

doi:10.3788/gzxb20184702.0214001

基于外腔压缩的 $2\ \mu\text{m}$ 耗散孤子光纤激光器

陈华龙, 金亮, 徐英添, 张贺, 李岩, 马晓辉

(长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 长春 130022)

摘 要:研究了 $2\ \mu\text{m}$ 掺 Tm 耗散孤子光纤激光器在大能量下产生的调制不稳定性, 通过计算耗散孤子锁模的动力学过程, 分析高峰值功率条件下非线性效应对光脉冲特性的影响. 通过在环形腔内引入色散补偿光纤和增大模场半径的方式增大腔内净正色散、减小腔内自相位调制效应. 针对输出光脉冲线性啁啾较大的特点, 采用 46.83 m 的大模场光纤对输出光脉冲进行腔外压缩, 最终得到了峰值功率为 17.1 kW、脉冲宽度为 169 fs 的稳定光脉冲输出.

关键词: 光纤激光器; 高峰值功率; 耗散孤子; 被动锁模; 腔外压缩

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)02-0214001-6

2 μm Dissipative Soliton Fiber Laser Based on External Cavity Compression

CHEN Hua-long, JIN Liang, XU Ying-tian, ZHANG He, LI Yan, MA Xiao-hui

(National Key Laboratory on High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The modulation instability generated by $2\ \mu\text{m}$ dissipative soliton fiber laser under high peak power is studied. The effect of nonlinear effects on the optical pulse characteristics is analyzed by calculating the dynamic process of the dissipative soliton mode-locked model. By introducing the dispersion compensation fiber into the annular cavity and adding the radius of the mode field, the net positive dispersion is enlarged and the self-phase modulation effect is reduce in the cavity. Aiming at the larger linear chirp pulse output, 46.83 m large mode area fibers is taken to compress out of cavity. Finally the stable pulse output with peak power of 17.1 kW and pulse width of 169 fs is obtained.

Key words: Fiber laser; High peak power; Dissipative soliton; Passive mode-locked; External cavity compression

OCIS Codes: 140.0140; 060.0320; 190.0190; 060.3510

0 引言

超短脉冲光纤激光器光束质量好、散热优良、结构紧凑且转换效率高, 被广泛应用于激光加工、光纤传感、光通信、医疗和激光雷达等方面. 其中掺铥 (Tm) 光纤激光器发射的 $2\ \mu\text{m}$ 激光处于“人眼安全”波段, 且水分子在此波段有强吸收作用, 因此在医疗方面有巨大的应用前景^[1-2]. 此外, $2\ \mu\text{m}$ 激光可以作为中远红外超连续谱的有效泵浦源^[3]. 但是, 由于受到“孤子面积”效应的制约, 传统孤子的能量小于 $0.1\ \text{nJ}$ ^[1,4-5], 严重制约了 $2\ \mu\text{m}$ 超短脉冲光纤激光器的应用. 为此, 研究人员提出了多种提升光脉冲能量的方法, 如色散管理孤子锁模、自相似孤子锁模、耗散孤子锁模等方法. 其中在零色散附近输出色散管理孤子能量一般在 nJ 量级左右^[1,4,6], 由于其腔内存在净正色散或全正色散, 有可能实现耗散孤子^[8-13]或自相似孤子脉冲输出, 有效提升单脉冲能量. 2016 年刘伟慈设计了一种“9 字型腔”, 数值模拟输出了峰值功率 9 kW 的自相似孤子^[7]. 2015

基金项目: 吉林省重点科技攻关项目 (No. 20150204068GX) 资助

第一作者: 陈华龙 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超短脉冲光纤激光器. Email: 1711232468@qq.com

导师: 马晓辉 (1965-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光电子技术及应用. Email: mxh@cust.edu.cn

通讯作者: 金亮 (1987-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为非线性光纤光学. Email: jinliang@cust.edu.cn

