

文章编号: 1001-3806(2013)06-0838-05

双程激光脉冲放大系统的建模及仿真研究

张文平, 刘丰年*, 果鑫, 徐勇, 张笛, 唐伟
(湖南工业大学 计算机与通信学院, 株洲 412007)

摘要: 为了提高脉冲放大系统模型的光光转换效率, 采用建模及仿真的方法研究了双程脉冲放大模型的输出特性, 得到了得到双程脉冲放大系统输出功率与抽运功率的关系、输出单脉冲能量与脉冲的重复频率的关系, 以及双程放大系统转换效率与重复频率的关系。结果表明, 在重复频率为 40kHz 时, 仿真得到该脉冲激光放大模型的光光转换效率达到了 29.1%。该双程脉冲放大模型有效地提高了能量转换效率。

关键词: 光纤放大器; 双程放大; 理论建模; 低重复频率; 转换效率

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.06.030

Research of modeling and simulation in dual-pass laser pulse amplification systems

ZHANG Wen-ping, LIU Feng-nian, GUO Xin, XU Yong, ZHANG Di, TANG Wei

(School of Computer and Communications, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: In order to improve the optical-optical conversion efficiency of the pulse amplification system model, the output characteristics of the dual-pass pulse amplification were studied by means of modeling and simulation. From the transmission characteristics, the relationship between output power and pump power, the relationship between output single pulse energy and pulse repetition frequency, and the relationship between conversion efficiency and repetition rate were obtained. The optical to optical conversion efficiency was 29.1% when the repetition frequency was 40kHz. Therefore, this dual-pass pulse amplification model improved the efficiency of energy conversion.

Key words: fiber amplifier; dual-pass amplification; theoretical modeling; low repetition frequency; conversion efficiency

引言

低重复频率高能量脉冲激光在工业加工、生物医疗、军事等领域具有广泛的应用价值。从放大器结构分析, 获得高能量低重复频率的激光脉冲途径主要有两种方案: (1) 基于主振荡功率放大系统 (master oscillator power amplifier, MOPA) 的级联多级单程放大器^[1-3]; (2) 双程脉冲放大器^[4-7]。

目前, 在已报道的单程级联多级脉冲放大技术中, 输入脉冲信号仅一次通过有源区, 在经过有源区的时间间隔内引起了大量的自发辐射 (amplified

spontaneous emission, ASE), ASE 不仅消耗了抽运能量, 且被后面的多级放大系统继续放大, 加剧了 ASE 噪声。如果使用滤波器件无疑可以得到干净的脉冲输出, 但放大器的转换效率受到了很大影响, 另外, 单程放大的光纤熔接处都会存在弱反馈, 引起寄生激励。这些都使得脉冲光纤放大器的光光转换效率大幅度降低。2003 年 WANG 等人对单程脉冲掺铽光纤放大器的动态特性进行了研究, 文中首次研究了弱反馈对主脉冲输出能量的影响^[8]。因此针对低重复频率的脉冲放大, 级联多级单程放大器不是最佳方案。

由于单程级联光纤脉冲放大系统存在上述问题, 因而双程结构的放大系统在目前被广泛关注。首先在实验研究方面, 已有实验证明双程脉冲放大系统能降低脉冲放大过程的自发辐射, 能进一步提高脉冲放大的光光转换效率, 为高功率脉冲激光系统提供优良的种子源^[9]; 其次在理论研究方面, 主

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (11JJ3002); 湖南省研究生科研创新基金资助项目 (CX2011B393)

作者简介: 张文平 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤通信与光纤传感。

* 通讯联系人。E-mail: lfnjx@yahoo.com.cn

收稿日期: 2013-01-07; 收到修改稿日期: 2013-03-18

要是停留在对粒子的速率方程和准稳态输出特性的研究^[10-11]。作者结合双程脉冲光纤放大理论的研究现状,建立双程脉冲放大理论模型,对理论模型做近似处理,得到系统模型的输出特性。主要包括:双程脉冲放大系统输出功率与抽运功率的关系、输出单脉冲能量与脉冲重复频率的关系,以及双程放大系统转换效率与重复频率的关系。此项研究可以为实际构建双程脉冲放大系统提供理论依据,本文中的创新之处就是研究如何构建双程脉冲放大模型,因此,该研究在光通信、光纤传感、激光武器和工业加工等应用领域具有深远意义。

