

掺镱光纤激光器中的色散管理耗散孤子

李辉辉 刘 江 孙若愚 金东臣 王 璞

(北京工业大学激光工程研究院, 国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

摘要 通过数值模拟研究了掺镱光纤激光器中色散管理耗散孤子的产生。利用在 $1\ \mu\text{m}$ 处负群速度色散特性的空芯光子晶体光纤, 对掺镱光纤激光器进行色散管理, 分析耗散孤子在腔内传输时各元器件对脉冲宽度和光谱宽度的影响。带有正啁啾的色散管理耗散孤子随着腔内净正色散值的减小, 时间带宽积逐渐增大, 通过在腔外进一步压缩得到最短 90 fs 的脉冲。包含正、负色散元件的锁模光纤激光器产生的色散管理耗散孤子比普通的色散管理孤子具有更高的脉冲能量, 掺镱光纤的增益色散和可饱和吸收体的振幅调制对孤子的形成起到很大的作用。

关键词 激光器; 耗散孤子; 数值模拟; 色散管理

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s102001

Dissipative Dispersion-Managed Solitons in Yb-Doped Fiber Laser

Li Huihui Liu Jiang Sun Ruoyu Jin Dongchen Wang Pu

(National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract The dispersion-managed passively mode-locked Yb-doped fiber laser is designed, using negative group velocity dispersion characteristics of photonic crystal fiber at $1\ \mu\text{m}$ wavelength. The net group velocity dispersion of the fiber laser is normal. Larger pulse energy can be generated from this laser. The generation of the dissipative dispersion-managed soliton is studied through numerical simulation. The amplitude modulation of the saturated absorber and the gain dispersion of the Yb-doped fiber play significant roles in the formation of the soliton. The effects of the positive and negative dispersion elements on the pulse width and spectrum width are analyzed. The time bandwidth product increases gradually with the net group velocity dispersion value decreasing. The shortest pulse of 90 fs width is obtained through further compression.

Key words lasers; dissipative soliton; numerical simulation; dispersion management

OCIS codes 140.4050; 140.3615; 190.5530

1 引 言

近年来, 光纤激光器由于其设计紧凑、散热优良、光束质量好、免校准、损耗低等优点得到广泛研究。其中, 掺镱锁模光纤激光器产生的超短脉冲具有较高的脉冲能量, 在频率度量衡学、材料加工、非线性光学等领域有很大的应用前景^[1-2]。

光孤子存在于负色散激光腔中, 传输时受到的非线性效应和负群速度色散之间可达到平衡而保持不变, 脉冲在光纤中传输时自相位调制(SPM)会产生大

的非线性相移, 当光孤子能量较高时将导致光波分裂; 而在色散管理腔中总的群速度色散值接近于零, 脉冲在腔内被周期性展宽和压缩, 有效降低了腔内脉冲峰值功率及非线性相移的累积, 单脉冲能量可提高一个数量级以上, 这种展宽脉冲是非线性薛定谔方程的呼吸解, 净负色散区域的色散管理孤子激光器产生的展宽脉冲宽度可达到飞秒量级, 非线性相移的积累仍会降低脉冲的质量, 这也限制了超短脉冲光纤激光器更广泛的应用。2006年 Chong 等^[3]在全正色散掺

收稿日期: 2013-04-01; **收到修改稿日期**: 2013-05-20

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目(KZ2011100050011)

作者简介: 李辉辉(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: lihuihide@foxmail.com

导师简介: 王 璞(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

镜光纤激光器中得到高能量的耗散孤子;2009年 Bale 等^[4]从理论上研究了掺镱光纤激光器中色散管理耗散孤子的传输特性;2012年 Peng 等^[5]在实验中利用同一装置对色散管理孤子、耗散孤子和自相似子进行了研究;同年,石明威等^[6]利用光栅对掺镱展宽脉冲激光器进行了实验研究。

本文利用在 $1\ \mu\text{m}$ 处负群速度色散特性的空芯光子晶体光纤(PCF)^[7],对掺镱光纤激光器进行色散管理。广义的耗散孤子存在于各种不可积分的开放系统^[8]中,将耗散孤子理论扩展到色散管理腔中。能量较大的色散管理耗散孤子存在于净色散为正的谐振腔中,可通过金兹伯格朗道方程采用腔内平均参数得到的解进行预测^[9-10];本文利用简化的物理模型来描述色散管理腔中这种脉冲的特性,通过改变金兹伯格朗道方程各个参数对该锁模光纤激光器进行详细的研究。

