

# 有限增益带宽下的被动锁模掺镱光纤激光器 输出特性的研究

王大帅<sup>1</sup> 吴 戈<sup>1</sup> 高 博<sup>2</sup> 田小建<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 吉林大学电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012

<sup>2</sup> 吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要** 基于被动锁模掺镱光纤激光器集总模型, 仿真研究了掺杂光纤的有限增益带宽对激光器输出特性的影响。仿真结果表明, 被动锁模掺镱光纤激光器的输出脉冲宽度和激光器运行状态都受到增益带宽的影响。激光器输出脉冲宽度随增益带宽的增大而增大; 通过线性调控腔内净色散的大小, 发现在较大增益带宽情况下, 较小的色散值就可以使激光器工作在自相似状态, 即激光器工作在自相似状态时所需的腔内净色散条件范围更大。另外, 对不同增益带宽下的激光器输出脉冲对之间的相互作用情况进行了仿真。仿真结果表明, 非线性相移在抛物线形脉冲间的作用中起着关键的作用, 而非线性相移受增益带宽的影响, 因此较大的增益带宽下脉冲之间的相互作用力更强。

**关键词** 非线性光学; 被动锁模光纤激光器; 增益带宽限制; 自相似脉冲; 脉冲相互作用

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0902007

## Study on Output Characteristics of a Passively Mode-Locked Yb-Doped Fiber Laser under Limitation of Finite Gain Bandwidth

Wang Dashuai<sup>1</sup> Wu Ge<sup>1</sup> Gao Bo<sup>2</sup> Tian Xiaojian<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China  
<sup>2</sup> College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

**Abstract** Based on a lumped model of a passively mode-locked Yb-doped fiber laser, the influence of the limited gain bandwidth on the laser's output characteristics is investigated numerically. Simulation results show that the duration of the output pulse and the operating regimes are determined by the gain bandwidth. The pulse duration increases with the gain bandwidth increasing. By changing the intra-cavity average dispersion monotonically, it is demonstrated that under the condition of wide gain bandwidth, the laser operates in the self-similar regimes under a large range of cavity parameters. In addition, the interaction of pulse pair in distinct gain bandwidth is also studied. Simulation results show that the nonlinear phase shift plays an important role in pulses interaction, and the nonlinear phase shift is determined by the gain bandwidth, therefore the wider gain bandwidth leads to the stronger interaction forces between the pulses.

**Key words** nonlinear optics; passively mode-locked fiber laser; limit of gain bandwidth; self-similar pulse; pulses interaction

**OCIS codes** 060.2310; 060.2320; 060.2330; 140.3510

## 1 引 言

随着高精度材料加工技术的发展和科学基础领

域研究的不断深入, 对高能量超短脉冲光源的技术要求也随之提高。综合考虑激光器的结构复杂程

收稿日期: 2013-03-25; 收到修改稿日期: 2013-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(60372061)

作者简介: 王大帅(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事非线性光学和锁模光纤激光器等方面的研究。

E-mail: wangds23@gmail.com

导师简介: 田小建(1957—), 男, 博士, 教授, 主要从事高速电子学与光电子技术等方面的研究。E-mail: 0204113@163.com (通信联系人)

度、工作稳定性和成本等方面的因素,被动锁模光纤激光器是产生高能超短光脉冲的理想光源之一。超短光脉冲的产生和稳定传输受到积累的过量的非线性相移的限制,使脉冲发生波分裂现象。这种限制对光纤器件尤为明显,这就导致了短脉冲光纤激光器在性能上不及固体激光器。

1993年,Anderson等<sup>[1]</sup>发现,保证脉冲在传输过程中啁啾的单调性是避免脉冲发生波分裂的充分条件。同时,他们在群速度色散为正的情况下,找到了满足这个条件的非线性薛定谔方程的解。这个解的强度为抛物线形,并且可以自相似地传输。随后,研究人员对光纤放大器<sup>[2-5]</sup>和光纤激光器<sup>[6-8]</sup>中自相似现象的研究逐渐展开。2004年,Ilday等<sup>[9]</sup>首先在光纤激光器中观察到了自相似现象,实验结果证明,采用自相似整形技术的光纤激光器产生的脉冲能量至少要高于之前普通光纤激光器输出的两倍,如果可以避免饱和吸收体的过驱动,脉冲能量可以提升1~2个数量级。采用自相似技术的光纤激光器性能得到显著提升。

