

全正色散耗散孤子掺镱光纤激光器

张祖兴 戴国星

(江西师范大学物理与通信电子学院江西省光电子与通信重点实验室, 江西 南昌 330022)

摘要 研究了一种基于非线性偏振旋转被动锁模没有进行色散管理的全正色散掺镱光纤激光器, 在无外加滤波器情况下实验产生了锁模耗散孤子脉冲。耗散孤子的形成是激光器中正光纤色散、非线性效应、腔传输、增益饱和和滤波效应综合作用的结果。实验产生的锁模耗散孤子脉冲能量达 1.1 nJ。此外, 对激光器的数值模拟结果与实验结果相一致, 证实了全正色散掺镱光纤激光器在无外加滤波器的情况下也可以产生稳定锁模耗散孤子脉冲。

关键词 光纤光学; 锁模光纤激光器; 非线性偏振旋转; 掺镱光纤激光器

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0214005

All-Normal-Dispersion Dissipative Soliton Ytterbium-Doped Fiber Laser Without Additional Filter

Zhang Zuxing Dai Guoxing

(Key Laboratory of Photoelectron and Communications of Jiangxi Province, College of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330027, China)

Abstract The generation of mode-locked dissipative soliton pulse from an all-fiber ytterbium-doped laser based on nonlinear polarization rotation without dispersion compensation and additional filter has been demonstrated experimentally and numerically. The formation of the dissipative soliton pulse is a self-consistent result of various effects in the laser including positive fiber dispersion, nonlinearity, cavity transmission, gain saturation, and filtering over one cavity round trip. Stable mode-locked pulses with pulse energy of 1.1 nJ have been achieved. The operation of the dissipative soliton lasers is numerically simulated, which agrees with the experimental results.

Key words fiber optics; mode-locked fiber lasers; nonlinear polarization rotation; ytterbium-doped fiber laser

OCIS codes 060.2320; 140.3615; 140.4050

1 引言

作为低成本、高效可靠的超快光源, 被动锁模光纤激光器已经得到广泛和深入的研究。由于反常群速度色散和非线性自聚焦效应的平衡, 被动锁模光纤激光器可以产生稳定的孤子脉冲输出^[1~4]。然而, 受孤子面积定理和频谱边带限制孤子脉冲能量最大只可能到约 0.1 nJ 量级^[5,6]。在过去的十年中, 为了能够大幅度增加激光器锁模脉冲能量, 人们提出了一些新的被动锁模光纤激光器结构和方案。例如展宽脉冲锁模激光器, 其基本原理就是在激光谐振腔中引进正负色散两种光纤进行色散管理, 谐

振腔中的脉冲来回振荡的时候被周期性地展宽和压缩, 减少了一个周期内累计的非线性相移, 这样可以提高激光器输出的单脉冲能量和平均输出功率, 用这种方法可以产生纳焦量级能量的飞秒脉冲^[7,8]。最近, 为了从激光振荡器中获得更高的脉冲能量, 人们在积极研究净正常群速度色散锁模光纤激光器^[9,10]。由于脉冲在光纤放大过程中经历了一个自相似的演变过程, 该类激光器也被称为自相似脉冲光纤激光器。自相似过程使得脉冲累计的非线性相移非常大, 脉冲形成很强的线性啁啾, 相对于孤子激光器和展宽脉冲激光器, 这种激光器的输出脉冲能

收稿日期: 2010-07-12; 收到修改稿日期: 2010-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(60807014)资助课题。

作者简介: 张祖兴(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤激光器和全光信号处理等方面的研究。