收稿日期: 2017-08-16; 录用日期: 2017-11-16

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

年 Nan Yang 等利用半导体可饱和吸收镜搭建了线型腔结构,在 $2\ \mu\text{m}$ 实现 $12\ \text{nJ}$ 脉冲的输出^[11].2015 年, Yuxing Tang 等利用双折射波片器件实现了非线性偏振旋转(Nonlinear Polarization Rotation, NPR)锁模,在掺铥光纤激光器实现了 $8\ \text{nJ}$ 的耗散孤子输出^[12].2016 年,Junqing Zhao 等利用“8 字型腔”结构实现耗散孤子输出,经过主振荡功率放大系统(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)放大输出平均功率 $100\ \text{W}$ 的脉冲输出,峰值功率为 $18.1\ \text{kW}$ ^[13].

本文围绕大能量光脉冲色散及非线性效应对光脉冲的影响开展研究,针对大能量耗散孤子脉冲宽度相对较大的问题进行分析,计算了腔内色散补偿光纤(Dispersion Compensated Fiber, DCF)长度和模场半径对光脉冲宽度及光谱的影响,在腔内引入 DCF 方式增大腔内净色散,研究自相位调制与群速度色散效应对输出光脉冲的啁啾调制特性,减小腔内非线性效应引起的脉冲分裂.采用腔外脉冲压缩的方式对输出脉冲的时域与频域进行调制,补偿腔内大的线性啁啾效应.最终经过数值优化,得到了脉宽为 $169\ \text{fs}$ 、峰值功率为 $17.1\ \text{kW}$ 的稳定光脉冲输出.

1 理论模型

图 1 为建立的耗散孤子模型,泵浦源为波长 $790\ \text{nm}$ 的单模光纤耦合半导体激光器,泵浦光通过 $790\ \text{nm}/1\ 925\ \text{nm}$ 的波分复用器被耦合进半径为 $4\ \mu\text{m}$ 的掺 Tm 增益光纤中.光路中光纤模场半径为 $4\ \mu\text{m}$,非线性折射率系数 $n_2 = 3.466 \times 10^{-20}$ ^[12].高斯型带通滤波器和可饱和吸收体对腔内传输光起到振幅调制的作用.带通滤波的带宽为 $8\ \text{nm}$,可饱和吸收体调制深度为 20% ,非饱和损失为 30% ,光脉冲经过输出耦合比为 $60/40$ 的输出耦合器,较大输出耦合比更利于腔内非线性效应的减小以及大能量的输出.同时腔内加入了隔离器,保证激光单向传输.输出耦合器的一段无源负色散大模场光纤(Large Mode Area Fiber, LMAF)作为色散补偿光纤.

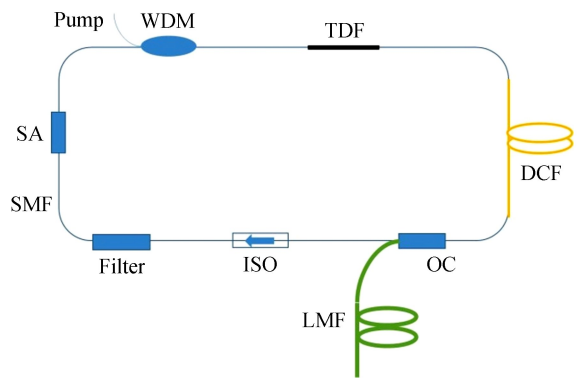


图 1 耗散孤子光纤激光器装置

Fig.1 Schematic of dissipative soliton fiber laser

光脉冲在光纤中演化过程可以用非线性薛定谔方程描述,即

$$\frac{\partial A(z, \tau)}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A(z, \tau)}{\partial \tau^2} = \frac{g}{2}A(z, \tau) + i\gamma |A(z, \tau)|^2 A(z, \tau) + \frac{g}{2\Omega^2} \frac{\partial^2 A(z, \tau)}{\partial \tau^2} \quad (1)$$

