光孤子也可以产生谐波锁模。实验观测结果表明, 谐波锁模的形成是所有光孤子光纤激光器的普遍特性。

1 实验装置与结果

我们在两类具有不同腔设计方案的被动锁模光纤激光器中都观测到增益支配光孤子的谐波锁模: () 全部由正常色散光纤组成的光纤激光器, 激光器具体参数见参考文献[15]; () 色散管理光纤激光器, 激光器腔由三种光纤组成: 具有正常色散且色散系数为 -50 (ps/nm)/km, 长度为 1.72 m 的掺铒光纤(OFS-EDF150); 色散系数为 18 (ps/nm)/km 的标准单模光纤; 色散系数为 -0.196 (ps/nm)/km 的色散补偿光纤。第二类光纤激光器结构如图 1 所示, 10% 的输出耦合器是由色散补偿光纤制备的。掺铒光纤在 1530 nm 波长的峰值吸收为 150 dB/m。两种激光器都采用非线性偏振旋转技术实现自发锁模。为此在激光器中使用了一个偏

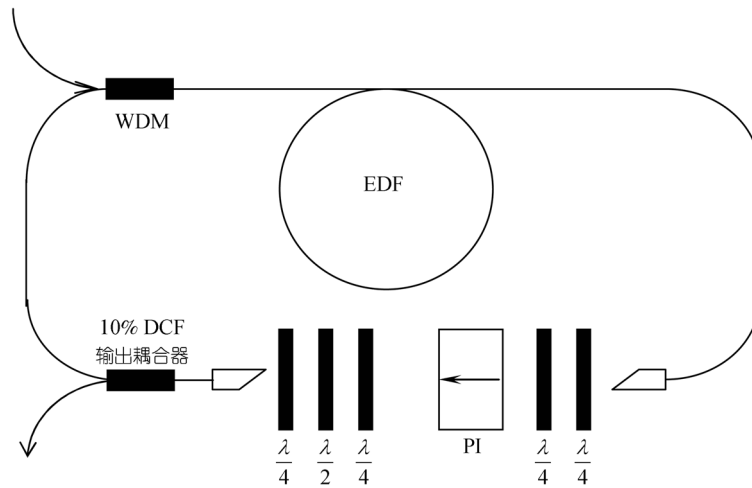


图1 第二类光纤激光器结构简图

WDM, 波分复用耦合器; EDF, 掺铒光纤; PI, 偏振相关隔离器; DCF, 色散补偿光纤; $\lambda/4$, $1/4$ 波片; $\lambda/2$, $1/2$ 波片

振相关隔离器和两个偏振控制器以实现激光器的单向操作和对腔内光束的偏振调节。其中一个偏振控制器由两个 $1/4$ 波片组成, 另一偏振控制器由两个 $1/4$ 波片和一个 $1/2$ 波片组成。

实验中我们首先通过适当调节波片的方向来产生自发锁模。因为激光器的色散处于强正色散区, 所以形成的锁模脉冲总是被整形为增益支配光孤子。与工作于反常色散区的光纤激光器中形成的传统光孤子一样, 在强抽运及合适的波片指向条件下, 激光器中可以形成多增益支配光孤子。增益支配光孤子在激光器腔内的间距不是固定的。通过改变激光器的工作条件, 如抽运强度, 波片指向等, 可以改变增益支配光孤子的间距。实验中经常可以观测到增益支配光孤子的谐波锁模。图2给出了在第一类光纤激光器中观测到的典型的二阶谐波锁模状态, 此光纤激光器的总色散约为 0.122 ps^2 。图2(a)中显示的是激光器输出的脉冲光谱, 可以看到增益支配光孤子的典型特征。图2(b)显示的是对应的自相关曲线。假定脉冲具有高斯形轮廓, 则形成的增益支配光孤子的脉冲宽度是 10.9 ps 。图2(c)显示的是示波器测量结果。两个增益支配光孤子的间距恰好为腔长的一半, 形成所谓的二阶谐波锁模状态。因此, 激光器输出的脉冲重复频率为 68.50 MHz , 二倍于激光器的基本重复频率 34.25 MHz 。图2(d)显示的是输出脉冲序列的电频谱(RF 频谱), 可以看到腔的基本重复频率被抑制至少 35 dB 。

图3所示为在第二类光纤激光器中产生的3阶谐波锁模状态。激光器的总色散约为 0.050 ps^2 。由于腔内色散管理的影响, 激光器中形成的增益支配光孤子

的光谱只在长波方向有陡峭的光谱边缘, 短波方向的光谱边缘类似于“伸展脉冲(stretched-pulses)”^[10,11]。假定脉冲具有高斯形轮廓, 则形成的增益支配光孤子的脉冲宽度是 2.11 ps , 该光纤激光器的腔循环时间是 24.6 ns 。图3(d)显示的RF频谱进一步确认了3阶谐波锁模的形成, 超模抑制比同样大于 35 dB 。