E-mail: stellarzh@hotmail.com

量有了很大的提高,达到了几十纳焦^[11]。特别是近来,全部由正色散光纤组成的被动锁模掺铒光纤激光器首先在掺铒光纤激光器中实现,在这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^[12,13]。然而,由于掺铒光纤激光器比掺铒光纤激光器具有更大的增益带宽和较大的增益饱和功率,这就不容易受到增益带宽限制的影响。O. Prochnow 等^[14]报道的无色散补偿全正色散自相锁模掺铒光纤激光器,利用饱和布拉格反射器和非线性偏振锁模两种方法共同锁模。A. Chong 等^[15]报道的全正色散锁模掺铒光纤激光器,腔内有一双折射滤波器,其锁模脉冲产生得益于腔内滤波器对高啁啾脉冲的光谱滤波,在这个激光器中光谱滤波器在脉冲的形成过程中起到了不可或缺的关键作用。上述全正色散掺铒光纤激光器中,在激光腔内加入饱和布拉格反射器或者光谱滤波器都会破坏激光器的全光纤结构。另外,激光器中插入带通滤波器,对可产生脉冲的频谱带宽和脉冲宽度起限制作用,进一步限制了可得到的最大脉冲能量。

本文报道了一个没有进行色散管理的全正色散光纤基于非线性偏振旋转的被动锁模掺铒光纤激光器,在无外加滤波器的条件下得到了耗散锁模孤子脉冲。耗散孤子的形成是激光器中各种效应自洽的结果,由正常群速度色散和自相位调制导致脉冲时域和频域加宽,增益饱和和增益窄化滤波使脉冲时域和频域窄化,并达到平衡形成耗散孤子脉冲。此外,理论上对该激光器的数值模拟与实验结果一致,证实了全正色散掺铒光纤激光器在无外加滤波器的情况下也可以产生耗散孤子锁模脉冲。

2 实验结构

被动锁模掺铒光纤环形激光器如图 1 所示,是一个基于非线性偏振旋转实现被动锁模的典型设计。一段长度为 2 m、群速度色散系数是 $-60 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 的掺铒光纤(YDF),一个 980/1060 nm 波分复用耦合器(WDM)用来将 980 nm 抽运光耦合到掺铒光纤。一个偏振相关隔离器(PDI)和两个偏振控制器(PC)来实现激光器的单向运作和腔内激光光束的偏振调节。两个光纤耦合器用于激光输出,一个 30:70 耦合器(30%端口记为输出端口 1)位于 YDF 和偏振控制器(PC1)之间,为了研究腔内光孤子演变过程,故意插入了另一个 10:90 耦合器(10%端口记为输出端口 2)接到 PC2 之后。除了 2 m 长 YDF,激光

腔内其他光纤均为标准 1060 nm 单模光纤,单模光纤总长度为 3.6 m,单模光纤在 1060 nm 波长处群速度色散系数为 $-38 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,计算得腔内总色散为 0.157 ps^2 。

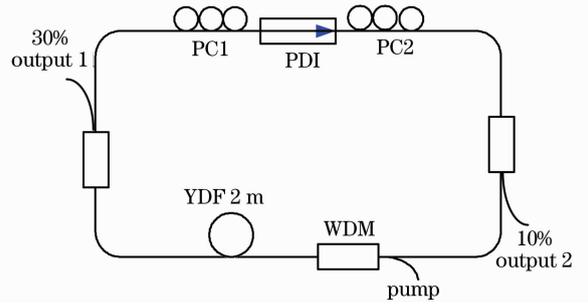


图 1 全正色散被动锁模掺铒光纤激光器的实验结构示意图

Fig. 1 Experimental setup of all-normal-dispersion passively mode-locked ytterbium-doped fiber laser