式中, $A(z, \tau)$ 是脉冲包络的慢变振幅, z 是沿光纤的传输距离, τ 是时间参量, γ 是非线性参量, Ω 为增益带宽,掺铥光纤中的增益带宽为 $40\ \text{nm}$. g 是增益系数,可以表示为

$$g = \frac{g_0}{1 + E/E_{\text{sat}}} \quad (2)$$

式中, g_0 为小信号增益系数,其数值为 $8\ \text{m}^{-1}$, E 和 E_{sat} 分别是脉冲能量和增益饱和能量,其数值为 $15\ \text{nJ}$.模型中可饱和吸收体和滤波器决定着光脉冲锁模输出的时域和频域特性,光脉冲通过可饱和吸收体的透过率为

$$T = 1 - \Delta R \times \exp\left(-\frac{P}{P_{\text{sat}}}\right) - \alpha \quad (3)$$

式中, ΔR 是饱和深度为 20% , α 是非饱和损失为 30% , P_{sat} 是饱和功率为 $100\ \text{W}$,可饱和吸收体对光脉冲有非线性吸收效应,对光脉冲峰值功率处的透过率高,对光脉冲的前沿和后沿的吸收率高.模型中的带通滤波器不断窄化脉冲,滤波器带宽 $\Delta\lambda$ 为 $8\ \text{nm}$.脉冲通过滤波器的透过率公式为

$$T = \exp\left\{-2 \times \ln(2) \times \left[\frac{\nu - \nu_0}{(\nu_0^2/c) \times \Delta\lambda}\right]^2\right\} \quad (4)$$

式中, ν_0 为中心波长($1\ 925\ \text{nm}$)对应的频率, $\Delta\lambda$ 是滤波器的带宽.根据式(4)可知,光脉冲每经过带通滤波器一次,脉冲光强就会受到一次调制,光脉冲边缘能量会被滤除.脉冲在腔内色散、非线性效应、增益、损耗、带通滤波器和可饱和吸收体共同作用下,在正色散条件下,输出耗散孤子脉冲.光谱滤波和可饱和吸收作用可以同时时域和频域上不断削弱低强度部分,提供有效的耗散作用,耗散过程在补偿非线性相移和避免波分

裂方法中起到了很大的作用,所以能实现更大能量的输出^[16-17].

为尽可能接近实验条件,模拟中使用的相关参数均为实验中用到的实际光学元件参数,如表 1.

表 1 光纤参数

Table 1 Fibers parameters

Fiber type	Dispersion/($\text{fs}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)	Mode field radius/ μm	Length
SMF	-71000	4	2
TDF	-73000	4	2
DCF	90773	4	6
LMAF	-84230	10	-

2 仿真结果与分析

在计算模拟中,采用分布傅里叶的方法进行数值求解,将一个输入初始信号,在谐振腔内不断循环达到稳定的自洽状态.脉冲时域演化随着泵浦功率的变化如图 2,当泵浦功率超过 380 mW 时,输出光脉冲出现了严重的脉冲分裂现象,波形如图 3.

