

非线性偏振旋转锁模光纤激光器幅值稳定性 模拟研究

李 超^{1,2} 赵 磊¹ 黄志华¹ 林宏奂¹ 邓 颖^{1*} 黄小军¹ 朱启华¹

(¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

(²中国工程物理研究院研究生部, 四川 绵阳 621900)

摘要 基于光纤中的耦合波方程和琼斯矩阵建立了非线性偏振旋转锁模光纤激光器的数值模型, 模拟研究了抽运激光功率抖动和腔长抖动对锁模激光器输出脉冲幅值抖动的影响。结果表明, 抽运激光功率 P_p 的抖动对锁模激光器脉冲幅值抖动影响较大, 幅值抖动随着 P_p 抖动的增大而增大, 当抽运功率有 $\pm 3\%$ 的随机抖动时, 锁模脉冲幅值的均方根(RMS)值达到 0.82%, 峰-谷(P-V)值达到 2.84%; 而腔长抖动对脉冲幅值抖动影响较小, 但腔长抖动会带来较大的脉冲时间抖动。因此要得到极低时间抖动和幅值抖动的锁模脉冲, 必须对抽运激光功率和腔长的抖动加以控制。

关键词 激光器; 锁模光纤激光器; 非线性偏振旋转; 幅值抖动

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0202007

Simulation Study on Amplitude Stability in Nonlinear Polarization Rotation Mode-Locked Fiber Laser

Li Chao^{1,2} Zhao Lei¹ Huang Zhihua¹ Lin Honghuan¹

Deng Ying¹ Huang Xiaojun¹ Zhu Qihua¹

(¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

(²Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract A numerical model for nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser is established based on coupled wave equations and Jones matrix. The numerical results show that the power jitter of pump laser seriously affects amplitude jitter of mode-locked fiber laser. The root mean square (RMS) value of mode-locked pulse is 0.82%, and peak-to-valley value is 2.84% when random jitter of pump power is $\pm 3\%$. Cavity length jitter has less effect on amplitude jitter. However, cavity length jitter leads to large timing jitter. So in order to get mode-locked pulses with very low timing jitter and amplitude jitter, pump laser power jitter and cavity length jitter must be controlled.

Key words lasers; mode-locked fiber laser; nonlinear polarization rotation; amplitude jitter

OCIS codes 140.3510; 140.4050; 140.3430; 140.3560

1 引 言

被动锁模光纤激光器因其稳定性高、结构简单、体积小、成本低、免维护、易于产生超短脉冲等诸多优点而广泛应用于超连续谱产生^[1]、光频率梳^[2]、光

采样系统^[3,4]等领域。目前, 被动锁模技术主要有非线性偏振旋转(NPR)锁模^[5]、可饱和吸收体锁模技术^[6~9]和“8”字腔锁模^[10]。由于光采样示波器、频率梳^[11,12]等要求锁模光纤激光器具有极低时间

收稿日期: 2012-09-21; 收到修改稿日期: 2012-10-21

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2011B0401063)资助课题。

作者简介: 李 超(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事锁模光纤激光器方面的研究。E-mail: liesx@sina.com

导师简介: 朱启华(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事超短脉冲激光器方面的研究。E-mail: qihzh@163.com

* 通信联系人。E-mail: tjudengying@sina.com

抖动和幅值抖动,所以近几年来低抖动锁模光纤激光器成为锁模激光器的一个研究热点。2007年,Chen等^[13]利用简单的NPR锁模技术得到重复频率为194 MHz,脉宽为167 fs的锁模脉冲,时间抖动仅有18 fs(积分区间[1 kHz,10 MHz]),幅值抖动也只有0.003%(积分区间[1 kHz,10 MHz])。2008年Chen等^[14]又在NPR锁模光纤激光器中加入了腔长反馈和激光二极管(LD)反馈装置,获得200 MHz的种子光,其时间抖动也达到27 fs[1 kHz,10 MHz],幅值抖动达到0.0124% [10⁻² Hz,10 MHz]。2010年Wu等^[12]利用单臂碳纳米管锁模激光器研究了合理的腔内损耗可以一定程度地降低时间抖动和幅值抖动。但是目前并没有关于抽运激光器功率抖动和腔长抖动与锁模脉冲抖动之间关系的相关报道,对于两者对锁模脉冲抖动的具体影响,理论上并不明确。本文模拟研究了NPR锁模光纤激光器输出锁模脉冲抖动性与抽运激光功率和腔长抖动的关系,结果表明,较高的抽运激光功率抖动会严重增加锁模脉冲的幅值抖动,而腔长变化对脉冲幅值抖动影响较小,但会增加脉冲的时间抖动。