1 放大系统结构模型

设计双程脉冲激光放大模型的结构如图 1 所示。实验模型采用光纤环路器的单向输出特性将输入信号和输出信号有效隔离。并利用 3dB 光纤环镜的高反特性使脉冲信号在增益介质中往返一次,构建双程脉冲放大系统结构。通过参量设定,对该实验模型进行仿真,得出仿真结果,为优化双程脉冲放大器提供依据,为现实中设计双程脉冲放大器提供理论依据。

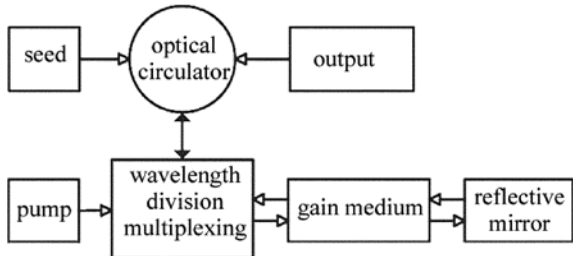


Fig. 1 Dual-pass pulse amplification system

下面将按照图 1 所示的模型结构建立理论模型,研究该双程模型的算法,通过理论计算和仿真研究脉冲的输出特性,得到系统的输出功率与脉冲的重复频率、抽运功率之间的关系以及重复频率与转换效率的关系。

2 放大系统的理论模型

基于经典光纤放大器模型的基础理论,从动态速率方程组入手,考虑前向抽运方式,结合如图 2 所示的放大系统理论结构模型,建立了双程脉冲放大理论模型。建立模型过程分两步:第 1 步,对上能级粒子数密度动态特性进行建模,以单程脉冲放大器模型为基础,进行修正;第 2 步,对功率传输特性和能量传输特性进行建模,通过边界条件的设定来考

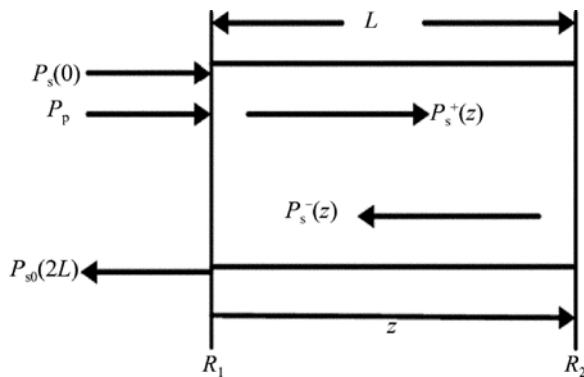


Fig. 2 The schematic of signal passing through the gain medium twice 虑信号两次通过增益区,即得到双程放大器的功率和能量传输特性方程组。建模结果如下:

$$\frac{\partial N_2(z,t)}{\partial t} = \frac{\Gamma}{hcA} \int [\sigma_e(\lambda_p) N_2(z,t) - \sigma_a(\lambda_p) \times N_1(z,t)] \cdot P_p(z,t) d\lambda - \frac{N_2(z,t)}{\tau} \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_p(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial P_p(z,t)}{\partial t} = \Gamma [\sigma_e(\lambda_p) N_2 - \sigma_a(\lambda_p) N_1] \cdot P_p(z,t) - \alpha P_p(z,t) + 2\sigma_e(\lambda_p) N_2 \frac{hc}{\lambda^3} \Delta\lambda + S\alpha_R P_p(z,t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_s^+(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial P_s^+(z,t)}{\partial t} = \Gamma [\sigma_e(\lambda_s) N_2(z,t) - \sigma_a(\lambda_s) N_1(z,t)] P_s^+(z,t) - \alpha P_s^+(z,t) + 2\sigma_e(\lambda_s) N_2(z,t) \frac{hc}{\lambda^3} \Delta\lambda + S\alpha_R P_s^+(z,t) \quad (3)$$

$$-\frac{\partial P_s^-(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial P_s^-(z,t)}{\partial t} = \Gamma [\sigma_e(\lambda_s) N_2(z,t) - \sigma_a(\lambda_s) N_1(z,t)] P_s^-(z,t) - \alpha P_s^-(z,t) + 2\sigma_e(\lambda_s) N_2(z,t) \frac{hc}{\lambda^3} \Delta\lambda + S\alpha_R P_s^-(z,t) \quad (4)$$