3 实验结果及分析

虽然激光腔没有色散管理和用滤波器来补偿激光器的正常光纤色散,调节偏振控制器,激光器仍可产生输出稳定的啁啾脉冲。图 2 所示是抽运功率为 226 mW 时,典型的全正色散被动锁模耗散孤子脉冲的输出特性。图 2(a)是在对数坐标下从两个不同端口输出脉冲的光谱,图 2(b)是从端口 1 输出脉冲在线性归一化坐标下的光谱。可以看到从两个端口的输出光谱都具有陡峭的光谱边沿,这是全正色散激光器的典型特性。边沿至带带宽是 14.2 nm。图 2(c)所示是对应的自相关曲线。假定脉冲具有高斯形轮廓,脉冲宽度是 10.6 ps,时间带宽积是 40.3。图 2(d)所示是激光输出射频频谱,边带抑制比大于 70 dB,从射频频谱可以得到锁模激光脉冲的重复频率是 34.3 MHz。从图 2(a),(c)可以看出,从输出端口 1 和端口 2 输出的脉冲光谱和形状差别很小。然而,从图 2(a)可以看出从两个端口输出的脉冲强度则发生了急剧变化,这两个输出端口一个在偏振相关隔离器前,一个在偏振相关隔离器后,可以推测偏振相关隔离器对啁啾脉冲具有压缩作用。

实验中,还研究了抽运功率和偏振对脉冲性能的影响,实验结果如图 3 和图 4 所示。从图 3(a)中可以发现脉冲光谱边沿至带宽度随抽运功率的减小而变窄,这表明增益饱和及增益窄化对脉冲的形成发挥了重要作用。锁模耗散孤子产生的阈值抽运功率是 137 mW。图 3(b)所示是不同抽运功率下的激光器输出脉冲平均功率。受使用的抽运激光器最

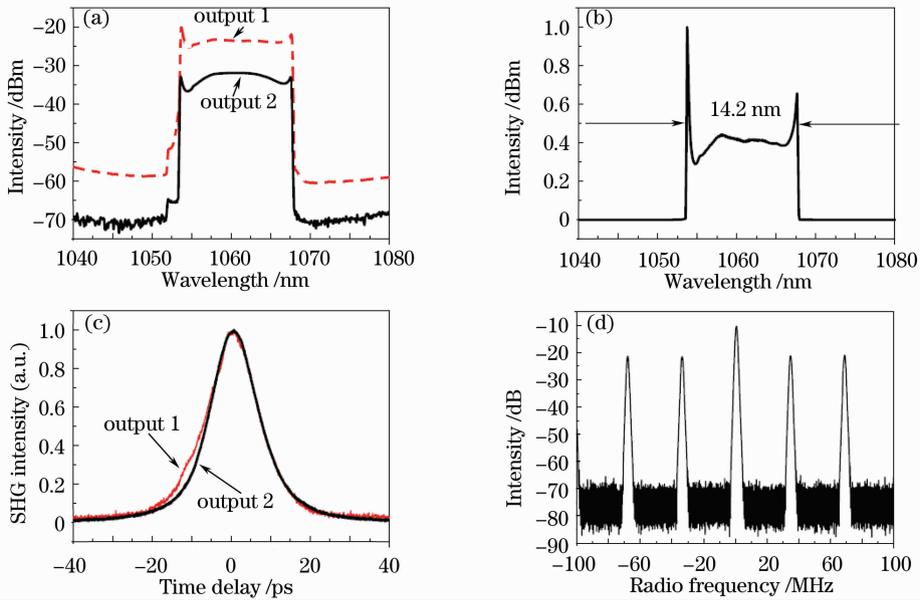


图 2 全正色散被动锁模掺镱光纤激光器的输出特性。(a) 从两个不同端口输出的光谱对比,(b) 归一化线性坐标下端口 1 的输出光谱,(c) 两个不同端口输出的自相关曲线,(d) 200 MHz 范围内射频谱

Fig. 2 Output characteristics of all-normal-dispersion mode-locked ytterbium fiber laser. (a) Optical spectra on a logarithmic scale from two different output ports, (b) normalized optical spectrum from output port 1 on a linear scale, (c) corresponding autocorrelation traces from two different outputs, (d) RF spectrum with 200 MHz range