2 理论模型

NPR锁模光纤激光器结构如图1所示。激光脉冲经过偏振分束棱镜(PBS),产生线偏振光,依次经过隔离器(ISO)和λ/4波片(记为波片1),产生椭圆偏振光,椭圆偏振光经过掺铒光纤放大,由于激光脉冲所产生的非线性相移与激光强度相关,脉冲峰值处和脉冲边缘就会产生不同的附加相位,这样在一个脉冲中前后沿的偏振态将不同于峰值处的偏振态。通过调节λ/2波片(记为波片2)和λ/4波片(记为波片3),使得脉冲峰值处输出较窄脉冲,另一部分继续在谐振腔中放大。脉冲经过数次循环后逐渐

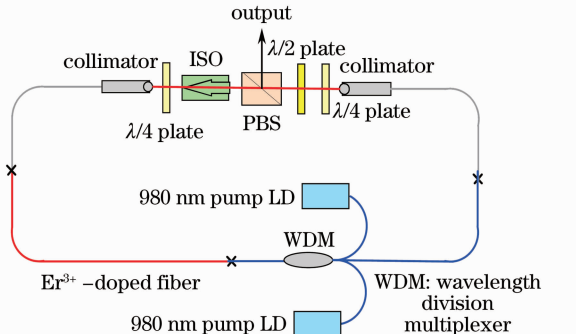


图1 NPR锁模光纤激光器结构图

Fig. 1 Schematic of NPR mode-locked fiber laser

变窄,最后形成稳定的锁模脉冲输出。

以PBS的反射和透射方向为两个坐标轴,建立x-y坐标系,以光脉冲的传播方向为z轴。光脉冲 $\begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix}$ 在光纤中传播可用耦合波方程描述^[15]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_x}{\partial z} = & -\beta_{1x} \frac{\partial A_x}{\partial t} - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} + \frac{g}{2} A_x + \\ & i\gamma \left(|A_x|^2 + \frac{2}{3} |A_y|^2 \right) A_x + \\ & \frac{i\gamma}{3} A_x^* A_y^2 \exp(-2i\Delta\beta z), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_y}{\partial z} = & -\beta_{1y} \frac{\partial A_y}{\partial t} - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} + \frac{g}{2} A_y + \\ & i\gamma \left(|A_y|^2 + \frac{2}{3} |A_x|^2 \right) A_y + \\ & \frac{i\gamma}{3} A_y^* A_x^2 \exp(2i\Delta\beta z), \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\Delta\beta = \beta_{0x} - \beta_{0y}$, β_2 是群速度色散(GVD)参量, γ 为非线性系数。对于低双折射光纤有 $\beta_{1x} \approx \beta_{1y} \approx \beta_1$ 。令 $T \equiv t - \beta_1 z$, $A_x = u \exp\left(\frac{-i\Delta\beta z}{2}\right)$, $A_y = v \exp\left(\frac{i\Delta\beta z}{2}\right)$,则(1)式和(2)式改写为^[15]

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial z} = & \frac{i\Delta\beta}{2} u - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + \frac{g}{2} u + \\ & i\gamma \left(|u|^2 + \frac{2}{3} |v|^2 \right) u + \frac{i\gamma}{3} u^* v^2, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial z} = & -\frac{i\Delta\beta}{2} v - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial T^2} + \frac{g}{2} v + \\ & i\gamma \left(|v|^2 + \frac{2}{3} |u|^2 \right) v + \frac{i\gamma}{3} v^* u^2, \end{aligned} \quad (4)$$

式中增益 $g = g(t) \left(1 + T_2^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)$, $T_2 = \frac{2\pi}{ck^2 \Delta\lambda_g}$, $\Delta\lambda_g$ 为增益带宽,在本文中锁模脉冲为高重复频率皮秒脉冲,故 $g(t) = \frac{g_0}{1 + P_{av}(t)/P_S^{\text{sat}}}$ 。 g_0 为小信号增益,