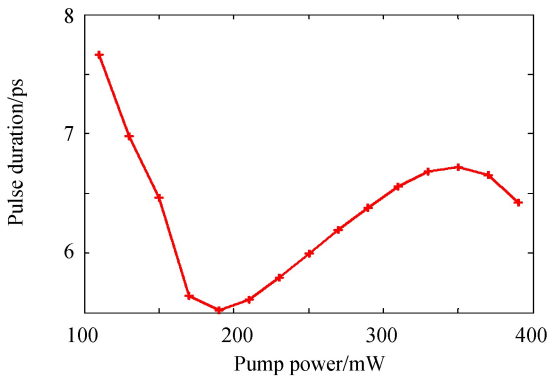


图 2 脉冲宽度随泵浦功率的变化

Fig.2 Pulse duration change with pump power

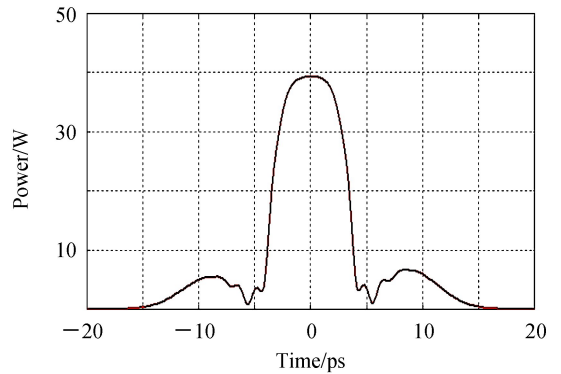


图 3 脉冲分裂图

Fig.3 Diagram of pulse splitting

图 2 中,随着泵浦功率逐渐增大,腔内信号光增益系数变大,增益窄化效应逐渐增强,振荡的光谱逐渐变窄,形成稳定的耗散孤子锁模,当泵浦功率超过 110 mW 时,随着泵浦功率的提高,腔内振荡的纵模逐渐增多,并且由于光脉冲多次经过可饱和和吸收体而逐渐变窄.当泵浦功率超过 190 mW 时,其单脉冲能量逐渐增加,光脉冲峰值功率变大,腔内自相位调制效应使得光谱宽度展宽,并在光脉冲中心处产生大的正啁啾,随着啁啾的累积并与腔内净正色散共同作用导致脉冲展宽.当泵浦功率超过 340 mW 时,累积的啁啾效应会使光脉冲的前后沿逐渐分裂,降低了光脉冲峰值功率,进一步增加泵浦光,会产生多脉冲输出效应,图 3 为经过 2000 次循环后得到的输出光脉冲波形.根据图 2 得到的结果可知,泵浦功率为 290 mW 时,可以在稳定锁模条件下得到最大的单脉冲能量,计算得到的耗散孤子光脉冲波形图和光谱图如图 4,腔内净色散为 $0.256\ \text{ps}^2$,输出脉冲能量为 240 pJ,输出光脉冲宽度为 6.42 ps,脉冲光谱的边缘陡峭,具有典型的耗散孤子光谱特征^[10].