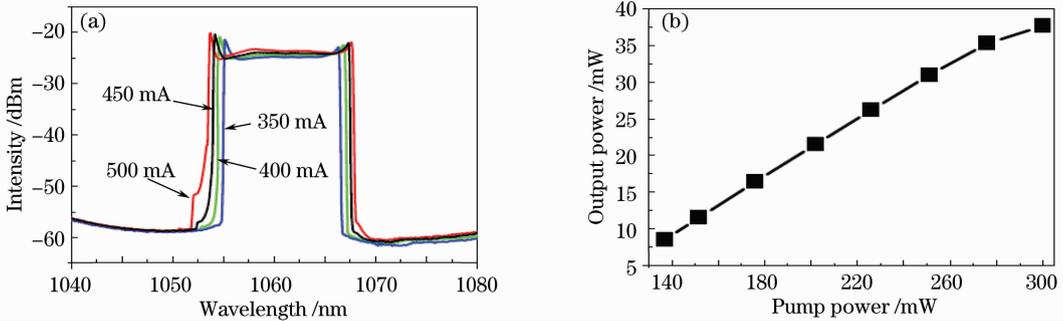


图 3 (a) 脉冲光谱随抽运功率减小的变化,(b) 不同抽运功率时的激光器输出功率

Fig. 3 (a) Optical spectrum evolution with the decreasing pump power, (b) laser output power against pump power

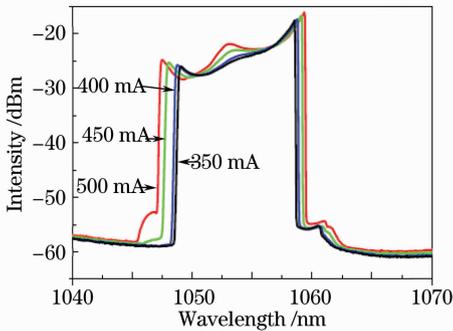


图 4 在另一个偏振态下耗散孤子脉冲光谱随抽运功率减小时的光谱变化

Fig. 4 Optical spectrum of dissipative solitons under another polarization state and its evolution with the decreasing pump power

大功率只有 300 mW 的限制,从输出端口 1 中获得的最大脉冲平均功率是 37.7 mW,相应的脉冲能量是 1.1 nJ。与图 3(a)明显不同,图 4 所示脉冲光谱包括光谱形状、中心波长和边沿至边沿带宽在偏振控制器调节后差异巨大。但是脉冲光谱仍然保留了全正色散激光器的一般特性,即陡峭的光谱边沿,这是偏振相关腔传输改变的结果。随后,保持其他器件不变,通过加长和缩短 YDF 前的单模光纤(SMF)长度来验证是否耗散锁模脉冲仍然可以产生。研究发现,如果单模光纤长度改变不大,耗散锁模脉冲仍然可以产生;如果单模光纤长度改变太大(大于 0.5 m)无论如何调节偏振控制器都无法获得耗散孤子脉冲。这可能是以前没能在无外加光谱滤波器的全正色散掺镱光纤激光器中观测到耗散孤子

脉冲的原因。因此,从腔内脉冲性能来看,增益和腔传输对耗散孤子脉冲形成的影响明显。激光腔内多种效应,包括正光纤色散、非线性、腔传输、增益饱和和滤波等自洽的结果导致耗散孤子致脉冲形成。另外需要指出的是,由于激光腔中有偏振器件—偏振相关隔离器及光纤固有双折射,它们组合会导致等效滤波,这对于全正色散光纤中锁模脉冲形成也有一定作用。

实验上调节偏振,从该激光器还可产生光谱边沿非陡峭的脉冲,从两个不同输出端口输出的光谱边沿非陡峭典型脉冲光谱如图 5 所示。另外,激光中单模光纤长度变长变短过大,无论如何调节偏振控制器都无法得到具有陡峭光谱边沿的耗散孤子脉冲,能得到的也只是类似于图 5 的光谱边沿非陡峭的脉冲。这类脉冲被称为噪声像脉冲,噪声像脉冲的特征是它的光谱非常宽,噪声像脉冲产生的机理