脉冲的形成是激光器内色散、非线性、增益和损耗等因素共同作用的结果。在激光器的设计中,增益带宽是一个重要的考虑因素<sup>[10]</sup>。本文基于被动锁模掺镱光纤激光器集总模型,仿真研究了激光器在不同掺镱光纤的增益带宽情况下,输出脉冲的脉宽和能量特性,并在此基础上,分析了增益带宽对激光器输出脉冲对间的相互作用机制。

## 2 数值模型

激光器谐振腔结构如图1所示,包括一段0.25 m长的掺镱光纤、一段5 m长的单模光纤(SMF)、一段色散补偿光纤(DCF)、一个饱和吸收体(SA)和一个输出耦合器(OC)。采用集总模型对激光器进行仿真,即光脉冲依次通过谐振腔中的各个元件,每个元件对脉冲的影响通过脉冲能量包络与元件的传输

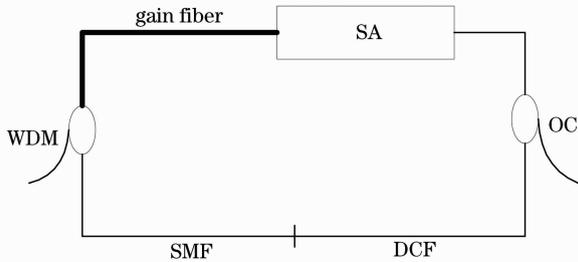


图1 被动锁模掺镱光纤激光器结构

Fig.1 Schematic of the passively mode-locked Yb-doped fiber laser

方程相乘来实现。

光在光纤中的传输由非线性薛定谔方程来描述,包括了光纤损耗、有限带宽的饱和增益、色散和非线性效应,以上几种因素的平衡保证了脉冲的形成。忽略三阶及三阶以上非线性效应的影响,近似后的传输方程表达为

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

式中  $A(z, T)$  代表慢变光场的时域包络,  $\beta_2$  为群速度色散系数,  $\gamma$  为克尔非线性系数,  $g$  为掺杂光纤的增益,对于单模光纤和色散补偿光纤来说,  $g = 0$ 。这里,  $g$  是一个抛物线型的频域参数,传输方程表达为

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

式中  $g_0$  是小信号增益,  $\Omega_g$  为增益谱的带宽,  $E$  为谐振腔内的脉冲能量,  $E_{\text{sat}}$  为增益介质的饱和能量。

饱和吸收体的传输方程表示为

$$R = R_{\text{unsat}} + R_{\text{sat}} [1 - 1/(1 + P/P_{\text{sat}})], \quad (3)$$

式中  $R_{\text{unsat}} = 60\%$ ,  $R_{\text{sat}} = 30\%$ , 分别为饱和吸收体的不饱和与饱和折射率,  $P$  为入射脉冲的瞬时功率,  $P_{\text{sat}}$  为饱和吸收体的饱和功率。

激光器光纤腔中的损耗用集总模型来描述。将腔中由单模光纤、色散补偿光纤、增益光纤及输出耦合器带来的损耗与各器件间的插入损耗加在一起,用衰减系数值0.1来体现。

腔内净色散表示为

$$\beta_2^{\text{net}} = \beta_2^{\text{gain}} L^{\text{gain}} + \beta_2^{\text{SMF}} L^{\text{SMF}} + \beta_2^{\text{DCF}} L^{\text{DCF}}, \quad (4)$$

式中  $\beta_2^{\text{gain}}$  为增益光纤的二阶色散系数,  $L^{\text{gain}}$  为增益光纤的长度,  $\beta_2^{\text{SMF}}$  为单模光纤的二阶色散系数,  $L^{\text{SMF}}$  为单模光纤的长度,  $\beta_2^{\text{DCF}}$  为色散补偿光纤的二阶色散系数,  $L^{\text{DCF}}$  为色散补偿光纤的长度。本文的模型中,通过改变色散补偿光纤长度来调整腔内色散的大小。