$$N = N_1(z,t) + N_2(z,t) \quad (5)$$

式中, N_2, N_1 分别为增益介质上和下能级粒子数, h 为普朗克常数, c 为真空中光速, $\sigma_a(\lambda_p)$ 和 $\sigma_e(\lambda_p)$ 分别为抽运光在增益介质中的吸收截面和发射截面, $\sigma_e(\lambda_s)$ 和 $\sigma_a(\lambda_s)$ 为信号光在增益介质中的发射截面和吸收截面, τ 为 Yb^{3+} 亚稳态能级的寿命, λ 为信号光的波长, $\Delta\lambda$ 为信号光波长的光谱带宽, α 是抽运光和信号光在光纤中损耗系数, Γ 为光纤对抽运光和激光的功率填充因子, v_g 是信号光和抽运光的群速度, P_s 是信号光功率, P_p 是抽运光的功率, S 是光纤纤芯的捕获系数, α_R 是光的瑞利散射系数, 表 1 中给出了计算中所用到的参量及数值。

Table 1 The parameters used in the calculation

parameter	value	parameter	value
absorption cross-section $\sigma_a(\lambda_p)/\text{cm}^2$	2.3×10^{-20}	concentration n/cm^{-3}	5.8×10^{19}
emission cross-section $\sigma_e(\lambda_p)/\text{cm}^2$	2.3×10^{-20}	loss factor α/cm^{-1}	2.1×10^{-5}
absorption cross-section $\sigma_a(\lambda_s)/\text{cm}^2$	1.2×10^{-21}	insertion loss ϕ	0.13
emission cross-section $\sigma_e(\lambda_s)/\text{cm}^2$	1.9×10^{-19}	emission lifetime τ/ms	0.84
reflection coefficient R_1, R_2	0.01, 0.96	core area a/cm^2	1.6×10^{-6}
scatter coefficient α_R/cm^{-1}	1.9×10^{-8}	shift speed $v_g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	2.3×10^8
capture coefficient S	0.75	wavelength λ_p/nm	976
confinement factor Γ	0.85	wavelength λ_s/nm	1053

3 理论分析

结合有限时域差分法和 4 阶龙格-库塔方法,对方程式(1)式~(5)式进行数值计算。其中,在光纤输入端的初始值为:连续抽运功率为 4W、波长

$$n_2 = \frac{\sigma_a(\lambda_s)\sigma_s(\lambda_s)P_{s,0}P_p + \sigma_e(\lambda_p)\sigma_a(\lambda_p)P_{s,0}(P_s^+ + P_s^-)}{\sigma_a(\lambda_p)\sigma_s(\lambda_s)P_pP_{p,0} + \sigma_a(\lambda_p)\sigma_s(\lambda_s)P_{p,0}(P_s^+ + P_s^-) + \sigma_a(\lambda_p)\sigma_s(\lambda_s)P_{s,0}} \quad (6)$$

$$n_2 = 1 - n_1 \quad (7)$$

$$P_{p,0} = \frac{h\nu_p(\lambda_p)n_1A}{\Gamma\sigma_a(\lambda_p)\tau}, P_{s,0} = \frac{h\nu_s(\lambda_s)n_2A}{\Gamma\sigma_a(\lambda_s)\tau} \quad (8)$$

式中, ν_p 和 ν_s 分别为抽运光频率和信号光频率, $\nu_s = v_g/\lambda_s, \nu_p = v_g/\lambda_p, P_{p,0}$ 和 $P_{s,0}$ 分别为信号光和抽运光的饱和功率,增益光纤的增益可以表示为:

$$g(z) = \exp\left\{\int_0^z [\sigma_e(\lambda_s)n_2 - \sigma_a(\lambda_s)n_1] dz\right\} \quad (9)$$

如果增益介质的长度为 L ,往返一次通过增益介质后信号光所经过的路程为 $2L$,由于还存在一个插入损耗 ϕ ,即信号光获得的增益 G 为:

$$G = g(2L) = \exp\left\{\int_0^{2L} [\sigma_e(\lambda_s)n_2 - \alpha\phi\sigma_a(\lambda_s)n_1] dz\right\} \quad (10)$$