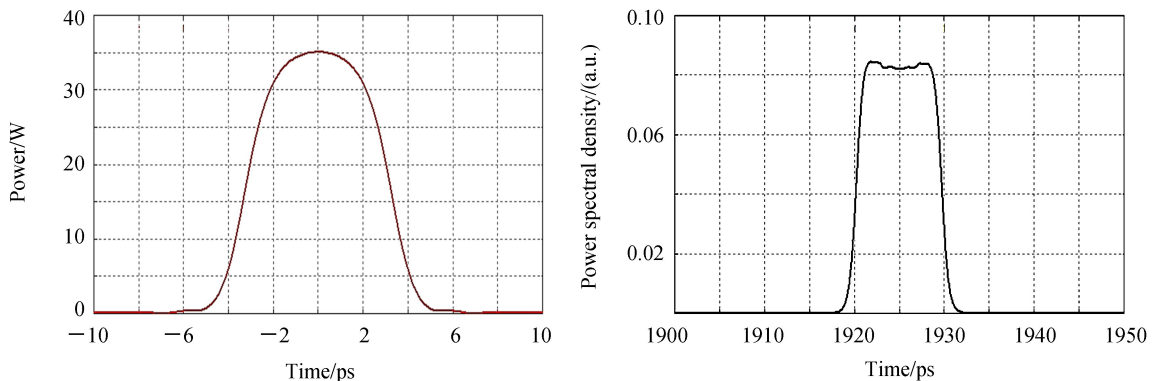


图 4 光纤激光器输出耗散孤子的光脉冲波形和光谱图

Fig.4 Pulse waveform and spectrum of dissipative soliton output from fiber laser

为了提高上述耗散孤子模型的单脉冲能量,避免多脉冲输出效应,需要抑制腔内自相位调制效应.为此,模型改变了 DCF 的长度和半径,计算 DCF 的模场半径和光纤长度对腔内净正色散展宽光脉冲宽度和单脉冲能量的影响,提高自相位调制的阈值功率.引入的 DCF 长度增加,腔内净色散由 0.256 ps^2 增加到 2.435 ps^2 .半径由 $4 \mu\text{m}$ 增加至 $6 \mu\text{m}$,考虑到光纤半径改变对色散的影响,计算得光纤半径 $5 \mu\text{m}$ 时色散为 $52975 \text{ fs}^2/\text{m}$,半径 $6 \mu\text{m}$ 时色散为 $38826 \text{ fs}^2/\text{m}$.光纤半径非线性参量由 $2.25 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 减小到 $1 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$,输出的脉冲能量和脉宽随腔内净色散的变化如图 5.

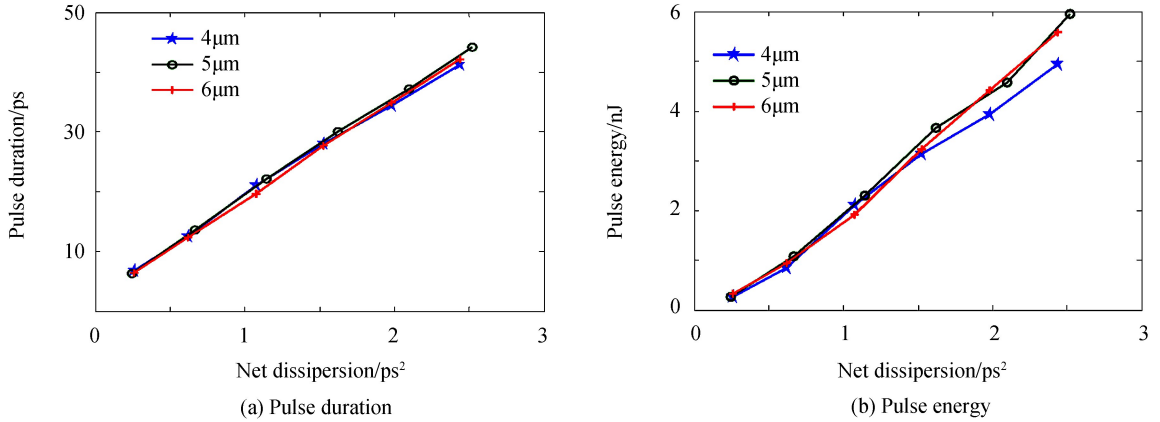


图 5 输出脉冲宽度与脉冲能量随腔内净色散的变化关系

Fig.5 Pulse duration and energy change with net dispersion

图 5(a)中,随腔内净色散增加,腔内产生的正色散产生累积,光脉冲宽度近似线性增加.在腔内净色散下,模场半径的变化对脉冲宽度的影响有限,腔内色散效应引起的脉冲展宽远大于非线性效应引起的脉冲展宽.图 5(b)中,在相同模场半径条件下,随着腔内净色散的增加,色散累积引起的脉冲啁啾线性增大、光脉冲得到展宽,使得能量近似线性增加,脉冲能量从 240 pJ 增加到 4.95 nJ .脉冲展宽有效限制了峰值功率的增加,抑制了自相位调制效应对单脉冲能量的制约.增大模场半径虽然会减小非线性参量,但是同时减小了色散,增加了色散补偿光纤的使用,增大腔长,自相位调制效应引入了过多啁啾,限制脉冲能量的提高.最终相同腔内净色散情况下,光纤半径 $5 \mu\text{m}$ DCF 系统比 $6 \mu\text{m}$ DCF 系统实现的能量大.腔内净色散超过 2.52 ps^2 ,腔内过大啁啾引起输出不稳定.

