

基于种子光特性优化的光纤放大器理论分析

张家瑞¹, 王 蓓^{1,2}, 王国政¹, 白笑羽¹, 贾苏蒙¹, 张永熙¹, 郭欣宇¹, 李婉婷¹, 岳 鑫³

(1. 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022; 2. 鹏城实验室, 广东 深圳 518000;

3. 西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘 要:种子光特性直接影响放大脉冲的特性,为获得高质量放大脉冲输出,文章对基于 SESAM 被动锁模光纤放大器中种子光的特性进行优化模拟。理论分析了锁模光纤激光器的单模光纤长度、增益光纤长度、滤波器带宽以及输出耦合比的变化对种子光特性的影响,以及种子光携带的啁啾对放大脉冲的影响。综合色散和非线性效应等对种子光的影响,得到各项参数的最优值,并进行两级放大模拟,最终获得脉冲宽度为 13.53 ps、光谱宽度为 11.5 nm、平均功率为 6.1 W 的高质量放大脉冲。

关键词:SESAM; 被动锁模; 光纤放大器; 啁啾

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.12.008

Theoretical analysis of fiber amplifier based on optimization of seed optical characteristics

ZHANG Jia-rui¹, WANG Ji^{1,2}, WANG Guo-zheng¹, BAI Xiao-yu¹, JIA Su-meng¹,

ZHANG Yong-xi¹, GUO Xin-yu¹, LI Wan-ting¹, YUE Xin³

(1. College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518000, China; 3. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: The characteristics of seed light directly affect the characteristics of amplifying pulse. In order to obtain high quality amplifying pulse output, the seed light characteristics of passive mode-locked fiber amplifier based on SESAM are optimized and simulated in this paper. The influences of the length of the single-mode fiber, the length of the gain fiber, the filter bandwidth and the output coupling ratio of the mode-locked fiber laser on the optical properties of the seed and the effect of chirp carried by the seed light on the amplification pulse are analyzed theoretically. The optimal values of various parameters are obtained by integrating the effects of dispersion and nonlinear effects on the seed light, and the two-stage amplification simulation is carried out. Finally, a high-quality amplification pulse with a pulse width of 12.79 ps, a spectral width of 13 nm and an average power of 6.1 W is achieved.

Keywords: SESAM; passively mode-lock; optical fiber amplifier; chirp

1 引 言

锁模技术是获得脉冲激光的常用手段。常用的锁模方法有基于可饱和吸收体(SA)^[1-2]或半导体

可饱和吸收镜(SESAM)^[3]锁模、非线性偏振旋转锁模^[4]和非线性光纤环形镜锁模^[5]。其中 SESAM 由于自身的低饱和通量和可靠性等优点^[6],成为了常

基金项目:吉林省科技发展计划项目(No. 20180201033GX; No. 20190302125GX; No. 20200501006GX)资助。

作者简介:张家瑞(1996-),男,硕士研究生,主要从事锁模光纤激光器方面的研究。

通讯作者:王 蓓(1978-),女,博士,副教授,主要从事微米锁模光纤激光器及放大器方面的工作。E-mail: jijj_w@163.com

收稿日期:2021-01-26

用的锁模器件。SESAM 被动锁模光纤激光器可以输出重复频率为 kHz 量级至 GHz 量级的脉冲激光^[7-13],对应的工作波段为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ ^[14]。在实际应用中,通常要用到高功率脉冲激光,所以需要对锁模脉冲进行功率放大。主振荡功率放大器(MOPA)由于保留了光纤激光器的全光纤结构等优良特性,因此成为常用的功率放大手段。

在 MOPA 系统中,作为种子光源的锁模光纤激光器所输出的优质脉冲是获得高质量放大脉冲的关键,锁模光纤激光器腔内色散、非线性效应、增益及损耗等,均会对其输出光脉冲的时域和频域特性造成影响,合理控制腔内色散、非线性效应、增益及损耗等可以对种子光进行优化。

本文从非线性薛定谔方程出发,理论模拟了锁模光纤激光器腔内单模光纤长度、增益光纤长度、光栅输出耦合比以及滤波器带宽对种子光特性的影响,并分析了种子光携带的啁啾对放大后脉冲特性