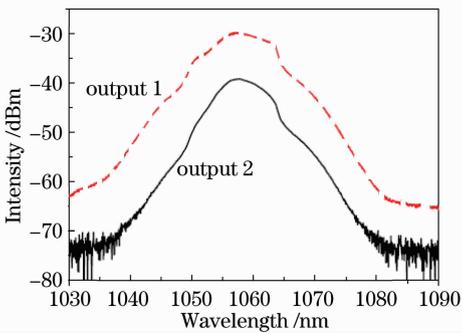


图 5 边沿非陡峭的脉冲光谱

Fig. 5 Output pulse spectra without steep edges

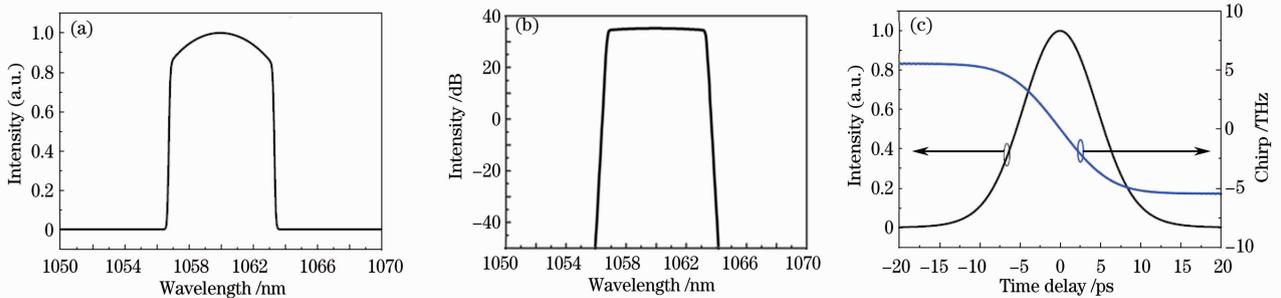


图 6 全正色散掺镱光纤激光器数值模拟结果

Fig. 6 Numerically simulated

4 结 论

本文对由全正群速度色散光纤组成的无外加滤波器的掺镱光纤环形激光器产生耗散孤子脉冲进行了实验研究和数值模拟。该光纤激光器利用非线性偏振旋转实现自启动锁模,在腔传输、正光纤色散、非线性效应、增益饱和和增益窄化的综合作用下致

认为是激光腔脉冲不断产生和崩溃的结果^[16]。

为了进一步了解无外加光谱滤波器的全正色散掺镱光纤激光器中耗散孤子脉冲的形成机制,基于 Ginzburg-Landau 方程^[17]用与实验相当的参数对激光器进行数值模拟:

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} + i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial t^2} =$$

$$i\gamma |A(z,t)|^2 A(z,t) + g(E_{\text{pulse}})A(z,t),$$

式中 $A(z,t)$ 为脉冲包络, β_2 为光纤的二阶色散, γ 为光纤的非线性系数。由于形成的脉冲宽度较大,式中忽略了三阶色散和高阶非线性效应。 $g(E_{\text{pulse}}) = g_0 / (1 + E_{\text{pulse}}/E_{\text{sat}})$ 为 YDF 净增益函数,假设 YDF 增益谱呈以 1060 nm 为中心的高斯分布,小信号增益参数 $g_0 = 3 \text{ m}^{-1}$,增益带宽 $\Omega_g = 45 \text{ nm}$,增益饱和能量 $E_{\text{sat}} = 1 \text{ nJ}$ 。数值模拟采用标准的分步傅里叶算法,初始背景为白噪声,经过有限次循环后输出脉冲幅度和宽度不再变化后即认为形成稳定的锁模。