## 3 仿真结果与分析

在仿真中使用的参数如下:  $\beta_2^{\text{gain}} = 0.025 \text{ ps}^2/\text{m}$ ,  $\beta_2^{\text{SMF}} = 0.025 \text{ ps}^2/\text{m}$ ,  $\gamma^{\text{gain}} = 0.005 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\gamma^{\text{SMF}} = 0.0013 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $g_0 = 20 \text{ m}^{-1}$ ,  $P_{\text{sat}} = 150 \text{ W}$ ,  $\beta_2^{\text{DCF}} = -0.082 \text{ ps}^2/\text{m}$ ,  $\gamma^{\text{DCF}} = 0.079 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

仿真以一个白噪声信号开始,有限的增益带宽保证了在经过一定的振荡周期后,可以在激光器内形成稳定的脉冲。激光器的工作状态与激光器内的腔内群速度色散  $\beta_2^{\text{net}}$  有关,即  $\beta_2^{\text{net}} = 0.004 \text{ ps}^{-2}$ ,激光器工作在自相似状态,输出脉冲为抛物线形脉冲。

逐渐增大增益光纤的饱和能量  $E_{\text{sat}}$ ，可以使激光器从单脉冲输出过渡到多脉冲输出<sup>[11]</sup>。由于自相似脉冲的形状只与入射脉冲的初始能量和光纤参数有关，与入射脉冲形状无关<sup>[12]</sup>，为了便于观察仿真结果，接下来的实验中采用了宽度为 1.6 ps、峰值功率为 1 W 的高斯脉冲作为初始脉冲。