的影响。依据模拟设定的参数范围,综合色散和非线性效应等对种子光脉冲特性的影响,得到输出平滑光谱的种子光的各项最佳参数值,并对其进行两级放大模拟,最终获得宽光谱带宽、平滑光谱轮廓的高质量放大脉冲输出。宽光谱光源在频率度量学、光谱扫描学、光学采样以及超短脉冲的压缩等领域有着广泛的应用。

2 理论分析

图 1 为 MOPA 光纤激光器结构图。种子光部分以 SESAM 作为锁模器件,掺镱增益光纤(Yb)作为工作物质,LD 的输出光由波分复用器(WDM)直接耦合到谐振腔内,带通滤波器(BPF)作为滤波器件,布拉格光纤光栅(FBG)作为波长选择器件。光纤放大器部分以 LD 作为泵浦源,通过合束器(combiner)将泵浦光、种子光耦合进增益光纤内,经过对种子光的两级放大,由隔离准直器输出脉冲激光。

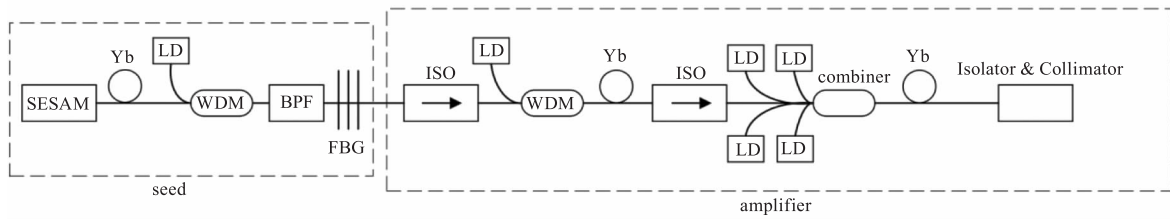


图 1 MOPA 锁模光纤激光器结构图

Fig. 1 structure of MOPA mode-locked fiber laser

激光脉冲在光纤中的传播遵循含有二阶色散的非线性薛定谔方程:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + i \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma |A|^2 A - \frac{1}{2} \alpha A \quad (1)$$

其中,单模光纤折射率的变化可以视为微扰:

$$\Delta n = n_2 |E|^2 + \frac{i\hat{\alpha}}{2k_0} \quad (2)$$

但是当光脉冲在增益光纤中传输时,折射率的变化需要加上稀土离子的电极化率 χ_d :

$$\Delta n = n_2 |E|^2 + \frac{i\hat{\alpha}}{2k_0} + \frac{\chi_d}{2n} \quad (3)$$

此外,还需要考虑由增益所引起的带宽限制。所以,增益光纤的群速度色散 β_2^{eff} 可表示为:

$$\beta_2^{\text{eff}} = \beta_2 + igT_2^2 \quad (4)$$

式中, β_2^{eff} 是复数参量,虚部来自稀土离子提供的增益,称为增益色散,来源于增益对频率的依赖性。考虑到增益饱和效应,增益系数表示为:

$$g = \frac{g_0}{1 + E_p/E_{\text{sat}}} \quad (5)$$

因此,脉冲在稀土掺杂的增益光纤中传播时,遵循 Ginzburg-Landau 方程:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + i \frac{1}{2} (\beta_2 + igT_2^2) \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma |A|^2 A + \frac{1}{2} (g - \alpha) A \quad (6)$$

等式左边第二项代表二阶色散项,第三项代表三阶色散项;等式的右边顺次代表非线性效应项、增益和损耗项。我们利用分步傅里叶法来对非线性薛定谔方程和 Ginzburg-Landau 方程进行求解,数值模拟所用参数如表 1 所示。

表1 被动锁模光纤放大器实验数值模拟参数表

Tab. 1 Parameter table of numerical simulation for passive mode locked fiber amplifier experiment

相关参数	数值
锁模光纤激光器中增益光纤色散系数/(ps · nm ⁻¹ · km ⁻¹)	-35.905
锁模光纤激光器中单模光纤色散系数/(ps · nm ⁻¹ · km ⁻¹)	-38
锁模光纤激光器中增益光纤模场直径/μm	4.4
锁模光纤激光器中单模光纤模场直径/μm	5.9
半导体可饱和吸收镜调制深度/%	36
半导体可饱和吸收镜饱和和通量/(μJ · cm ⁻²)	30
半导体可饱和吸收镜非饱和损耗/%	10
半导体可饱和吸收镜弛豫时间/ps	15
预放大级增益光纤色散系数/(ps · nm ⁻¹ · km ⁻¹)	-35.905
预放大级增益光纤模场直径/μm	4.4
主功率放大级增益光纤色散系数/(ps · nm ⁻¹ · km ⁻¹)	-26.6679
主功率放大级增益光纤模场直径/μm	22.2