图 6 为腔内净色散为 2.52 ps^2 、模场半径为 $5 \mu\text{m}$ 时的输出光脉冲特性,输出能量为 5.96 nJ 、峰值功率为 148 W 的脉冲,脉冲宽度为 44.2 ps ,光谱宽度为 16 nm ,光谱图两侧的尖峰对应时域脉冲图中两侧的啁啾.计算可知,腔内色散长度 L_D 为 36878 m ,远远大于非线性长度 $L_{NL} = 4.69 \text{ m}$,在脉冲演化过程中自相位调制起主要作用,群速度色散效应较弱^[14].自相位调制感应的频率啁啾使得光谱由 10 nm 展宽到 16 nm ,感应出最大相移 ($\varphi_{\max} = \gamma PL$,忽略光纤的损耗)为 3.43π ,相比于初始的 0.29π ,会在光谱两侧出现尖峰且在中心的其他尖峰.由于 DCF 引入了大的正啁啾,减弱了自相位调制引起的光谱中心峰值.

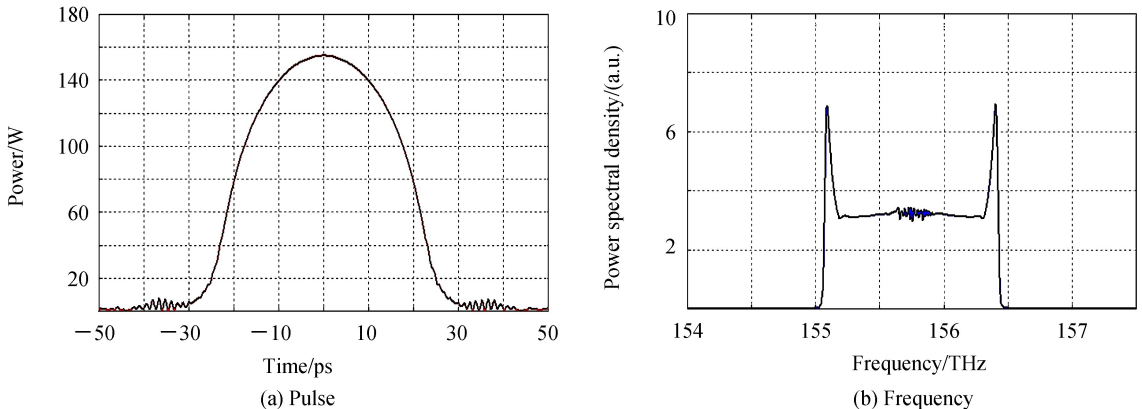


图 6 光纤激光器光脉冲输出特性

Fig.6 Direct output characteristic of fiber laser

腔内引入大正色散能有效降低非线性效应,限制了峰值功率的提升,有助于提高单脉冲能量,但同时引入大的正啁啾,导致脉冲宽度过大.通过在腔外输出端接入负色散光纤的方法去除输出光的脉冲啁啾,减小输出光脉冲的脉冲宽度.耗散孤子脉冲中心具有线性正啁啾,在脉冲中心自相位调制效应中引入了线性正啁啾,由色散引入的线性负啁啾可以减小脉冲中心的啁啾.在输出耦合器后接入大模场($w = 10\ \mu\text{m}$)光纤,大模场光纤可有效减小光纤的非线性参量($3.6 \times 10^{-4}\ \text{W}^{-1}\ \text{m}^{-1}$),有效补偿光脉冲中心的线性啁啾,在色散补偿过程中光脉冲波形并不产生畸变.图7为峰值功率和脉冲宽度随接入大模场光纤长度的变化关系.