实验观测到的谐波锁模状态都是稳定的, 在没有外加扰动的情况下谐波锁模状态可以持续几个小时。但是, 实验中我们只能观测到低阶的谐波锁模, 这是由于在现有实验抽运条件下, 激光器中只能产生少量增益支配光孤子。第一类光纤激光器中形成的增益支配光孤子的脉冲能量约为 0.54 nJ 。

详细的实验研究也发现在两类激光器中谐波锁模的产生过程是不一样的。对于第一类光纤激光器来说, 首先形成的是大能量的“类噪音(noise-like)”脉冲。调节波片的指向, 形成的大能量“类噪音”脉冲分裂为两个“类噪音”脉冲并由一个弱的背底联结。然后这两个“类噪音”脉冲以大约 1 min 的演变过程缓慢形变为增益支配光孤子并同时自发调整它们在腔内的间距, 直到2阶谐波锁模状态形成。对于第二类光纤激光器来说, 谐波锁模状态是在调节波片指向时从原有的双或三增益支配光孤子态突然跳变形成的。没有观测到缓慢的光孤子形变过程和间距变化过程。

2 讨论

很多研究小组已经探究过光纤激光器中谐波锁模的形成机理^[2-5,11]。Grudin等人^[2,3]把谐波锁模的自发稳定归结于由横向声波激发导致的光孤子脉冲之间的长距离相互作用。Pilipetskii等人^[4]研究表明, 光纤激光