3 模拟结果

3.1 锁模光纤激光器中单模光纤长度变化对输出脉冲的影响

单模光纤长度的变化会影响腔内色散,进而对输出脉冲造成影响。图2给出在滤波器带宽为20 nm,单模光纤长度为5 m、6.5 m和8 m时,锁模光纤激光器对应的时域和频域输出。从图2(a)、图2(b)可以看出,当单模光纤长度由5 m增加到8 m,脉冲宽度由9.39 ps增加到了16.01 ps,光谱宽度由5.16 nm减小到了3.98 nm,脉冲携带的啁啾由1.81 ps/nm增加到4.02 ps/nm。这是因为单模光纤长度的增加,使腔内色散逐渐增大,脉冲逐渐展宽,脉冲峰值功率降低,从而削弱了腔内的非线性效应,光谱逐渐变窄。图2表明,单模光纤长度不宜过长,防止脉冲过度展宽。

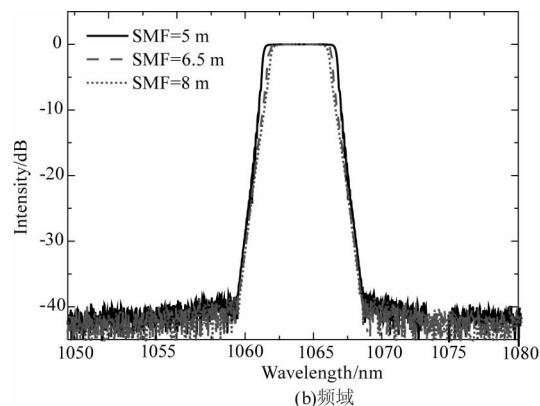
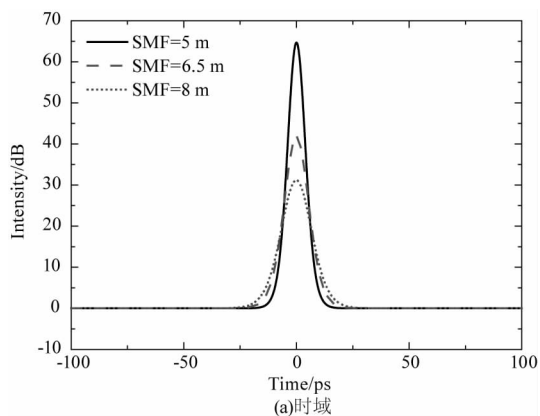


图2 单模光纤长度对 SESAM 锁模光纤激光器输出脉冲的时域和频域特性的影响

Fig. 2 Influence of single mode fiber length on time domain and frequency domain characteristics of SESAM mode locked fiber laser

3.2 锁模光纤激光器中增益光纤长度变化对输出脉冲的影响

图3给出在滤波器带宽为20 nm时,不同增益光纤长度对激光器输出脉冲特性的影响。当增益光纤长度为0.14 m、0.17 m和0.20 m时,由于峰值功率的逐渐增加导致非线性效应逐渐增强。

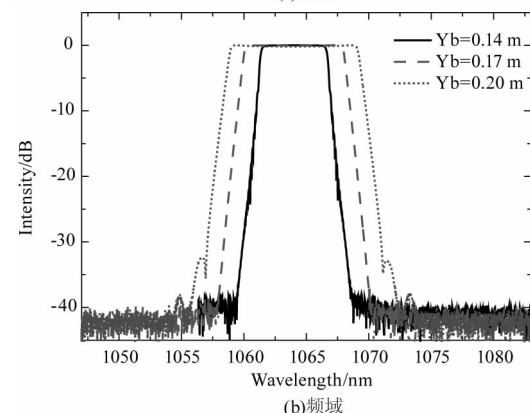
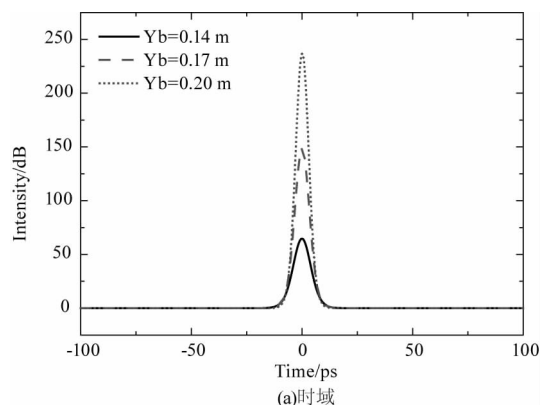