在保证激光器输出为自相似脉冲的前提下，通过改变增益带宽  $\Omega_g$ ，观察到输出脉冲的半峰全宽

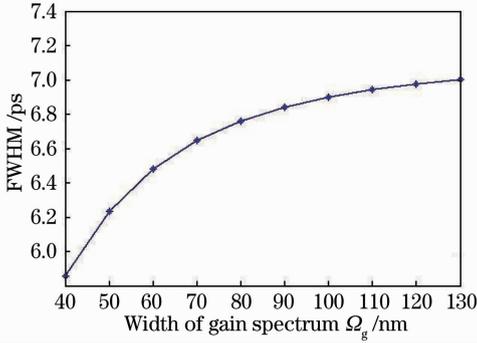


图 2 增益带宽对脉冲宽度的影响

Fig. 2 Influence of gain bandwidth on pulse duration

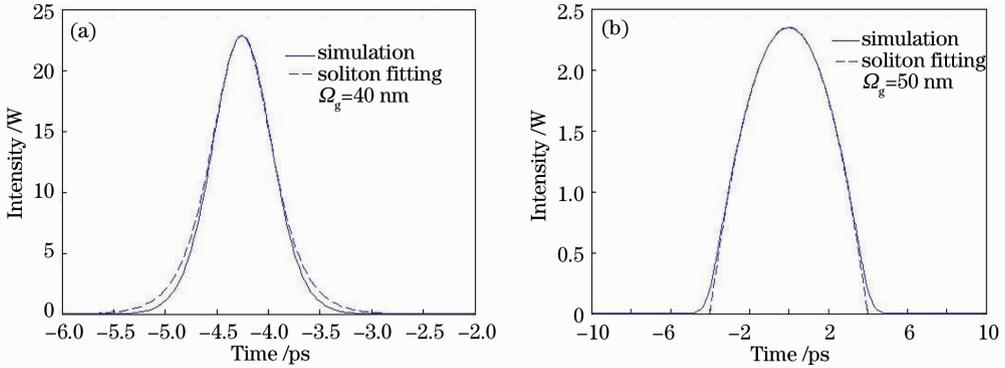


图 3 增益带宽对激光器工作状态的影响

Fig. 3 Influence of gain bandwidth on laser operation regime

线性啁啾是自相似脉冲的一个显著特征。图 4

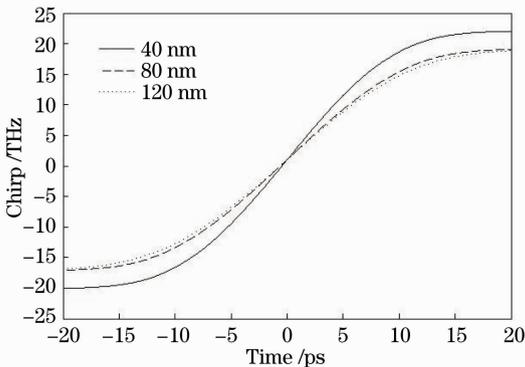


图 4 增益带宽对脉冲啁啾的影响

Fig. 4 Influence of gain bandwidth on pulse chirp

(FWHM)随着增益带宽的改变而发生变化。图 2 显示了在饱和能量  $E_{\text{sat}} = 150$  nJ，腔内群速度色散  $\beta_2^{\text{net}} = 0.004$  ps<sup>-2</sup> 时，增益带宽  $\Omega_g$  以步长为 10 nm 从 40 nm 到 130 nm 变化时的激光器输出脉冲宽度。可以看出，增益带宽的增加导致了脉冲宽度的增加。这种增加是非线性的，在增益带宽较小的时候，脉冲宽度的变化比较明显，而随着增益带宽的逐渐增大，脉冲变化趋势减缓。

为了研究增益带宽对激光器工作状态的影响，从  $\beta_2^{\text{net}} = 0.001$  ps<sup>-2</sup> 线性增加腔内群速度色散，观察激光器的输出脉冲形状。同时适当减小饱和能量以保证激光器输出为单脉冲。在  $\beta_2^{\text{net}} = 0.0015$  ps<sup>-2</sup> 时，激光器的输出如图 3 所示。从图中可以看出，在带宽为 40 nm 时[图 3(a)]，激光器的输出更接近于孤子，而在 50 nm 带宽条件下[图 3(b)]，激光器输出为抛物线形。继续增加  $\beta_2^{\text{net}}$  至 0.002 ps<sup>-2</sup>，带宽为 40 nm 时，激光器的输出为抛物线形。仿真结果表明，较大的增益带宽使激光器可以在更大腔内净色散范围内实现自相似脉冲的输出。

显示了自相似脉冲啁啾随增益的带宽变化，仿真参数与图 3 相同。从图中可以看出，增益带宽对自相似脉冲的啁啾影响主要体现在啁啾线性部分的斜率上。在增益带宽较小时，啁啾具有更大的斜率。随着增益带宽增大，啁啾斜率逐渐减小，而在脉冲边缘部分，啁啾也随之减小。这种变化与 FWHM 相似，在小带宽情况下变化明显。

在  $\beta_2^{\text{net}} = 0.004$  ps<sup>-2</sup> 的条件下，当饱和能量达到 260 nJ 时，激光器的输出为双脉冲。这两个脉冲依然为自相似脉冲，具有抛物线型，如图 5 所示，并且具有相同的脉宽、形状和能量。不同的增益带宽会对激光器输出的抛物线型脉冲对间的相互作用产生影响。

增益带宽为 50 nm 的脉冲对相互作用情况如图 6(a)、(c)所示,对应的脉冲距离分别为 20 ps 和 14 ps。增益带宽为 40 nm 的脉冲对相互作用情况如图 6(b)、(d)所示,对应的脉冲距离分别为 20 ps 和 14 ps。在脉冲距离为 20 ps 时[图 6(a)、(b)],脉冲间的作用力

为排斥力。可以看出,图 6(a)脉冲走离的速度较快,说明脉冲间的相互作用力更大。在脉冲距离为 10 ps 时[图 6(c)、(d)],脉冲间的作用力为吸引力。对比图 6(c)和(d)中脉冲发生碰撞时的距离可以看出,增益带宽为 50 nm 时脉冲间的相互作用力更大。