$g_0 = \frac{\Gamma_s \sigma_s \Gamma_p \sigma_p P_p}{a_p h \nu_p}$, Γ_s 是信号光重叠因子,表示信号光在光纤掺杂区内所占比例, σ_s 为信号光频率的跃迁截面, Γ_p 是抽运光重叠因子,表示抽运光在光纤掺杂区内所占比例, σ_p 为抽运光频率的跃迁截面, P_p 为抽运光功率, a_p 为光纤中抽运光的模场面积, ν_p 为抽运光频率。可以得到 $g_0 = AP_p$, $A = \frac{\Gamma_s \sigma_s \Gamma_p \sigma_p}{a_p h \nu_p}$,即小信号增益与抽运光功率成正比。

$P_{av}(t)$ 为平均功率, P_S^{sat} 为饱和功率。光脉冲 $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$ 在

光纤中传播可由(3),(4)式计算,在光纤之外可再将 $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$ 转化为 $\begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix}$ 。

PBS和波片可用琼斯矩阵表示。对于PBS,由于反射方向即为 x 轴,所以可将PBS反射光的琼斯矩阵表示为

$$\mathbf{G}_{\text{PBS}}^r = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

而PBS透射光的琼斯矩阵则为

$$\mathbf{G}_{\text{PBS}}^t = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

$\lambda/2$ 波片的琼斯矩阵为

$$\mathbf{G}_{1/2}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos^2\theta - \sin^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ 2\sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta - \cos^2\theta \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$\lambda/4$ 波片的琼斯矩阵为

$$\mathbf{G}_{1/4}(\theta) = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 - i\cos 2\theta & -i\sin 2\theta \\ -i\sin 2\theta & 1 + i\cos 2\theta \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中 θ 是波片快轴与 x 轴的夹角。则光脉冲经过空间器件可表示为

$$\begin{pmatrix} A_x^{\text{inf}} \\ A_y^{\text{inf}} \end{pmatrix} = \mathbf{G}_{1/4}(\theta_1) \mathbf{G}_{\text{PBS}}^t \mathbf{G}_{1/2}(\theta_2) \mathbf{G}_{1/4}(\theta_3) \begin{pmatrix} A_x^{\text{in}} \\ A_y^{\text{in}} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

式中 $\begin{pmatrix} A_x^{\text{in}} \\ A_y^{\text{in}} \end{pmatrix}$ 表示进入空间器件的光场, $\begin{pmatrix} A_x^{\text{inf}} \\ A_y^{\text{inf}} \end{pmatrix}$ 表示

穿过空间器件后进入光纤的光场。输出光场可表示为

$$\begin{pmatrix} A_x^{\text{out}} \\ A_y^{\text{out}} \end{pmatrix} = \mathbf{G}_{\text{PBS}}^r \mathbf{G}_{1/2}(\theta_2) \mathbf{G}_{1/4}(\theta_3) \begin{pmatrix} A_x^{\text{in}} \\ A_y^{\text{in}} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

建立以上数学模型,只要设定初始脉冲和各光学器件的参数,光脉冲在谐振腔中循环一定的次数至脉冲稳定即可得到锁模脉冲。

3 数值模拟结果与分析

参数设置:高掺杂掺铒光纤 0.5 m,GVD 参量 $\beta_2=11 \text{ ps}^2/\text{km}$;单模光纤 0.22 m,GVD 参量 $\beta_2=-15 \text{ ps}^2/\text{km}$;光纤非线性系数 $\gamma=0.003 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$;小信号增益系数 $g_0=3.85 \text{ m}^{-1}$;饱和功率 $P_S^{\text{sat}}=0.1 \text{ W}$;增益带宽 $\Delta\lambda_g=45 \text{ nm}$ 。腔内净色散为 0.0022 ps^2 ,处于正色散区。忽略光纤耦合衰减,各波片衰减10%。初始脉冲设为幅值为 0.01 W 的高斯脉冲,这样不会影响最终结果,只是减小计算量。波片1的角度设为 $\theta_1=45^\circ$;适当调节波片2和波片3可得到稳定的锁模脉冲。