图3 增益光纤长度对 SESAM 锁模光纤激光器输出脉冲的时域和频域特性的影响

Fig. 3 Influence of gain fiber length on time domain and frequency domain characteristics of output pulse of SESAM mode-locked fiber laser

由图3可以看出,非线性效应的逐渐增强使光谱宽度逐渐由6.7 nm增加到12.5 nm。脉冲宽度由9.39 ps减小到7.03 ps,此时脉冲携带的啁啾由1.41 ps/nm减小至0.56 ps/nm。图3表明,在保证腔内非线性效应的增强对光谱宽度影响可控时,适当的增加增益光纤长度,可以使脉冲宽度逐渐变窄。

3.3 锁模光纤激光器中光纤光栅的输出耦合比变化对输出脉冲的影响

光纤光栅的输出耦合比会改变输出和返回腔内的能量,从而影响输出脉冲特性。图4为滤波器带宽为20 nm,光纤光栅输出耦合比为10%、30%、50%和90%时,脉冲的时域和频域输出。图4(b)中,随着输出耦合比由10%增加到90%,返回腔内的能量逐渐减小,腔内非线性效应逐渐变弱,光谱宽度逐渐由12.8 nm减小到11.1 nm。如图4(a)所示,光谱的逐渐变窄会进一步使色散导致的脉冲展宽逐渐减小,脉冲宽度逐渐由20.8 ps减小到13.19 ps,脉冲携带的啁啾由1.63 ps/nm减小到1.18 ps/nm。图4表明,输出耦合比的适当增大,可以使光谱宽度和脉冲宽度均得到减小,避免种子光在后续经过放大器后被过分展宽。

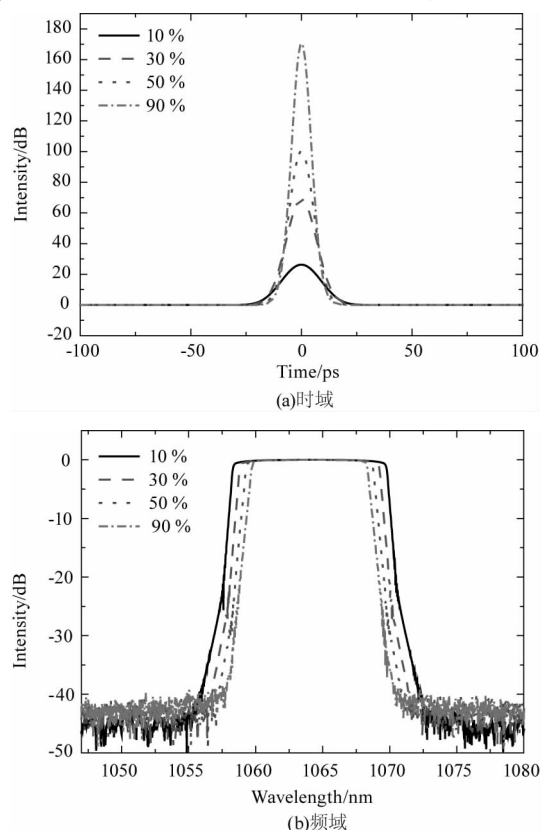


图4 光纤光栅输出耦合比对SESAM锁模激光器输出脉冲的时域和频域特性的影响

Fig. 4 Influence of fiber grating output coupling ratio on time domain and frequency domain characteristics of SESAM mode-locked laser output pulse