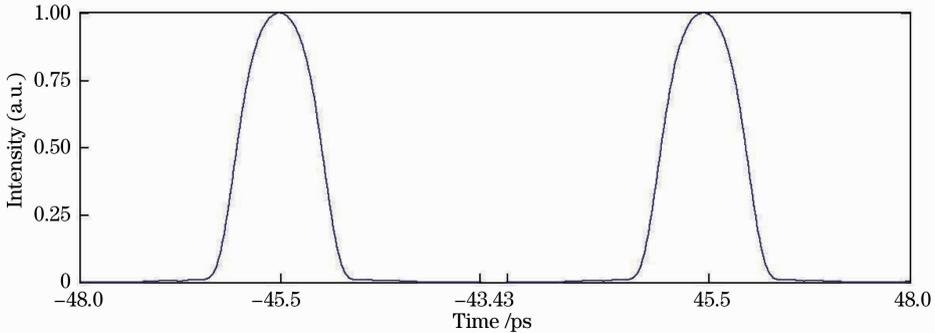


图 5  $\beta_2^{\text{net}}=0.004 \text{ ps}^{-2}$ ,  $E_{\text{sat}}=300 \text{ nJ}$  时激光器输出双脉冲波形

Fig. 5 Output dual-pulse temporal profile with  $\beta_2^{\text{net}}=0.004 \text{ ps}^{-2}$  and  $E_{\text{sat}}=300 \text{ nJ}$

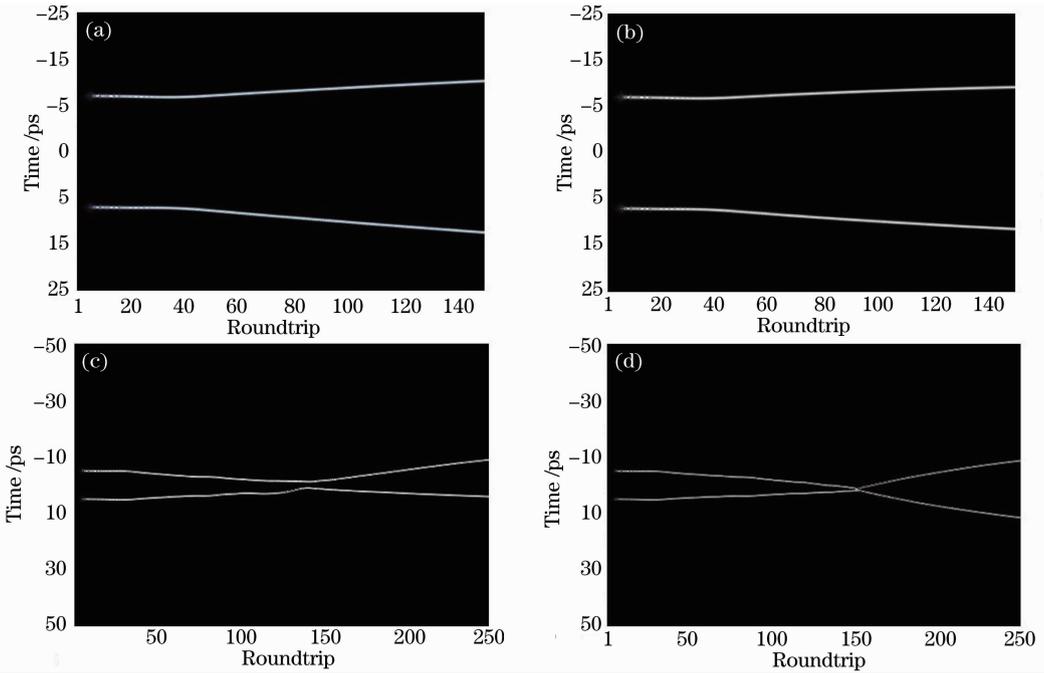


图 6 脉冲间运动轨迹,脉冲距离和带宽分别为(a) 20 ps, 50 nm; (b) 20 ps, 40 nm; (c) 14 ps, 50 nm; (d) 14 ps, 40 nm, respectively

Fig. 6 Pulses evolution trajectory in cavity with pulse distance and bandwidth of (a) 20 ps, 50 nm; (b) 20 ps, 40 nm;