2 数值模拟

数值模拟基于计算机软件,将被动锁模光纤激光器各个光学器件模块化,如图 1 所示。

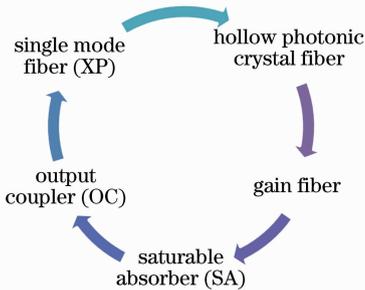


图 1 掺镱色散管理光纤激光器组成示意图

Fig. 1 Configuration of the dispersion-managed passively mode-locked Yb-doped fiber laser

通过分步傅里叶方法^[11]对金兹伯格朗道方程^[12]进行求解:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \gamma |A|^2 A = igA + \frac{ig}{\Delta\Omega_g} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}, \quad (1)$$

式中 A 为慢变包络振幅, γ 为非线性系数, β_2 为二阶群速度色散, $g(z)$ 为饱和增益系数,

$$g(z) = g_0 / [1 + E(z)/E_{\text{sat}}], \quad (2)$$

式中 g_0 为小信号增益系数, $E(z)$ 为脉冲能量, E_{sat} 为饱和增益能量。数值模拟中掺镱光纤有限的增益带宽 $\Delta\lambda_g = 60\ \text{nm}$, 对应频谱宽度 $\Delta\Omega_g = 2\pi c\Delta\lambda_g/\lambda^2$, 在中心波长 $1060\ \text{nm}$ 处有高斯型增益滤波效应;饱和吸收体处理为快速饱和吸收作用,有效的饱和吸

收作用描述为

$$A_{\text{out}} = A_{\text{in}} \{1 - \Delta R [1 + |A(t)|^2/P_{\text{sat}}]^{-1}\}, \quad (3)$$

$\Delta R = 0.7$ 为饱和损耗系数, $P_{\text{sat}} = 1\ \text{kW}$ 为饱和功率^[13]。

掺镱色散管理锁模光纤激光器中各光纤参数如表 1 所示。

表 1 掺镱光纤激光器参数

Table 1 Parameters of the Yb-doped fiber laser

Parameter	Gain fiber	Single mode fiber	Hollow PCF	Unit
Dispersion (β_2 at 1060 nm)	+0.030	+0.030	-0.060	ps^2/m
Available mode field diameter	6	7	10	μm
Nonlinear coefficient γ	0.0067	0.0049	0.0024	$\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
Length	1	2	1	m

利用空心光子晶体光纤在 $1\ \mu\text{m}$ 处负的群速度色散,对激光腔进行色散管理。数值模拟中初始脉冲为一任意噪声,经过约 100 圈的运转逐渐形成稳定的脉冲。整个激光器净色散为 $0.03\ \text{ps}^2$, 脉冲宽度为 $4.21\ \text{ps}$, 光谱宽度 $9.57\ \text{nm}$, 脉冲能量 $1.2\ \text{nJ}$, 如图 2 所示。激光器所产生脉冲的特性取决于激光腔的参数,与初始脉冲无关,该脉冲形成过程中增益光纤有限的增益带宽起到的滤波作用是必不可少的,这与强烈依赖于光谱滤波器的全正色散耗散孤子有很大区别,在被动锁模光纤激光器中最重要的物理过程包括自相位调制导致的非线性相移积累、线性的群速度色散及可饱和吸收体产生的振幅调制。在净正色散光纤激光器中,色散管理耗散孤子非线性相移不断积累,光谱不断展宽,可饱和吸收体在不断调制脉冲前沿和后沿强度的同时,也在不断减弱脉冲前后沿的非线性啁啾;增益光纤有限增益带宽在限制孤子光谱展宽的同时,使带有线性啁啾

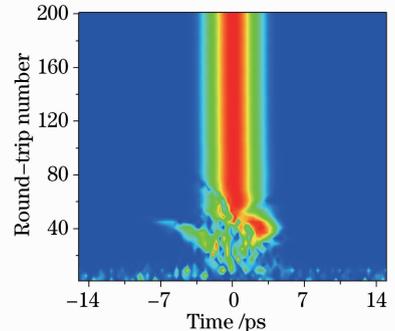


图 2 激光腔内噪声逐渐演化为稳定的脉冲

Fig. 2 Stable single-pulse mode-locking from white noise

的脉冲中心部分不断得到放大,线性啁啾逐渐扩充至整个脉冲,最终形成具有大的时间带宽积的线性啁啾高斯型脉冲。可饱和吸收体和增益色散共同起到耗散作用,不断抵消非线性相移的积累对脉冲质量的影响,这在色散管理耗散孤子的形成过程中是必不可少的。