3.4 锁模光纤激光器中滤波器带宽变化对输出脉冲的影响

滤波器带宽是影响脉冲输出的一个重要因素。图5给出了不同滤波器带宽的激光器对应的时域和频域输出。鉴于之前模拟其他参数时,滤波器带宽为20 nm,出现了平顶光谱,我们选择将滤波器带宽设定为50 nm、60 nm和70 nm。从图5(b)可以看出,光谱的平顶现象消失了,这是因为,滤波器带宽过窄,截掉了光谱的两边,只留下光谱顶端,从而形成平顶光束。随着滤波器带宽的逐渐增大,允许通过的波段随之增加,脉冲宽度逐渐由24.75 ps增加到35.83 ps,光谱宽度由14.2 nm增加到14.4 nm,此时脉冲携带的啁啾由1.19 ps/nm增加到1.56 ps/nm。

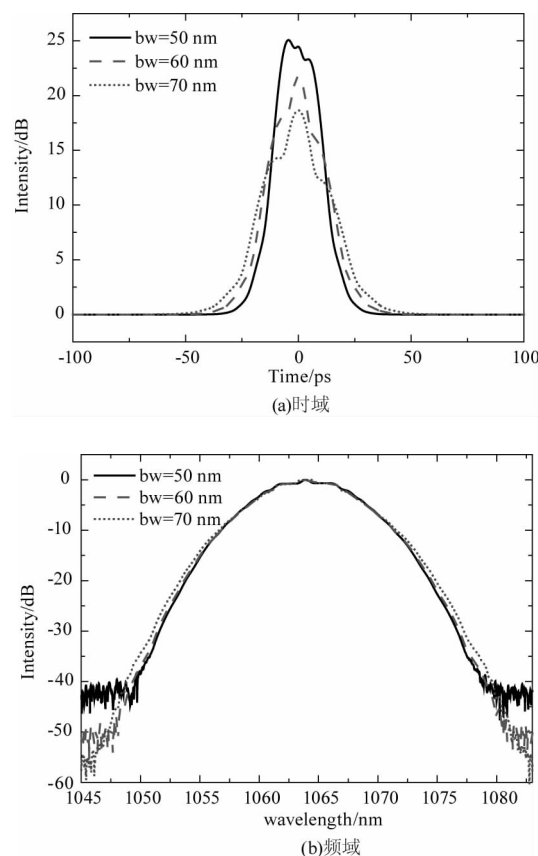


图5 滤波器带宽对SESAM锁模光纤激光器输出脉冲的时域和频域特性的影响

Fig. 5 Influence of filter bandwidth on time domain and frequency domain characteristics of output pulse of SESAM mode locked fiber laser

3.5 种子光的啁啾对放大后输出脉冲的影响

啁啾是影响放大脉冲特性的重要因素,根据以上理论模拟可以看出,工作在正色散区域的激光器输出的种子光均携带有一定量的啁啾。图6为种子

光携带的啁啾的变化对放大后输出脉冲的影响。种子光携带的啁啾从 0 ps/nm 增加到 10 ps/nm, 脉冲宽度由 11.45 ps 增加到 14.71 ps, 峰值功率逐渐降低, 光谱宽度由 8.3 nm 减小到 6.5 nm。图 7 为种子光携带的啁啾与增益的关系。当种子光功率为 5 mW 时, 种子光啁啾由 0 ps/nm 增加到 10 ps/nm, 放大后的输出功率逐渐减小, 增益随之减小。