由(1)式、(3)式、(4)式、(5)式和(9)式可得:

$$G = \left[\frac{\phi\sigma_a(\lambda_s)}{\Gamma\sigma_a(\lambda_p)} \ln \frac{\Gamma\phi P_p(L)}{P_p(0)} + \frac{\sigma_e(\lambda_s)}{\sigma_e(\lambda_p)A} \right] \quad (11)$$

又由(1)式~(5)式可得:

$$\frac{\phi\sigma_a(\lambda_s)}{\Gamma\sigma_a(\lambda_p)P_p} \frac{\partial P_p(z,t)}{\partial z} + \frac{\phi\sigma_e(\lambda_s)}{\Gamma\sigma_a(\lambda_p)P_{p,0}} \times \left[\frac{\partial P_s^+(z,t)}{\partial z} + \frac{\partial P_s^-(z,t)}{\partial z} \right] + \frac{\sigma_a(\lambda_s)}{A\sigma_a(\lambda_p)} = 0 \quad (12)$$

(3)式和(4)式满足下面的边界条件:

$$P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L) \quad (13)$$

其中,光纤环路器镜的反射率 R_1 很低,但是 R_2 可以达到 0.95,由于光纤环路器自身的损耗很小,所以不考虑其自身损耗,但是考虑到脉冲放大两次

976nm,注入种子脉冲的形状为高斯形且峰值功率 0.05W、脉冲宽度 25ns。光谱带宽 $\Delta\lambda = 1.8\text{nm}$ 双包层掺铒光纤的主要参量如表 1 所示。图 2 是信号光往返两次经过增益介质放大的示意图。

n_2 和 n_1 分别为上下能级归一化粒子数,表示为:

光纤环路器,存在插入损耗 ϕ ,其大小 $\phi = 0.13$,从而由(3)式及(4)式和图 2 得到如下关系:

$$\begin{cases} P_s^+(L) = P_s^+(0) + G(L) \\ P_s^+(2L) = \phi[P_s^-(L) + G(L)] \end{cases} \quad (14)$$

由(12)式~(14)式可得:

$$P_s^+(2L) = \frac{1}{\phi \sqrt{R_1 R_2}} \cdot \frac{K\{1 - \exp[\Gamma\alpha_a(\lambda_s) + \alpha_a(\lambda_p)]\}}{[\Gamma\alpha_a(\lambda_s) + \alpha_a(\lambda_p)][\alpha_a(\lambda_s)L - \ln(R_1 R_2)/2]} \quad (15)$$

式中, $K = [\tau\Gamma\sigma_a(\lambda_s)P_pP_s]/(\phi h\nu_p)$ 。

所以双程放大器的输出光功率可以表示为:

$$P_{\text{out}} = P_s^+(2L) \quad (16)$$

将(15)式代入到(16)式中得到:

$$P_{\text{out}} = P_s^+(2L) = \frac{1}{\phi \sqrt{R_1 R_2}} \cdot \frac{K\{1 - \exp[\Gamma\alpha_a(\lambda_s) + \alpha_a(\lambda_p)]\}}{[\Gamma\alpha_a(\lambda_s) + \alpha_a(\lambda_p)][\alpha_a(\lambda_s)L - \ln(R_1 R_2)/2]} \quad (17)$$

图 3 是系统在不同的输入功率、脉冲重复频率为 40kHz 的条件下,系统的输出功率随着抽运功率变化关系。图 3 说明该放大系统的输出功率随着抽运功率的按线性增加的。在不考虑非线性效应的条件下,脉冲放大后的时域形状如图 3 中插图所示。

计算得到放大前后脉冲激光的时域特性,前一个峰表示注入种子脉冲激光,形状为高斯形,脉冲宽

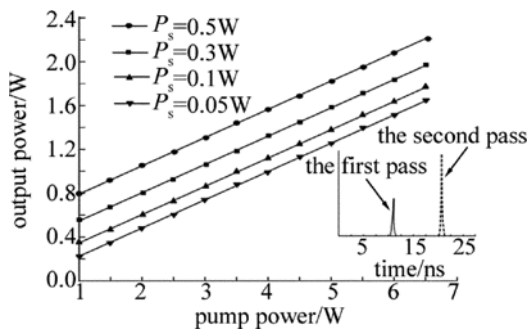


Fig. 3 The relationship between the output power and pump power (inset picture right downward is the amplified pulse shape of the time domain)