对于色散管理光纤激光器而言,腔内净色散的正负直接决定了所产生脉冲的类型。在净负色散腔中,正负啁啾使脉冲在每一次循环中展宽和压缩两次,在正负色散光纤的中间处脉宽达到最小值,被称为展宽脉冲^[14]。在净正色散的激光腔中,在正色散的增益光纤和单模光纤中脉冲得到展宽,在负色散的光子晶体光纤中啁啾补偿被压缩。由于非线性效应新的频率分量不断产生,脉冲在每段光纤中传输时光谱都被展宽,在相同的峰值功率和非线性相移条件下,带有线性啁啾的色散管理耗散孤子比变换极限脉冲具有更高的脉冲能量,而且缺少全正色散腔中强烈的滤波作用,因此色散管理耗散腔中饱和吸收体对脉冲时域和频域的过滤作用十分明显,如图3中灰色区域所示。在每个循环中,孤子在正负色散光纤的开始处脉宽达到最大值,随后受到展宽或压缩,如图4所示,从该色散管理腔中可产生带有线性上频率啁啾的高斯型脉冲^[15]。这种带有强的线性啁啾的脉冲可以方便地在单模光纤中进行压缩,图5为压缩后得到的陡沿光谱和脉宽为223 fs的超

短脉冲,脉冲两侧的突起与未被完全补偿的非线性啁啾有关。

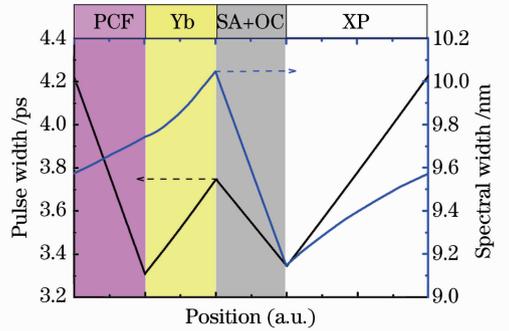


图3 激光器各部分对色散管理耗散孤子脉冲宽度和光谱宽度的影响

Fig. 3 Effects of different parts of fiber laser on the pulse width and spectral width

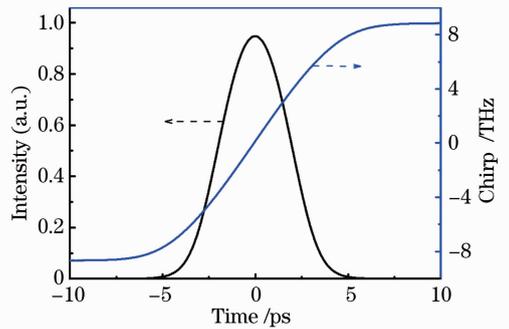


图4 具有线性频率啁啾的色散管理耗散孤子

Fig. 4 Dissipative dispersion-managed soliton with linear instantaneous frequency

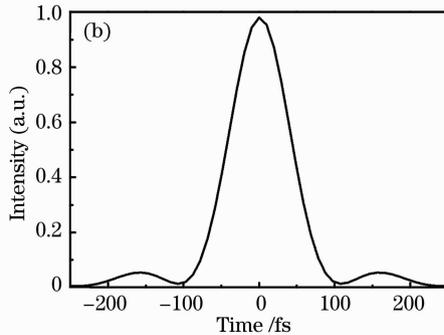
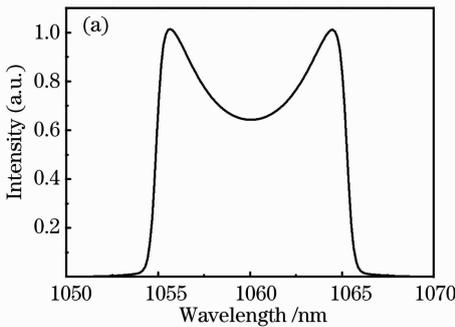


图5 进一步压缩后的(a)光谱图和(b)脉冲图

Fig. 5 (a) Output spectrum and (b) temporal intensity profile after extra-cavity dechirping

在腔的净色散为负时,可从腔中直接得到飞秒脉宽的展宽脉冲,得到的脉冲时间带宽积较小,如图6所示,不能在腔外进一步压缩;随着腔内净负色散值向零靠近,飞秒脉冲脉宽越来越短,如图7所示。在净正色散腔中产生的耗散孤子的时间带宽积较大,随着净正色散值的减小,时间带宽积呈指数增

加,净正色散值接近于零时,时间带宽积达到最大值27.364。由于色散管理耗散孤子受限于增益光纤的增益带宽,故得到的耗散孤子的最大带宽为29.15 nm,在腔外压缩得到最短90 fs的超短脉冲。