当 $\theta_2=0^\circ, \theta_3=7.8^\circ$ 时,得到如图2所示的一组稳定的脉冲输出。

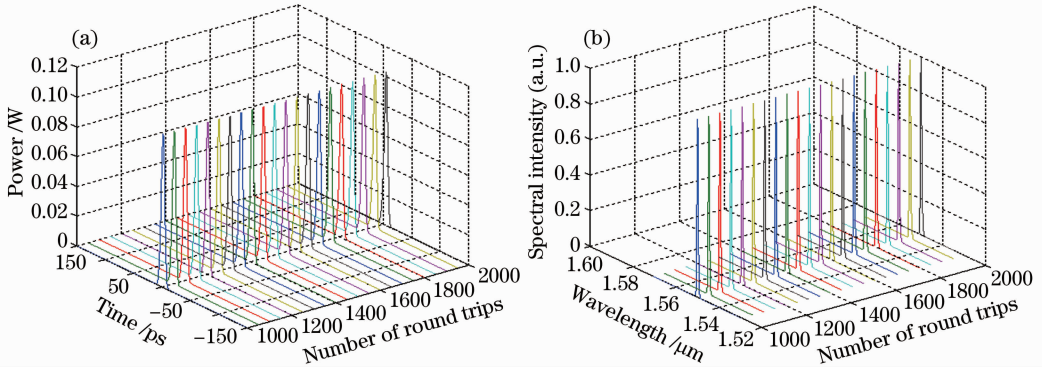


图2 锁模激光器稳定输出(a)脉冲时域演化图和(b)光谱时域演化图

Fig. 2 Mode-locked laser in time-domain. (a) Pulse evolution; (b) spectrum evolution

3.1 抽运功率变化对锁模脉冲的影响

在原有参数的基础上,当脉冲循环1000次稳定后,通过改变抽运功率的大小来研究抽运功率抖动对锁模脉冲幅值抖动的影响。因为 $P_p = g_0/A$,所以在模拟计算中 g_0 大小的改变即对应着抽运功率的改变。考虑到实际情况,普通抽运激光功率长时间抖动一般在 $\pm 3\%$ 以内,多数在 $1\% \sim 2\%$ 之间,所以选取 g_0 抖动为 $\pm 1\%、\pm 2\%$ 和 $\pm 3\%$ 。抽运功率 P_p 每一圈加入最大抖动为 $\pm 1\%$ 的随机抖动,循环

50次,可获得锁模脉冲时域演化图,如图3(a)所示;当最大抖动为 $\pm 2\%、\pm 3\%$ 时可得到相应的锁模脉冲时域演化图,如图3(b)、(c)所示。把未加入功率抖动和加入功率抖动得到的脉冲峰值时域演化图进行对比可以得到图3(d)。