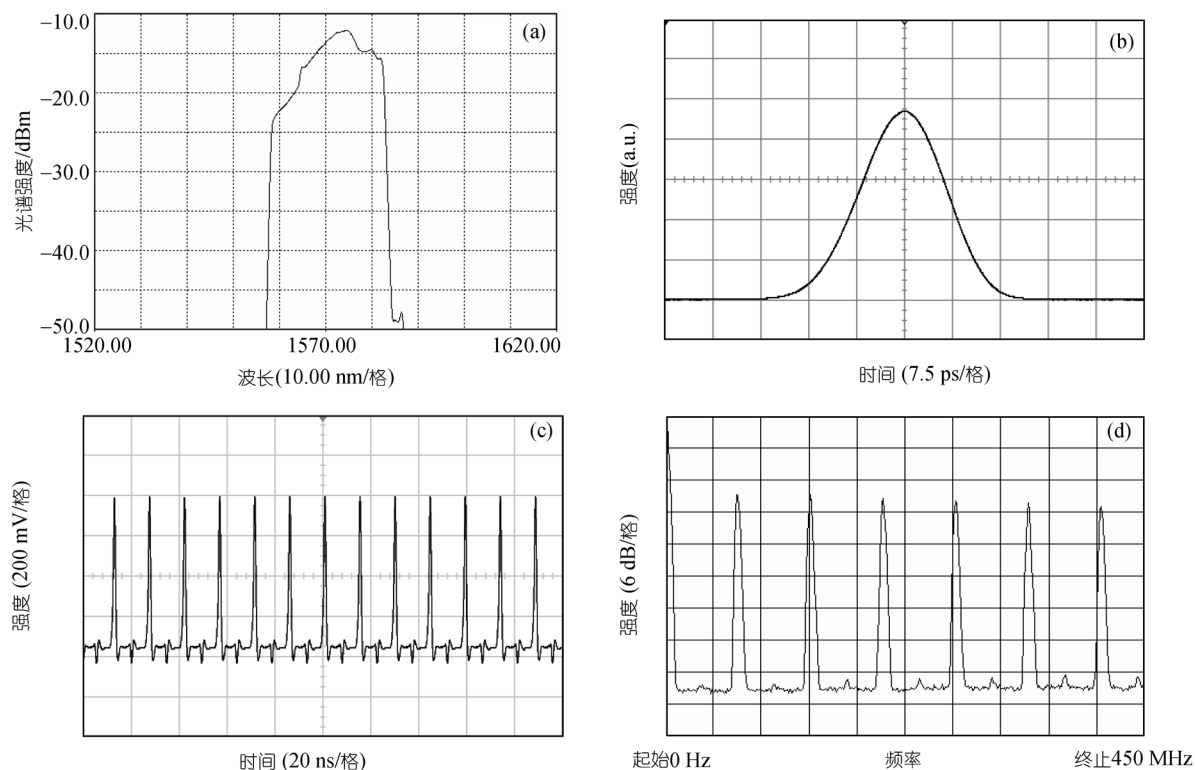


图2 第一类光纤激光器中观测到的增益支配光孤子的2阶谐波锁模

(a) 光谱; (b) 自相关曲线; (c) 示波器结果; (d) RF 频谱

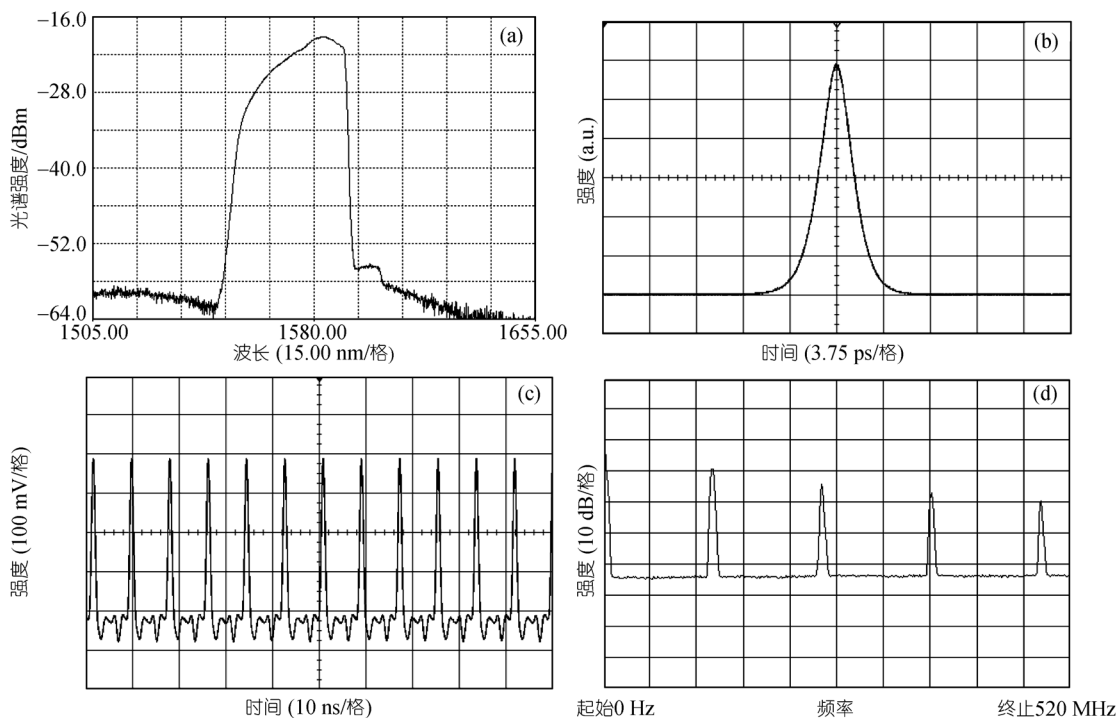


图3 第二类光纤激光器中观测到的增益支配光孤子的3阶谐波锁模

(a) 光谱; (b) 自相关曲线; (c) 示波器结果; (d) RF 频谱

器中的光纤声学效应和由声学效应导致的长距离光孤子相互作用可能束缚脉冲形成脉冲堆,也可能产生等间距的脉冲序列. Kutz等人^[15]研究了被动锁模光孤子激光器中脉冲之间的增益损耗和恢复的动力学过程,并得出结论——该动力学过程可以为相邻的光孤子提供有效的排斥力. 第一类光纤激光器的实验观测结果表明,在激光器中确实存在一种与光孤子形变相关联的长距离光孤子相互作用,这种相互作用可以导致谐波锁模. 对实验中的光纤激光器来说,改变波片的指向,实际上改变了腔内的线性相位延迟偏置和腔内的增益-损耗关系^[16]. 因为腔内的线性相位延迟偏置和腔内的增益-损耗关系又与腔致脉冲峰值功率限制效应和脉冲光谱限制有关,所以调节波片可以导致强“类噪音”脉冲的分裂. 已分裂的“类噪音”脉冲具有较低的峰值功率,而且不再受腔致脉冲峰值功率限制效应的影响. 因此,已分裂的“类噪音”脉冲被整形为增益支配光孤子. 在形变过程中耗散波同时产生,这导致了腔内长距离的光孤子相互作用. 对于第二类光纤激光器来说,由于腔内负色散光纤的存在,当增益支配光孤子在这段光纤中传播时会被压缩,这导致了局部的高峰值功率脉冲和强的有效腔内非线性. 而且在反常色散单模光纤

中传播的线性波和非线性波具有较大的群速度差异. 因此,在第二类光纤激光器中产生谐波锁模的过程与在其他色散管理光纤激光器中观测到的结果没有明显的不同.