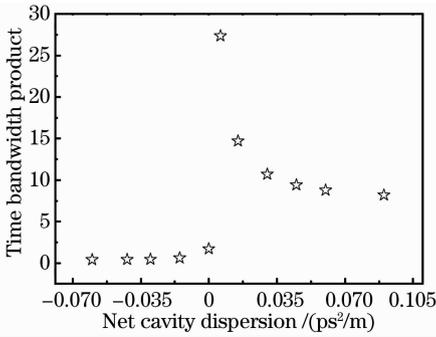


图 6 输出脉冲的时间带宽积随激光腔净色散的变化

Fig. 6 Time bandwidth product of the output pulse versus net cavity dispersion

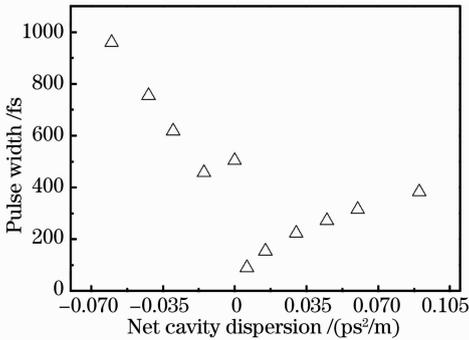


图 7 输出脉冲的脉宽随激光腔净色散的变化

Fig. 7 Output pulse width versus the net cavity dispersion

3 结 论

利用空芯光子晶体光纤在 $1 \mu\text{m}$ 处负群速度色散的特性,对掺镜光纤激光器进行色散管理,通过数值模拟研究了色散管理激光器中耗散孤子的产生。孤子在激光腔内循环时被周期性展宽与压缩,减低了传输过程中的非线性效应,使脉冲携带更高的功率而不发生分裂。分析了传输时腔内各个部分对脉冲宽度和光谱宽度的影响,带有强的线性啁啾的色散管理耗散孤子在腔外被进一步压缩。随着腔内净正色散的减小,输出脉冲的时间带宽积呈指数增加,得到最短 90 fs 的压缩脉冲,增益光纤有限的增益带宽和饱和吸收体对色散管理耗散孤子的形成起到重要作用。光纤激光器提供了研究不可积分的耗散系统的优良场所。在理论工作的指导下,将通过实验对掺镜色散管理激光器中的耗散孤子进行更深入的研究。

参 考 文 献

- 1 A Ruehl, A Marcinkevicius, M E Fermann, *et al.*. 80 W, 120 fs Yb-fiber frequency comb[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(18): 3015–3017.
- 2 C Hnatovsky, V G Shvedov, W Krolikowski, *et al.*. Materials processing with a tightly focused femtosecond laser vortex pulse [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(20): 3417–3419.
- 3 A Chong, J Buckley, W Renninger, *et al.*. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser[J]. *Opt Express*, 2006, 14(21): 10095–10100.
- 4 Brandon G Bale, Sonia Boscolo, Sergei K Turitsyn. Dissipative dispersion-managed solitons in mode-locked lasers[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(21): 3286–3288.
- 5 Junsong Peng, Li Zhan, Zhaochang Gu, *et al.*. Experimental observation of transitions of different pulse solutions of the Ginzburg-Landau equation in a mode-locked fiber laser[J]. *Phys Rev A*, 2012, 86(3): 033808.
- 6 Shi Mingwei, Liu Bowen, Wang Sijia, *et al.*. Generation of giant-chirp laser pulses in a stretched-pulse mode-locked fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0202007.
石明威, 刘博文, 王思佳, 等. 输出大啁啾脉冲的展宽脉冲锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0202007.
- 7 Hu Minglie, Song Youjian, Liu Bowen, *et al.*. Development and advanced applications of femtosecond photonic crystal fiber laser technique[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(7): 1660–1670.
胡明列, 宋有建, 刘博文, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展及其前沿应用[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1660–1670.
- 8 Zhao Hui, Chai Lu, Ouyang Chunmei, *et al.*. A long cavity all normal dispersion mode locked Yb-doped fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(12): 2958–2963.
赵慧, 柴路, 欧阳春梅, 等. 长腔全正色散锁模掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2010, 37(12): 2958–2963.
- 9 H A Haus, K Tamura, L E Nelson, *et al.*. Stretched-pulse additive pulse mode-locking in fiber ring lasers: theory and experiment[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1995, 31(3): 591–598.
- 10 B A Malomed. *Soliton Management in Periodic Systems*[M]. New York: Springer Science Business Media, 2006.
- 11 E Ding, J N Kutz. Operating regimes, split-step modeling, and the Haus master mode-locking model[J]. *J Opt Soc Am B*, 2009, 26(12): 2290–2300.
- 12 V I Kruglov, C Agueraray, J D Harvey. Parabolic and hyper-Gaussian similaritons in fiber amplifiers and lasers with gain saturation[J]. *Opt Express*, 2012, 20(8): 8741–8754.
- 13 T Schreiber, B Ortac, J Limpert, *et al.*. On the study of pulse evolution in ultra-short pulse mode-locked fiber lasers by numerical simulations[J]. *Opt Express*, 2007, 15(13): 8252–8262.
- 14 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.
- 15 F O 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.

栏目编辑: 宋梅梅