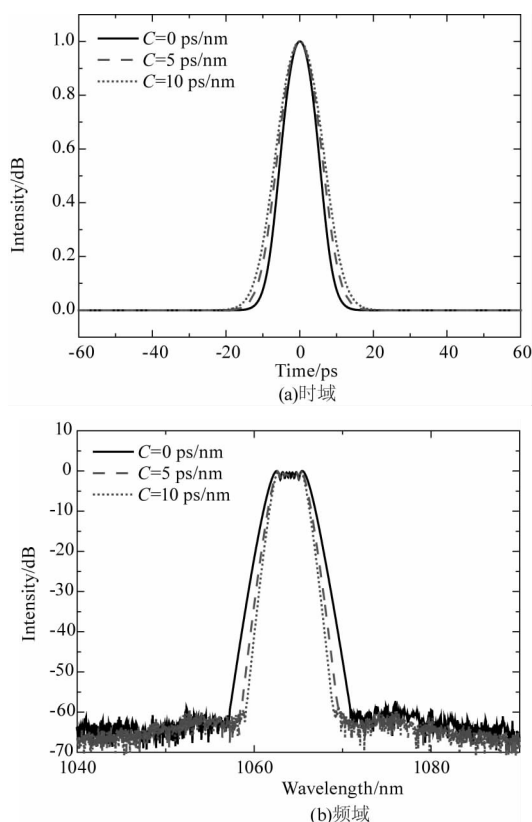


图 6 种子光啁啾对光纤放大器输出脉冲的时域和频域特性的影响

Fig. 6 Influence of seed chirp on time domain and frequency domain characteristics of output pulse of fiber amplifier

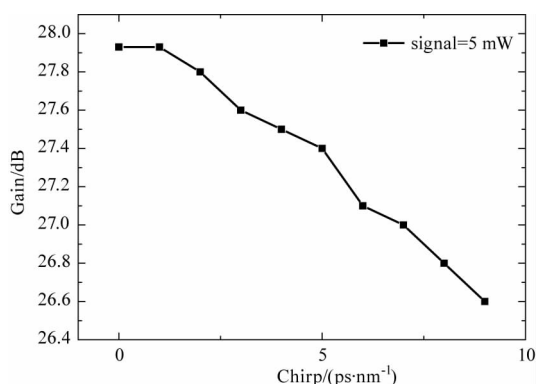


图 7 种子光啁啾与放大增益的关系

Fig. 7 Relationship between seed chirp and amplification gain

通过在设定范围内对作为种子源的锁模光纤激

光器单模光纤长度、增益光纤长度、滤波器带宽和输出耦合比的变化对其输出特性的影响以及种子光携带的啁啾对放大脉冲特性的影响进行理论分析, 综合色散以及非线性效应等对种子光特性的影响。发现当单模光纤长度为 5 m、增益光纤长度为 0.2 m、输出耦合比为 90 %、滤波器带宽为 20 nm 时, 可以输出脉冲宽度为 9.98 ps、光谱宽度为 8.5 nm 并携带 1.17 ps/nm 的啁啾的脉冲激光, 此时种子光携带的啁啾较小, 脉冲宽度与光谱宽度均为模拟设定参数范围内的较小值, 且光谱与脉冲均未发生畸变, 因此, 我们将其作为输出优质种子光的最佳参数。

3.6 放大结果

图 8 为放大脉冲优化结果。种子光为脉冲宽度为 9.98 ps、光谱宽度为 8.5 nm 并携带 1.17 ps/nm 的啁啾的锁模脉冲, 放大器的预放大级和主功率放大级增益光纤长度分别设定为 0.8 m 和 1 m, 单模光纤长度共 2 m, 进行两级放大模拟, 最终获得高质量的放大脉冲输出, 如图 8 所示。脉冲与光谱均未发生畸变且光谱平滑, 脉冲宽度为 13.53 ps、光谱宽度为 11.5 nm、平均功率为 6.1 W。