从图中可以看出脉冲幅值抖动随着抽运功率抖动的增大而增大。当抽运功率 P_p 加入 $\pm 3\%$ 的随机抖动时,脉冲幅值稳定性明显下降。

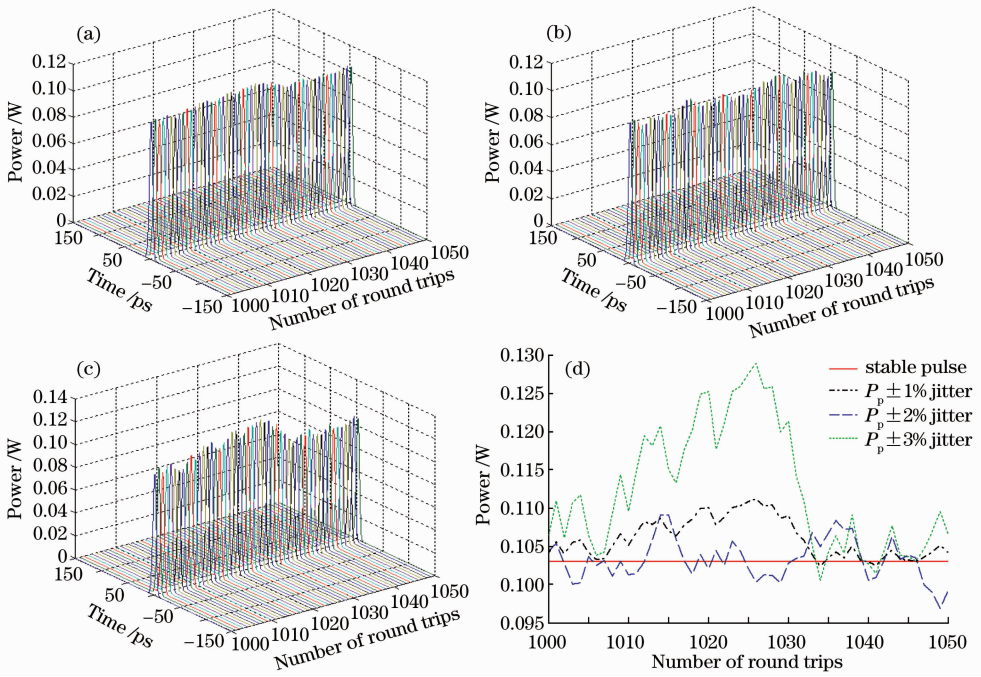


图 3 抽运功率 P_p 加入随机抖动得到的锁模脉冲时域演化图。(a)随机抖动 $\pm 1\%$ ；(b)随机抖动 $\pm 2\%$ ；(c)随机抖动 $\pm 3\%$ ；(d)稳定脉冲和加入 P_p 抖动后得到的脉冲峰值功率时域演化对比图

Fig. 3 Pulse evolution graph in time-domain with random jitter of pump power. (a) Random jitter is $\pm 1\%$; (b) random jitter is $\pm 2\%$; (c) random jitter is $\pm 3\%$; (d) pulse power evolution graph in time-domain with and without pump power jitter

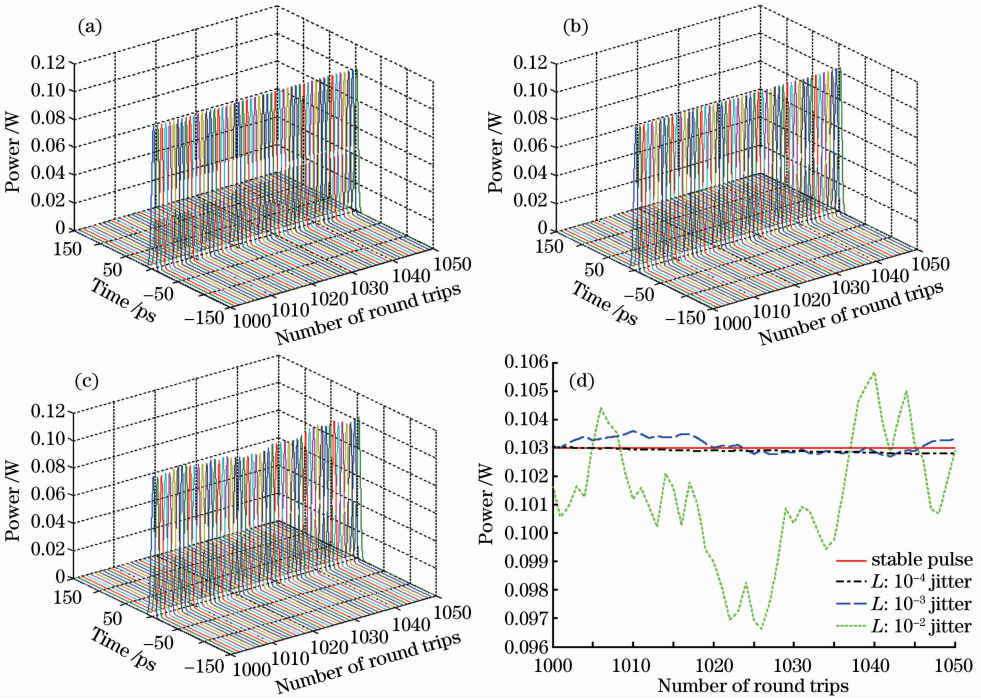


图 4 谐振腔光纤长度随机变化时的脉冲时域演化图。(a)腔长随机变化 $\pm 10^{-4}$ ；(b)腔长随机变化 $\pm 10^{-3}$ ；(c)腔长随机变化 $\pm 10^{-2}$ ；(d)表示加入腔长 L 抖动与没有抖动时的脉冲幅值对比图