(c) 14 ps, 50 nm; (d) 14 ps, 40 nm, respectively

孤子脉冲间的相互作用是相邻脉冲尾部重叠引起的,但是由于抛物线型脉冲的形状决定了其脉冲在尾部下降很快,相同间隔情况下脉冲的重叠部分相比于孤子脉冲要小得多,因此,在抛物线型脉冲对中一定有其他机制引起其相互作用。文献[13]对脉冲在较大间距下的相互作用进行了研究,将这种情况下的脉冲作用归结为非线性相移的影响。

冲由于其特殊的脉冲形成机制,可以承受很大的非线性作用而不发生波分裂,但是由非线性作用引起的非线性相移还是很大的。在之前的工作中<sup>[11]</sup>,对自相似激光器输出抛物线型脉冲对间的相互作用进行了研究,对于不同色散条件和抽运条件下的脉冲对间的作用进行了观察,发现在抛物线形脉冲对间的作用同样受非线性相移的影响。激光器在增益带宽分别为 40 nm 和 50 nm 时的输出脉冲的轨迹,如图 7(a)、(b)

被动锁模掺镱光纤激光器内产生的抛物线型脉

所示。图 7(c) 为相移对孤子演化轨迹的影响<sup>[13]</sup>，可以看出，图 7(a) 和图 7(c) 中图的孤子 1 存在着相似的运动轨迹。这个结果说明，激光器的输出脉冲在传输中受到非线性相移的影响。而图 7 所显示的脉冲运

动轨迹表明，不同增益带宽下的脉冲所受的非线性相移的大小不同，在较大增益带宽情况下，脉冲所受的非线性相移更强。这个依赖于增益带宽的非线性相移可以用于解释图 6 中脉冲相互作用强度的不同。

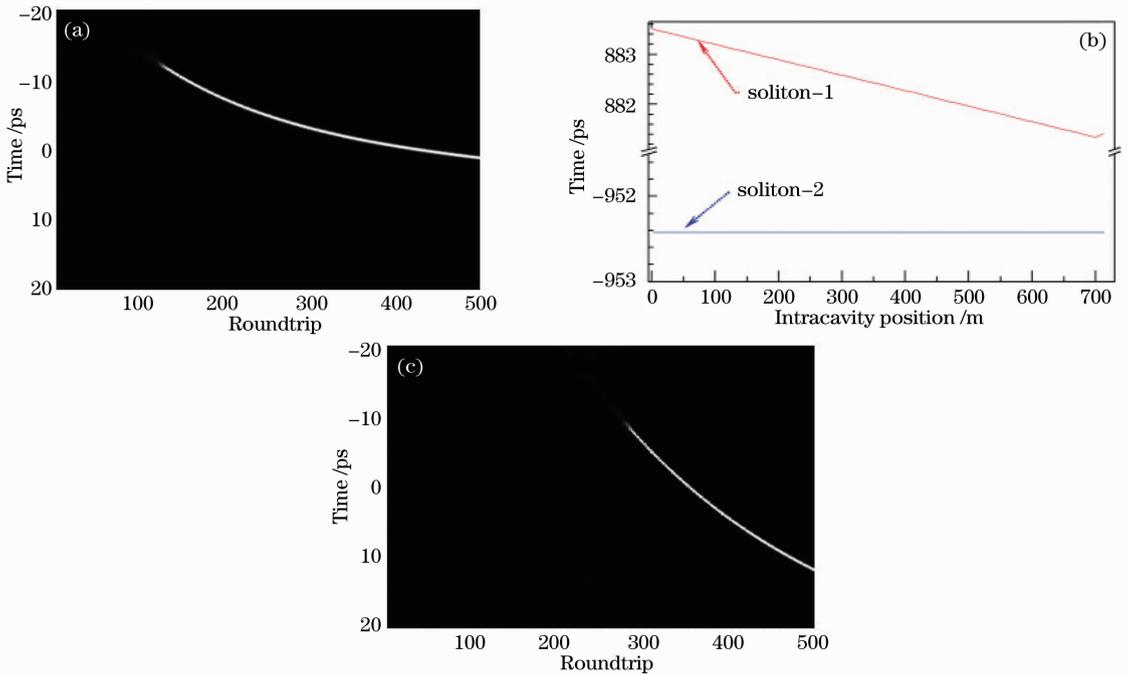


图 7 脉冲在(a)带宽为 40 nm 和(c) 带宽为 50 nm 的运动轨迹；(b) 相移对孤子演化轨迹的影响<sup>[13]</sup>

Fig. 7 Pulse evolution trajectory with bandwidth of (a) 40 nm and (c) 50 nm; (b) influence of phase shift on soliton trajectory<sup>[13]</sup>