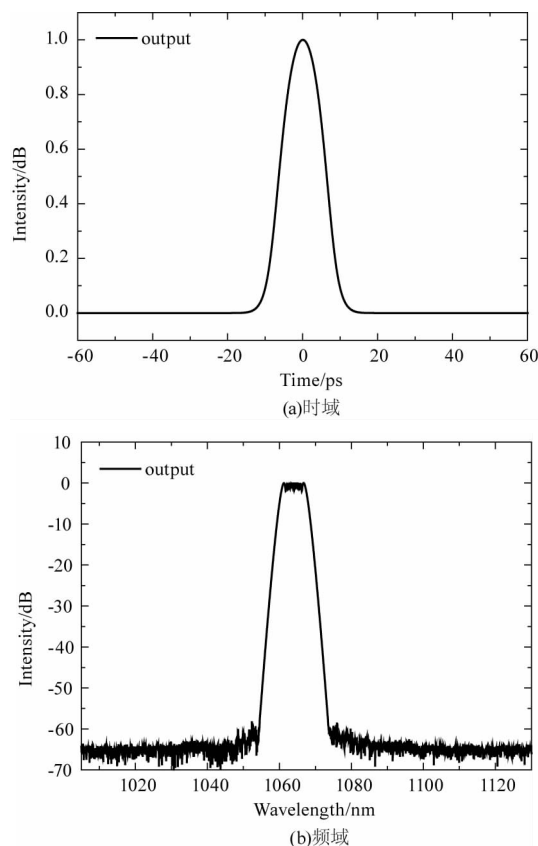


图 8 放大脉冲在时域和频域上的分布

Fig. 8 Distribution of amplified pulse in time domain and frequency domain

4 结 论

本文从非线性薛定谔方程出发,采用优化种子光特性获得高质量放大脉冲的方式,对锁模光纤放大器进行优化模拟。理论分析了作为种子源的锁模光纤激光器中单模光纤长度、增益光纤长度、滤波器带宽和输出耦合比对种子光特性的影响,以及种子光携带的啁啾对放大脉冲的影响。在综合考虑色散和非线性效应等对种子光的影响后,得到设定范围内输出优质种子光的各项参数最优值,并对其进行两级放大模拟。最终获得脉冲宽度为 13.53 ps、光谱宽度为 11.5 nm、平均功率为 6.1 W 的放大脉冲输出。

参考文献:

- [1] Kobtsev S M, Kukarin S V, Fedotov Y S. Mode-locked Yb-fiber laser with saturable absorber based on carbon nanotubes[J]. *Laser Physics*, 2011, 21(2): 283 – 286.
- [2] Xiao, Xiao-Sheng. Low-repetition-rate, all-polarization-maintaining Yb-doped fiber laser mode-locked by a semiconductor saturable absorber[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(11): 114204.
- [3] Zhang M, Chen L L, Zhou C, et al. Mode-locked ytterbium-doped linear-cavity fiber laser operated at low repetition rate[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 6(9): 657 – 660.
- [4] B L Z A, C Z Z, B N K C A, et al. Wave plate-dependent lasing regimes transitions in an all-normal-dispersion fiber laser mode-locked by nonlinear polarization rotation[J]. *Optics & Laser Technology*, 126.
- [5] Bowen P, Singh H, Runge A, et al. Mode-locked femtosecond all-normal all-PM Yb-doped fiber laser at 1060 nm[J]. *Optics Communications*, 2016, 364: 181 – 184.
- [6] Shi B, Zhang Q, Tang F, et al. Q-switched mode-locked ytterbium-doped fiber laser with radial polarization[J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(6): 065103.
- [7] Song R, Chen S P, Hou J, et al. Ultralow repetition rate all-normal-dispersion passively mode-locked fiber laser based on SESAM[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(9): 2315 – 2318.
- [8] Li P X, Liu Z, Chi J J, et al. A picosecond ytterbium-doped double-clad fiber amplifier with a SESAM mode locking PCF oscillator as the seed source[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(7): 2409 – 2414.
- [9] You Xiaoli, Wang Yonggang, Xue Yinghong, et al. Passively Q-switched mode-locking in a Yb^{3+} doped double-clad fiber laser with transmission type SESAM[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(6): 673 – 675. (in Chinese)
游小丽, 王勇刚, 薛迎红, 等. 透射式 SESAM 实现掺 Yb^{3+} 光纤激光器被动调 Q 锁模[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(6): 673 – 675.
- [10] Li P, Zhao Z, Zhang M, et al. Subpicosecond SESAM and nonlinear polarization evolution hybrid mode-locking ytterbium-doped fiber oscillator[J]. *Applied Physics B Lasers And Optics*, 2015, 118(4): 561 – 566.
- [11] H P Li, D S Zhao, J K Liao, et al. Passively mode-locked femtosecond fiber laser using a SESAM[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2009, 7509.
- [12] Zhou X, Yoshitomi D, Kobayashi Y, et al. Generation of 28-fs pulses from a mode-locked ytterbium fiber oscillator[J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7055 – 7059.
- [13] Chen H W, Chang G, Xu S, et al. 3GHz, fundamentally mode-locked, femtosecond Yb-fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3522 – 3524.
- [14] Song Rui, Hou Jing, Wang Yanbin, et al. Ytterbium-doped fiber laser passively mode-locked by an semiconductor saturable absorber mirror in linear cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014(1): 30 – 36. (in Chinese)
宋锐, 侯静, 王彦斌, 等. 线形腔半导体可饱和吸收镜被动锁模掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2014(1): 30 – 36.