Fig. 4 Pulse evolution graph in time-domain with random jitter of cavity length. (a) Random jitter is $\pm 10^{-4}$; (b) random jitter is $\pm 10^{-3}$; (c) random jitter is $\pm 10^{-2}$; (d) pulse power evolution graph in time-domain with and without cavity length jitter

3.2 腔长变化对锁模脉冲的影响

激光器腔长的变化主要由温度变化和气流等因素引起,气流扰动对光纤长度影响较小,固定光纤即可忽略气流对腔长的影响。本文中只考虑温度变化引起的腔长抖动。普通光纤的热膨胀系数为 $(2\sim 4)\times 10^{-5}$,当光纤温度变化 $\pm 20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,带来的腔长抖动在 $\pm 4\times 10^{-4}\sim \pm 8\times 10^{-4}$,即温度引起的腔长抖动在 10^{-3} 量级以内。当脉冲循环1000次稳定后,腔长随机变化 $\pm 10^{-4}$ 、 $\pm 10^{-3}$ 、 $\pm 10^{-2}$ 可得到锁模脉冲因腔长变化带来的影响,如图4所示。

可以看出,腔长抖动对脉冲幅值抖动的影响较小。当光纤温度变化 $\pm 20\text{ }^\circ\text{C}$,即腔长最大变化 10^{-3} 时,脉冲幅值抖动依然较小,脉冲峰-谷(P-V)值仅有0.09%(见表1);只有腔长抖动增大到 10^{-2} 时,才能对脉冲幅值产生明显的影响。而这主要是由于增益光纤长度变化带来的影响。

3.3 结果分析

分别计算以上各种情况下脉冲的均方根值(RMS)和P-V值,并将计算结果列入表1。

表1 加入抽运功率抖动和腔长抖动形成锁模脉冲的
RMS和P-V值对比

Table 1 RMS and P-V value of mode-locked pulses with
pump power jitter and cavity length jitter

Jitter type	RMS	P-V
$(1\pm 1\%)P_p$	0.0026	0.0089
$(1\pm 2\%)P_p$	0.0026	0.0122
$(1\pm 3\%)P_p$	0.0082	0.0284
$(1\pm 10^{-4})L$	0.000063	0.0002
$(1\pm 10^{-3})L$	0.00025	0.0009
$(1\pm 10^{-2})L$	0.0022	0.0090

从表1中容易看出抽运功率 P_p 抖动带来的脉冲幅值抖动明显大于由于腔长抖动带来的脉冲幅值抖动。并且随着 P_p 抖动的增大脉冲幅值稳定性也在变差。腔长抖动主要受温度影响, $\pm 20\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度变化对应 10^{-3} 的腔长抖动,并且实际环境温度变化要小于此值,可以认为温度变化引起的腔长抖动在 $10^{-4}\sim 10^{-3}$ 量级,所以一般由于温度引起的腔长抖动带来的锁模脉冲幅值抖动很小,可以忽略不计。但是,腔长的抖动(温度抖动)是引起脉冲时间抖动(频率稳定性)的重要因素,表达式为

$$\Delta t = \frac{n\Delta L}{c} = \frac{nL}{c}\alpha\Delta K, \quad (11)$$

式中 Δt 为时间抖动, n 为折射率, L 为谐振腔长度, c 为真空中光速, α 为光纤热膨胀系数, ΔK 为变化温度。从(11)式可以看出, Δt 与腔长、热膨胀系数、变

化温度成正比,即降低以上三个因素都可以降低锁模激光器的时间抖动。在谐振腔确定时,时间抖动只与温度变化成正比。可以估算,温度每变化 $1\text{ }^\circ\text{C}$,时间抖动为 $80\sim 160\text{ fs}$ 。对于时间抖动小于 100 fs 的高稳定性锁模光纤激光器而言,激光器谐振腔的温度变化要低于 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 才可能满足要求。从以上分析中可以知道:要控制锁模激光器脉冲幅值抖动,必须通过反馈控制对抽运激光功率加以控制;而要控制锁模脉冲的时间抖动,则需通过恒温控制来减小腔长的抖动,同时应对光纤器件加以固定,减小空气扰动。