## 4 结 论

基于被动锁模光纤激光器的集总模型，仿真研究了增益带宽对被动锁模掺镱光纤激光器输出特性的影响。仿真结果表明，被动锁模掺镱光纤激光器的输出脉冲宽度和激光器运行状态都受到增益带宽的影响。通过线性调制激光器腔内净色散的大小，发现增益带宽在 50 nm 时，激光器从  $\beta_2^{\text{net}} = 0.0015 \text{ ps}^{-2}$  开始，激光器输出为抛物线形，即激光器工作在自相似状态；而在增益带宽为 40 nm 时， $\beta_2^{\text{net}}$  达到  $0.002 \text{ ps}^{-2}$  后，激光器输出才为抛物线形。具有较大增益带宽的被动锁模掺镱光纤激光器的工作在自相似状态下所需要满足的腔内群速度色散范围更大。另外，对不同增益带宽下的激光器输出脉冲对间的相互作用情况进行了仿真。结果显示，较大的增益带宽下脉冲之间的相互作用力更强。

## 参 考 文 献

1 D Anderson, M Desaix, M Karlsson, *et al.*. Wave-breaking-free pulses in nonlinear-optical fibers[J]. J Opt Soc Am B, 1993, 10(7): 1185–1190.

2 K Tamura, M Nakazawa. Pulse compression by nonlinear pulse evolution with reduced optical wave breaking in erbium-doped fiber amplifiers [J]. Opt Lett, 1996, 21(1):68–70.

3 V I Kruglov, A C Peacock, J M Dudley, *et al.*. Self-similar propagation of high-power parabolic pulses in optical fiber amplifiers[J]. Opt Lett, 2000, 25(24): 1753–1755.

4 V I Kruglov, A C Peacock, J D Harvey, *et al.*. Self-similar propagation of parabolic pulses in normal-dispersion fiber amplifiers[J]. J Opt Soc Am B, 2002, 19(3): 461–469.

5 V I Kruglov, A C Peacock, J D Harvey. Exact self-similar solutions of the generalized nonlinear Schrödinger equation with distributed coefficients [J]. Phys Rev Lett, 2003, 90 (11): 113902.

6 Wu Ge, Tian Xiaojian, Gao Bo, *et al.*. Characteristics of soliton evolution in wave-breaking-free regime in a passively mode-locked Yb-doped fiber laser [J]. Chinese Phys Lett, 2011, 28 (9): 094202.

7 A Ruehl, O Prochnow, D Wandt, *et al.*. Dynamics of parabolic pulses in an ultrafast fiber laser [J]. Opt Lett, 2006, 31(18): 2734–2736.

8 V I Kruglov, D Mechin, J D Harvey. All-fiber ring Raman laser generating parabolic pulses [J]. Phys Rev A, 2010, 81 (2): 023815.

9 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.

10 A Chong, H Liu, B Nie, *et al.*. Pulse generation without gain-bandwidth limitation in a laser with self-similar evolution [J]. Opt Express, 2012, 20(13): 14213–14220.

- 11 Wang Dashuai, Wu Ge, Gao Bo, *et al.*. Interaction of a parabolic-shaped pulse pair in a passively mode-locked Yb-doped fiber laser[J]. Chin Phys B, 2013, 22(1): 014207.
- 12 Lü Hua, Zhang Qiaofen, Wu Xiao. Research of self-similar region in a dispersion-decrease fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0619002.
- 13 X M Liu. Interaction and motion of solitons in passively-mode-locked fiber lasers[J]. Phys Rev A, 2011, 84(5): 053828.
- 吕 华, 张巧芬, 吴 肖. 色散渐减光纤中自相似脉冲传输区域的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0619002.

栏目编辑: 宋梅梅