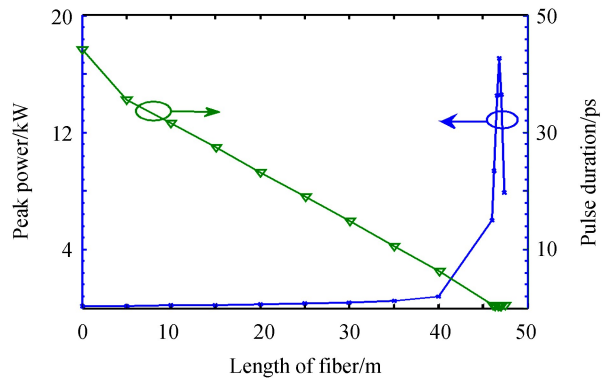


图7 峰值功率和脉宽随大模场光纤长度的变化
Fig.7 Peak power and pulse duration change with length of LMAF

随着大模场光纤长度的增加,输出峰值功率不断增加,脉冲宽度不断减小.当光纤长度为 $46.83\ \text{m}$ 时,峰值功率由 $148\ \text{W}$ 提高到 $17.1\ \text{kW}$,峰值功率增大了 115.5 倍,脉冲宽度从 $44.2\ \text{ps}$ 减小为 $169\ \text{fs}$,最大压缩比为 261.5 ,脉冲中心的啁啾为零,时间带宽积达到最小,如图8(a).当大模场光纤长度超过 $46.83\ \text{m}$,会使输出光脉冲引入负啁啾,光脉冲宽度展宽,峰值功率下降.

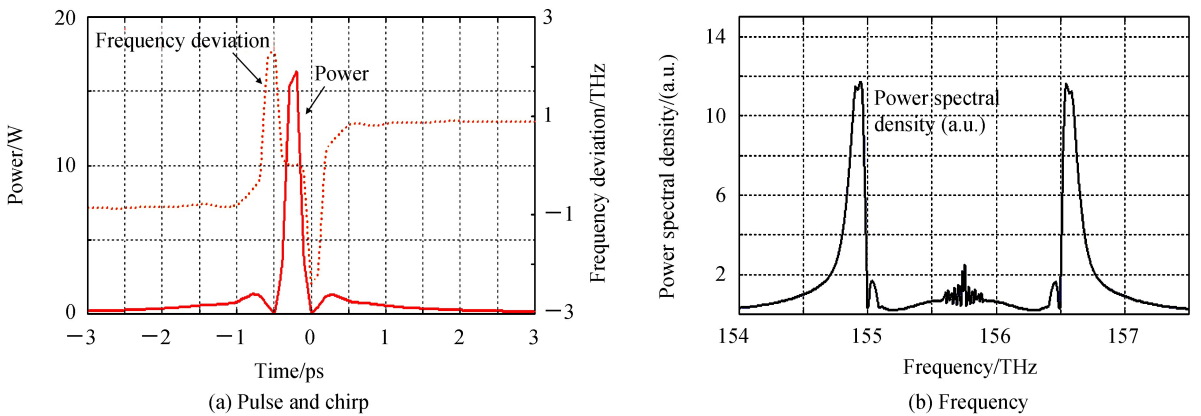


图8 锁模光纤激光器外腔压缩输出光脉冲

Fig.8 Output of mode-locked fiber laser through compressive fiber out of cavity

相比于直接输出脉冲的光谱图,图8(b)的光谱变得更宽,两侧的尖峰变得更加明显.在腔外大模场光纤中传输,随着脉冲功率的提升,自相位调制效应更加明显,使得光谱进一步加宽.由于脉冲能量在腔外传输不变,光谱不断展宽造成光谱中心部分波长的能量下降,能量向光谱两侧波长部分转移,光谱两侧强度变大,最终实现了峰值功率为 $17.1\ \text{kW}$ 、脉冲宽度为 $169\ \text{fs}$ 的高峰值功率超短脉冲输出.