4 结 论

基于耦合波方程和琼斯矩阵建立了研究NPR锁模光纤激光器的数值模型,模拟计算得到稳定的锁模脉冲输出。基于此稳定脉冲,模拟研究了抽运激光功率抖动和腔长抖动对锁模脉冲幅值抖动的影响,结果表明,抽运激光器功率的抖动对锁模激光器脉冲幅值抖动影响较大,锁模脉冲幅值抖动随着抽运功率抖动的增大而增大,当 P_p 抖动降低到 $\pm 1\%$ 时,RMS值降至0.26%,P-V值降至0.89%。而腔长抖动对脉冲幅值抖动影响较小,一般腔长变化 10^{-4} ,锁模脉冲的RMS值仅有 6.3×10^{-5} ,而P-V值仅有 2.0×10^{-4} ,但会带来较大的时间抖动。所以要得到低幅值抖动和低时间抖动的锁模脉冲,必须对抽运激光的功率和温度的稳定性加以控制。

参 考 文 献

- Zhao Lei, Wang Jianjun, Lin Honghuan *et al.*. Experimental research of high conversion efficiency all-fiber supercontinuum source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(8): 1143~1147
- 赵磊, 王建军, 林宏免等. 全光纤高效超连续谱光源实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(8): 1143~1147
- Brian R. Washburn, Scott A. Diddams, Nathan R. Newbury. Phase-locked erbium-fiber-laser-based frequency comb in the near infrared[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(3): 250~252
- Thomas Hochrein, Rafal Wilk, Michael Mei *et al.*. Optical sampling by laser cavity tuning[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(2): 1613~1617
- Zhang Jianguo, Liu Yuanshan. Development of ultra-wide bandwidth all-optical sampling oscilloscope equipment[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 487~504
- 张建国, 刘元山. 研制超宽带全光取样示波器设备[J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 487~504
- J. L. Morse, J. W. Sickler, J. Chen *et al.*. High repetition rate, high average power, femtosecond erbium fiber ring laser [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2009. CML1
- J. J. McFerran, L. Nenadovic, W. C. Swann *et al.*. A passively mode-locked fiber laser at $1.54\text{ }\mu\text{m}$ with a fundamental repetition frequency reaching 2 GHz [J]. *Opt. Express*, 2007,

15(20): 13155~13166

- 7 Jeffrey W. Nicholson, David J. DiGiovanni. High-repetition-frequency low-noise fiber ring lasers mode-locked with carbon nanotubes[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(24): 2123~2125
- 8 Yong-Won Song, Sung-Yeon Jang, Won-Suk Han *et al.*. Graphene mode-lockers for fiber lasers functioned with evanescent field interaction[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(5): 051122
- 9 Liu Jiang, Wu Sida, Wang Ke *et al.*. Passively mode-locked and Q-switched Yb-doped fiber laser with graphene-based saturable absorber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0802001
刘江, 吴思达, 王科等. 基于石墨烯可饱和吸收体的被动锁模、被动调Q掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0802001
- 10 Ma Haiquan, Liu Chang, Zhao Wei *et al.*. Figure-of-eight cavity Yb³⁺-doped fiber mode-locked lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1173~1177
马海全, 刘畅, 赵卫等. 8字形腔锁模掺Yb³⁺光纤激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1173~1177
- 11 Jian Chen, Jason W. Sickler, Peter Fendel *et al.*. Generation of low-timing-jitter femtosecond pulse trains with 2 GHz repetition rate via external repetition rate multiplication[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(9): 959~961
- 12 Kan Wu, Jia Haur Wong, Ping Shum *et al.*. Timing-jitter reduction of passively mode-locked fiber laser with a carbon nanotube saturable absorber by optimization of cavity loss[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(7): 1085~1087
- 13 Jian Chen, Jason W. Sickler, Erich P. Ippen *et al.*. High repetition rate, low jitter, low intensity noise, fundamentally mode-locked 167 fs soliton Er-fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(11): 1566~1568
- 14 Jian Chen, Jason W. Sickler, Peter Fendel *et al.*. Generation of low-timing-jitter femtosecond pulse trains with 2 GHz repetition rate via external repetition rate multiplication[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(9): 959~961
- 15 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. London: Academic Press, 2001. 206~207
- 16 Govind P. Agrawal. *Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. London: Academic Press, 2001. 161~164, 168~170

栏目编辑: 宋梅梅