我们注意到增益支配光孤子的谐波锁模的形成强烈依赖于激光器的操作条件,例如抽运强度,波片的指向等. 但是,一旦我们在谐波锁模状态形成后标记出波片的指向,则谐波锁模的自发产生是可以复现的,这表明谐波锁模是光孤子光纤激光器在特定条件下的一种本征特性.

3 结论

总之,我们已在被动锁模的全正色散掺铒光纤激光器和工作在正色散区的掺铒光纤激光器中实验观测到增益支配光孤子的被动谐波锁模. 尽管增益支配光孤子是非线性啁啾脉冲,而且形成的机理与负色散光纤激光器中产生的传统光孤子完全不同,增益支配光孤子的谐波锁模状态与在传统光孤子光纤激光器中观测到的并没有明显不同,这表明激光器中谐波锁模的形成不依赖于所形成的光孤子的具体特性.

参考文献

- Richardson D J, Laming R I, Payne D N, et al. Pulse repetition rates in passive, selfstarting, femtosecond soliton fibre laser. *Electron Lett*, 1991, 27: 1451—1452 [\[DOI\]](#)
- Grudinin A B, Richardson D J, Payne D N. Passive harmonic mode-locking of a fibre soliton ring laser. *Electron Lett*, 1993, 29: 1860—1861 [\[DOI\]](#)
- Grudinin A B, Gray S. Passively harmonic mode locking in soliton fiber lasers. *J Opt Soc Am B*, 1997, 14: 144—154 [\[DOI\]](#)
- Pilipetskii A N, Golovchenko E A, Menyuk C R. Acoustic effect in passively mode-locked fiber ring lasers. *Opt Lett*, 1995, 20: 907—909
- Kutz J N, Collings B C, Bergman K, et al. Stabilized pulse spacing in soliton lasers due to gain depletion and recovery. *IEEE J Quant Electron*, 1998, 34: 1749—1757 [\[DOI\]](#)
- Deng Y, Koch M W, Lu F, et al. Colliding-pulse passive harmonic mode-locking in a femtosecond Yb-doped fiber laser with a semiconductor saturable absorber. *Opt Express*, 2004, 12: 3872—3877 [\[DOI\]](#)
- Bonadeo N H, Knox W H, Roth J M, et al. Passive harmonic mode-locked soliton fiber laser stabilized by an optically pumped saturable Bragg reflector. *Opt Lett*, 2000, 25: 1421—1423 [\[DOI\]](#)
- Ortaç B, Hideur A, Brunel M. Passive harmonic mode locking with a high-power ytterbium-doped double-clad fiber laser. *Opt Lett*, 2004, 29: 1995—1997 [\[DOI\]](#)
- Zhou S, Ouzounov D G, Wise F W. Passive harmonic mode-locking of a soliton Yb fiber laser at repetition rates to 1.5 GHz. *Opt Lett*, 2006, 31: 1041—1043 [\[DOI\]](#)
- Deng Y J, Knox W H. Self-starting passive harmonic mode-locked femtosecond Yb³⁺-doped fiber laser at 1030 nm. *Opt Lett*, 2004, 29: 2121—2123 [\[DOI\]](#)
- Abedin K S, Gopinath J T, Jiang L A, et al. Self-stabilized passive, harmonically mode-locked stretched-pulse erbium fiber ring laser. *Opt Lett*, 2002, 27: 1758—1760 [\[DOI\]](#)
- Zhao L M, Tang D Y, Wu J. Gain-guided soliton in a positive group dispersion fiber laser. *Opt Lett*, 2006, 31: 1788—1790 [\[DOI\]](#)
- Zhao L M, Tang D Y, Cheng T H, et al. Gain-guided solitons in dispersion-managed fiber lasers with large net cavity dispersion. *Opt Lett*, 2006, 31: 2957—2959 [\[DOI\]](#)
- Bélanger P A, Gagnon L, Paré C. Solitary pulses in an amplified nonlinear dispersive medium. *Opt Lett*, 1989, 14: 943—945
- Zhao L M, Tang D Y, Cheng T H, et al. Generation of multiple gain-guided solitons in an all-normal-dispersion fiber laser. *Opt Lett*, 2007, 32: 1581—1583 [\[DOI\]](#)
- Tang D Y, Zhao B, Zhao L M, et al. Soliton interaction in a fiber ring laser. *Phys Rev E*, 2005, 72: 016616 [\[DOI\]](#)