度为 24.6ns。后一个峰表示重复频率 20kHz 时,放大脉冲激光的时域特性。其脉冲宽度约为 23.8ns,相对种子脉冲激光的脉宽略有压缩,仍为高斯形,并且该理论研究得到相关的实验研究^[9]。

4 仿真结果与分析

下面考虑在放大系统内,脉冲的宽度为某一个脉冲输出后,随后的脉冲才进入放大系统的条件下,仿真计算得到如下结果。首先计算在不同的重复频率条件下,平均功率相同的脉冲经过两次放大后的脉冲能量与重复频率的关系。

从图 4 看出,双程放大脉冲的能量比单程放大脉冲输出能量相应增加,但并不是两倍,这是因为在第 2 次放大的过程中,第 1 次放大的噪声同时也被放大,因此两次放大输出脉冲的能量并非为单程放大的两倍。同时还可以看出,双程放大系统单脉冲输出能量随着重复频率的增大而减小。

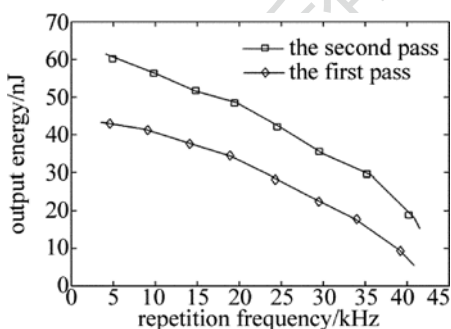


Fig. 4 The output pulse energy versus the repetition rate for each time passing through the gain medium

随后研究了重复频率和脉冲输出功率的关系。在脉冲输入功率相同和抽运水平相同的条件下,理论计算结果表明,不同重复频率的脉冲经过双程放大后,输出功率随着重复频率的增加而增加。

如图 5 所示的仿真结果,从理论分析表明随着重复频率的增加,脉冲的时间间隔减少,抽运能量转

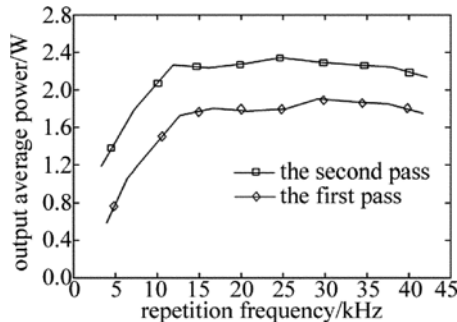


Fig. 5 The output power versus the repetition rate for each time passing through the gain medium

化为脉冲能量相应的增加。当脉冲重复频率一定(脉冲的重复频率为 40kHz),输入功率一定时,随着抽运功率的变化,经过单程和双程放大后的光光转换效率计算结果如图 6 所示。计算结果表明:在抽运功率小于 3W 时,第 2 次放大的转换效率接近于单程放大的两倍,但随着抽运功率进一步增加,双程放大和单程放大的转换效率都下降,原因是抽运能量过高,对掺杂浓度一定的增益介质,无法进一步增加上能级粒子数;其次,考虑相关的插入损耗,因而转换效率比理论情况下有所降低。

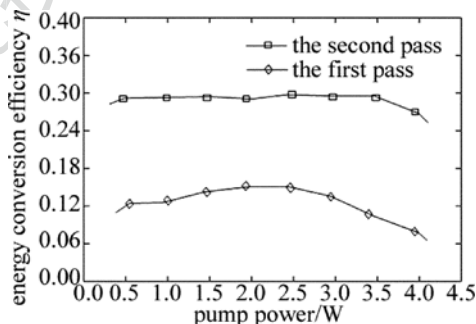


Fig. 6 The conversion efficiency versus the pump power for each time through the gain medium at a repetition rate of 40kHz