图 6(a)是归一化线性坐标下的数值模拟输出脉冲光谱,图 6(b)是对数坐标下相应的光谱。因为输出脉冲光谱与激光腔偏振有关,模拟光谱图和实验图有一定差别,但实验和模拟的输出脉冲光谱都具有明显陡峭的光谱边沿。图 6(c)是数值模拟脉冲自相关曲线和沿整个脉冲几乎呈线性变化的啁啾。光纤激光器中没有负色散补偿,腔内循环脉冲有低峰值功率和低非线性效应,从而产生近乎线性的频率啁啾。

使在全正色散光纤激光器产生了耗散孤子锁模脉冲。实验与数值模拟结果一致,证实了全正色散掺镱光纤激光器在无外加滤波器的情况下也可以产生稳定锁模耗散孤子脉冲。实验获得了脉冲能量达 1.1 nJ 的稳定耗散锁模脉冲。

参 考 文 献

- 1 V. J. Matsas, T. P. Newson, D. J. Richardson *et al.*. Selfstarting passively modelocked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarization rotation [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15): 1391~1393
- 2 M. Nakazawa, E. Yoshida, Y. Kimura. Generation of 98 fs optical pulses directly from an erbium-doped fibre ring laser at 1.57 μm [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(1): 63~65
- 3 Song Fang, Xu Wencheng, Chen Weicheng *et al.*. 78 fs Passively mode-locked Er-doped fiber ring laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1174~1177
宋 方, 徐文成, 陈伟成 等. 78 fs 被动锁模掺 Er 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1174~1177
- 4 Deng Dinghuan, Zhan Li, Gu Zhaochang *et al.*. 50 fs pulse generation from all-fiber stretched-pulse laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3094~3097
邓定桓, 詹 黎, 顾照昶 等. 50 fs 输出的全光纤展宽脉冲激光器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3094~3097
- 5 S. M. J. Kelly. Characteristic sideband instability of periodically amplified average soliton [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(8): 806~807
- 6 Zhao Yu, Liu Yongzhi, Zhao Deshuang *et al.*. Study on side bands in passively mode-locked fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 991~995
赵 羽, 刘永智, 赵德双 等. 被动锁模光纤激光器光谱边带[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 991~995
- 7 K. Tamura, E. P. Ippen, H. A. Haus *et al.*. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(13): 1080~1082
- 8 H. Lim, F. Ö. Ilday, F. Wise. Femtosecond ytterbium fiber laser with photonic crystal fiber for dispersion control [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(25): 1497~1502
- 9 F. Ö. Ilday, J. R. Buckley, W. G. Clark *et al.*. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(21): 213902
- 10 F. W. Wise, A. Chong, W. H. Renninger. High-energy femtosecond fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion [J]. *Laser & Photon. Rev.*, 2008, **2**(1): 58~73
- 11 A. Ruehl, D. Wandt, U. Morgner *et al.*. Normal dispersive ultrafast fiber oscillators [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2009, **15**(1): 191~206
- 12 L. M. Zhao, D. Y. Tang, J. Wu. Gain-guided soliton in a positive group-dispersion fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(12): 1788
- 13 Gao Weiqing, Xu Lixin, Ming Hai *et al.*. Theoretical analysis of passively mode-locked erbium-doped fiber laser with positive dispersion cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 82~86
高伟清, 许立新, 明 海 等. 正色散腔被动锁模掺铒光纤激光器的理论分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 82~86
- 14 O. Prochnow, A. Ruehl, M. Schultz *et al.*. All-fiber similariton laser at 1 μm without dispersion compensation [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(11): 6889~6893
- 15 A. Chong, J. Buckley, W. Renninger *et al.*. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(21): 10095~10100
- 16 M. Horowitz, Y. Barad, Y. Silberberg. Noiselike pulses with a broadband spectrum generated from an erbium-doped fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11): 799~801
- 17 A. Chong, W. H. Renninger, F. W. Wise. Properties of normal-dispersion femtosecond fiber lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(2): 140~148