3 结论

本文针对耗散孤子锁模的动力学方程进行分析,通过计算非线性效应对色散对光脉冲宽度、腔内啁啾和光谱的影响,实现稳定耗散孤子脉冲输出.通过增大腔内净色散和模场半径的方法减小腔内自相位调制效应,输出的能量从开始的 $240\ \text{pJ}$ 增加到 $5.96\ \text{nJ}$,功率从 $35\ \text{W}$ 增加到 $148\ \text{W}$.再通过光纤腔外去啁啾的方法压缩脉冲宽度,使脉冲中心的啁啾降低为零,总压缩比为 261.5 ,峰值功率从 $148\ \text{W}$ 增加到 $17.1\ \text{kW}$,增大了 115.5 倍.计算证明大模场光纤可有效压缩光脉冲,去除光脉冲啁啾,是实现高功率超短脉冲的有效手段.

参考文献

- [1] WANG Jin-zhang, LIANG Xiao-yan, et al. 152 fs nanotube-mode-locked thulium all-fiber laser[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**:28885-28891.
- [2] LI Meng-meng, HOU Lei, LIN Qi-meng, et al. Wide-spectrum all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser[J]. *Acta*

Photonica Sinica, 2017, **46**(1): 0114002.

李蒙蒙, 侯磊, 林启蒙, 等. 宽光谱全正色散锁模掺镱光纤激光器[J]. 光子学报, 2017, **46**(1): 0114002.

- [3] LI Xiao-hui, TANG Yu-long. Broadband Saturable absorption of graphene oxide thin film and its application in pulsed fiber lasers[J]. *Journal of Selected Topic in Quantum Electronics*, 2014, **20**: 1101107.
- [4] RENNINGER W H, CHONG A, WISE F W. Area theorem and energy quantization for dissipative optical soliton[J]. *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, 2010, **27**(10): 1978-1982.
- [5] XU Jia, WU Si-da, LIU Jiang, *et al.* Passively mode-locked traditional soliton, dissipative soliton Er-doped fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(7): 0702003.
徐佳, 吴思达, 刘江, 等. 被动锁模的传统孤子、耗散孤子掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, **40**(7): 0702033.
- [6] OKTEM B. Soliton-similariton fiber laser[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(5): 307-311.
- [7] LIC Wei-ci, LIANG Rui-sheng. A novel high power dual-wavelength self-similar parabolic pulse laser[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2016, **33**(4): 451-455.
- [8] HUANG Shi-sheng, WANG Youg-gang. Tunable and switchable multi-wavelength dissipative soliton generation in a graphene oxide mode-locked Yb-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(10): 11417-11426.
- [9] CHONG A, BUCKLEY J. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(21): 10095-10112.
- [10] GRELU P, AKHMEDIEV N. Dissipative soliton for mode-locked laser[J]. *Nature Photonics*, 2010, **6**(12): 84-92.
- [11] YANG Nan, HUANG Chong-yuan. 12 nJ 2 μ m dissipative soliton fiber laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2015, **12**: 055101-055104.
- [12] TANG Yu-xing, CHONG A. Generation of 8 nJ pulses from a normal-dispersion thulium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(10): 2361-2364.
- [13] ZHAO Jun-qing, OUYANG De-qin. 100W dissipative soliton resonances from a thulium-doped double-clad all-fiber-format MOPA system[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(11): 12072-12076.
- [14] GOVIND P A. Nonlinear fiber optics, fourth edition & applications of nonlinear fiber optics, second edition [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [15] JUNG M W, LEE J S. A femtosecond pulse fiber laser at 1935nm using a bulk-structured Bi₂Te₃ topological insulator [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(7): 7865-7874.
- [16] ZHANG Xue-xia, GE Ting-wu, DING Xing, *et al.* Study of continuous fiber laser with distributed pump structure[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(9): 1071-1075.
张雪霞, 葛廷武, 丁星, 等. 分布式抽运连续光纤激光器研究[J]. 发光学报, 2016, **37**(9): 1071-1075.
- [17] LI Hui-hui. The research on nonlinear pulse dynamics in passively mode-locked fiber lasers [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015: 33-44.
李辉辉. 被动锁模光纤激光器中非线性脉冲动力学研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015: 33-44.