图 7 所示的计算结果是在脉冲输入功率一定、且放大系统的抽运功率一定条件下,激光脉冲经过两次放大后,能量的转换效率随着信号光的重复频率的关系。

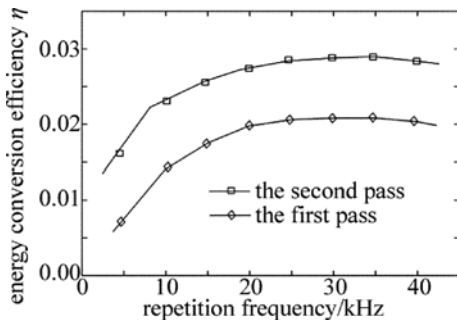


Fig. 7 Conversion efficiency versus the repetition rate
由图 7 可以看出,随着脉冲重复频率的增加,放

大系统的转换效率增加。这一结果可以从低占空比脉冲放大过程解释:当重复频率增加时,脉冲时间间隔减少,因抽运造成的损耗减少,从而放大系统的光光转换效率提高。但是在重复频率增加到 25kHz 时转换效率增加趋势变缓。这与本文中所构建的双程放大系统增益介质长度有关。本文中的增益光纤长度设定为 5m,脉冲双程的传输时间约 50ns;而当重复频率为 25kHz 时,脉冲周期为 40ns,因此脉冲两次经过放大系统的时间与脉冲的重复周期接近,说明当前一个脉冲刚好放大输出,则后一个脉冲随即进入;但随着重复频率的增加,脉冲周期缩短,当脉冲两次放大运行时间比脉冲周期长时,则转换效率的增加不再呈线性,原因在于此时的上能级粒子数被攫取的几率不是线性增加的。在重复频率为 40kHz、抽运功率为 3.5W、输入功率为 0.05W 时,理论计算得到 0.78W 的平均功率输出,光光转换效率为 29.1%。

5 结 论

利用光环路器的单向输出特性以及 3dB 光纤环镜的高反特性,构建了一种双程脉冲激光放大系统。基于该系统建立了双程放大的数学理论模型;理论上分析了脉冲激光通过增益介质放大的原理,理论计算结果表明,该双程脉冲放大系统有效地提高了能量的转换效率达到 1.8 倍以上;然后进行理论仿真,由于存在插入损耗,仿真结果显示该脉冲放大系统的转换效率仅提高了 1.6 倍以上;同时还证明了在低重复频率脉冲双程放大过程中,转换效率随重复频率的增加,起初呈线性增加,但随着重复频率的增加,脉冲周期缩短,当脉冲两次放大所需时间比脉冲周期长时,则转换效率的增加不再呈线性。

在重复频率为 40kHz、抽运功率为 3.5W、输入功率为 0.05W 时,理论计算得到 0.78W 的平均功率输出,光光转换效率为 29.1%。

参 考 文 献

- [1] YANG L M, WAN P, PROTOPOPOV V, *et al.* 2 μ m femtosecond fiber laser at low repetition rate and high pulse energy[J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 5683-5688.
- [2] RENARD W, CANAT G, BOURDON P. 26nJ picosecond solitons from thulium-doped single-mode master oscillator power fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(3): 377-379.
- [3] XU Y F, ZHAN Y, ZHENG Y. Analysis of pulse amplification of ytterbium-doped fiber amplifiers by means of finite elements[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 201-203 (in Chinese).
- [4] LEE E S, HAHN J W. Four-pass amplifier for the pulsed amplification of a narrow-bandwidth continuous-wave dye laser[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(22): 1836-1838.
- [5] ZAOUTER Y, PAPADOPOULOS D N, HANNA M. Stretcher-free high energy nonlinear amplification of femtosecond pulses in rod-type fibers[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(2): 107-109.
- [6] TANYA M M, ETER D M. Self-similar evolution of self-written waveguides[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(4): 268-270.
- [7] KOCHAROVSKAIA O A, KHANIN I I. Coherent amplification of an ultrashort pulse in a three-level medium without a population inversion[J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 1988, 48(11): 581-584 (in Russian).
- [8] WANG Y, MARTINEZ-RIOS A, PO H. Pulse evolution of a Q-switched ytterbium-doped double-clad fiber laser[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(9): 2521-2526.
- [9] MARCIANTE J R, ZUEGEL J D. High-gain, polarization-preserving, Yb-doped fiber amplifier for low-duty-cycle pulse amplification[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(26): 6798-6804.
- [10] WANG X D, ZHOU Zh, LI S W, *et al.* Self-similar pulse evolution in Yb-doped fiber amplifiers[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(1): 8-12 (in Chinese).
- [11] HU G J, LI X G, ZHANG P. Gain performance of Er³⁺/Yb³⁺ codoped double-clad fiber amplifier[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2012, 42(1): 240-244 (in Chinese).