

文章编号: 1001-3806(2008)02-0201-03

## 有限元法模拟掺镱光纤放大器的脉冲放大特性

徐云峰, 詹 仪, 郑 义\*

(郑州大学 激光与光电信息技术重点实验室, 郑州 450052)

**摘要:** 为了简单、快捷地模拟掺镱双包层光纤放大器的脉冲放大特性, 采用有限元软件 FEMLAB 模拟掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤放大器的脉冲放大特性。用与快速傅里叶法模拟  $\text{Yb}^{3+}$  光纤放大器脉冲放大特性相同的参量计算了在 915nm 前向抽运下, 光纤放大器中的上能级粒子数, 抽运光和放大自发辐射在光纤中的稳态分布, 以及高斯脉冲和方波脉冲的输出、能量及增益特性, 得到的与快速傅里叶法模拟一致的粒子分布图等特征图, 而且比快速傅里叶法得到更多和更准确的结果。结果表明, 应用 FEMLAB 只需根据掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤放大器的方程组, 可以方便、快捷地确定参数进行数值模拟, 对掺镱光纤放大器的系统设计和参量优化具有很好的参考价值。

**关键词:** 光纤光学; 掺镱光纤放大器; 脉冲放大; 双包层光纤

**中图分类号:** TN253

**文献标识码:** A

### Analysis of pulse amplification of ytterbium-doped fiber amplifiers by means of finite elements

XU Yun-feng, ZHAN Yi, ZHENG Yi

(Henan Key Laboratory of Laser and Opto-electric Information Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** The main purpose of this paper is to present the simple and fast method for simulating the characteristics of pulse amplification in ytterbium-doped double-clad fiber amplifiers with finite elements model FEMLAB package. The upper-level population distribution in the fiber, the pump power and the amplified spontaneous emission with 915nm forward pumping were studied by using the same parameters with the finite elements model fast Fourier transform. The transient output power, stored energy and gain of Gaussian pulse and square pulse were simulated. These results are in good agreement with those obtained according to fast Fourier transform. Furthermore, these results are more exact. The results show this method is convenient and fast. This method will offer valuable reference in design and parameter optimization of ytterbium-doped fiber amplifiers.

**Key words:** fiber optics; ytterbium-doped fiber amplifier; pulse amplification; double clad fiber

## 引 言

数值模拟掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤放大器的稳态特性和动态特性对系统设计和参量优化是非常重要的。掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤放大器的特性用偏微分方程组即速率方程和光功率传输方程组来描述<sup>[1-2]</sup>。由于边界条件和初值条件都与时间变量相联系, 模拟掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤放大器的动态特性比模拟稳态特性复杂。以前, 运用快速傅里叶法模拟掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤放大器脉冲放大特性<sup>[3-7]</sup>。但是, 这种程序的实现非常复杂, 并且只得到很少增益特性。最近, 有限差分法用于模拟光纤放大器的动态特性<sup>[1,8]</sup>。尽管有限差分法比快速傅里叶法得到更多和更准确的结果, 但是, 每一步的计算量比较大, 编程比

较复杂。对不擅长编程的研究人员来说, 简单的模拟方法是非常便利的。

FEMLAB 有限元数据包, 是以偏微分方程 (partial differential equations, PDEs) 为基础来建立耦合模型, 可以在 MATLAB 环境中运行<sup>[9]</sup>。运用 FEMLAB 分析掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤放大器的动态特性, 可以让研究者把注意力放到模型分析上, 而不必花费更多的时间在程序设计和计算上, 能够克服以前模拟方法复杂、繁琐的缺点。

本文中运用 FEMLAB 有限元数据包, 模拟掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤放大器的动态特性, 并且把所得的结果与其它数值模拟的结果以及试验结果相比较, 验证其有效性。

## 1 理论模型

双端抽运的掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤放大器的结构如图 1 所示<sup>[1]</sup>。谐振腔左、右两端为二色镜 (dichroic mirror, DM)  $\text{DM}_1, \text{DM}_2$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  光纤介质的长度为  $L$ , 为了消除反射, 两端各切成斜角。

作者简介: 徐云峰 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: yzheng@zzu.edu.cn

收稿日期: 2007-02-01; 收到修改稿日期: 2007-03-23

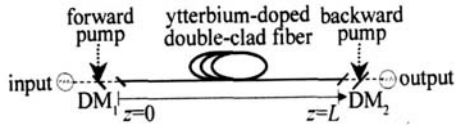


Fig 1 Schematic diagram of a bidirectionally pumped amplifier

放大器中同时存在信号光、抽运光和放大的自发辐射 (amplificatory spontaneous emission, ASE) 噪声光时,它们在光纤中的传播变化可用下述速率方程和光功率传输方程组来描述<sup>[1,11]</sup>:

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA} [\sigma_a(\lambda_p) N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_p) N_2(z,t)] \times$$

$$[P_p^+(z,t) + P_p^-(z,t)] - \frac{N_2}{\tau} + \frac{\Gamma}{hcA} \times$$

$$\sum_{k=1}^K \lambda_k [N_1(z,t) \sigma_a(\lambda_k) - N_2(z,t) \sigma_e(\lambda_k)] \times$$

$$[P^+(z,t, \lambda_k) + P^-(z,t, \lambda_k)] \quad (1)$$

$$N = N_1(z,t) + N_2(z,t) \quad (2)$$

$$\pm \frac{\partial P_p^\pm(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial P_p^\pm(z,t)}{\partial t} = -\Gamma_p [\sigma_a(\lambda_p) N_1(z,t) -$$

$$\sigma_e(\lambda_p) N_2(z,t)] P_p^\pm(z,t) - \alpha(\lambda_p) P_p^\pm(z,t) \quad (3)$$

$$\pm \frac{\partial P_k^\pm(z,t, \lambda_k)}{\partial z} + \frac{1}{v_k} \frac{\partial P_k^\pm(z,t, \lambda_k)}{\partial t} =$$

$$\Gamma_s [\sigma_e(\lambda_k) N_2(z,t) - \sigma_a(\lambda_k) N_1(z,t)] \cdot P_k^\pm(z,t, \lambda_k) -$$

$$\alpha(\lambda_s) P_k^\pm(z,t, \lambda_k) + 2\sigma_e(\lambda_k) N_2(z,t) \frac{hc^2}{\lambda_k^3} \nabla \lambda +$$

$$S_{ars}(\lambda_k) P_k^\pm(z,t, \lambda_k), (k=1, 2, \dots, K) \quad (4)$$

式中,  $N_1$ ,  $N_2$  和  $N$  为基态、亚稳态和纤芯中增益介质的总掺杂浓度;  $A$  为纤芯截面积;  $P_p^\pm(z,t)$ ,  $P_s^\pm(z,t, \lambda_s)$  和  $P_k^\pm(z,t, \lambda_k)$  分别是前、后向传播的抽运光、信号光

和  $k$  频带 ASE 功率;  $\Gamma_p$  和  $\Gamma_s$  分别是掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤对抽运光和信号光的功率填充因子;  $\sigma_a(\lambda_p)$  和  $\sigma_e(\lambda_p)$  是抽运光的吸收截面和发射截面;  $\sigma_a(\lambda_s)$  和  $\sigma_e(\lambda_s)$  是信号光的吸收截面和发射截面。  $v_k$  和  $v_p$  为群速度;  $S_{ars}$  是瑞利散射系数。为了简化计算,假设噪声光和信号光的功率填充因子相等。

本文中只考虑前向抽运情况,边界条件如下:

$$P_p^+(0) = P_1, P_p^-(L) = 0, P_s^+(0) = P_2, P_s^-(L) = 0,$$

$$P_{ASE}^+(z=0, \lambda) = P_{ASE}^-(z=L, \lambda) = 0,$$

$$(k=1, 2, \dots, K \neq s, 1020 < \lambda < 1100) \quad (5)$$

$P_1$ ,  $P_2$  和  $P_{ASE}$  分别是抽运功率、输入信号功率和噪声功率。

因 ASE 光谱曲线随波长的起伏变化太大,故在数值求解 ASE 功率时,应将 ASE 光谱从 1020nm ~ 1100nm 分成若干个频带,严格一点,每个频带带宽取 2nm。

## 2 有限元模型

根据以上分析,在 FEMLAB 中采用以  $u$  为因变量的系数形式的 PDEs 方程<sup>[9]</sup>,如下:

$$d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u - ku + \gamma) +$$

$$\beta \cdot \nabla u + au = f, \Omega \quad (6)$$

$$n(c \nabla u + au - \gamma) + qu = g, \partial \Omega \quad (7)$$

$$hu = r, \partial \Omega \quad (8)$$

式中,  $\Omega$  为计算区域;  $\partial \Omega$  为计算区域的边界;  $u$  是解;  $c, k, \gamma, d_a, \beta, \alpha, q, h, r$  和  $f$  为系数;  $n$  为边界的外法线。

与一阶偏微分方程组 (1) 式 ~ (4) 式相对应,  $c, k$

Table 1 The coefficient terms of the PDEs

$u$	$d_a$	$\beta$	$\alpha$	$f$	$R$
$P_p^+$	$1/v_p$	1	$\Gamma_p [\sigma_a(\lambda_p) N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_p) N_2(z,t)] + \alpha(\lambda_p) - \Gamma [\sigma_e(\lambda_k) N_2(z,t) - \sigma_a(\lambda_k) N_1(z,t)] + \alpha(\lambda_s) +$	0	$P_1(0), \text{Neum}(L)$
$P_s^+$	$1/v$	1	$2\sigma_a(\lambda_k) N_2(z,t) \frac{hc^2}{\lambda_k^3} \nabla \lambda - S_{ars}(\lambda_k) - \Gamma [\sigma_e(\lambda_k) N_2(z,t) - \sigma_a(\lambda_k) N_1(z,t)] + \alpha(\lambda_s) +$	0	$P_2(0), \text{Neum}(L)$
$P_{ASE}^+$	$1/v$	1	$2\sigma_s(\lambda_k) N_2(z,t) \frac{hc^2}{\lambda_k^3} \nabla \lambda - S_{ars}(\lambda_s) - \Gamma [\sigma_a(\lambda_k) N_2(z,t) - \sigma_a(\lambda_k) N_1(z,t)] - \alpha(\lambda_s) -$	0	$0(0), \text{Neum}(L)$
$P_{ASE}^-$	$1/v$	-1	$2\sigma_e(\lambda_k) N_2(z,t) \frac{hc^2}{\lambda_k^3} \nabla \lambda + S_{ars}(\lambda_k)$	0	$\text{Neum}(0), 0(L)$
$N_2$	1	0	0	$\frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA} [\sigma_a(\lambda_p) N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_p) N_2(z,t)] \times$ $[P_p^+(z,t) + P_p^-(z,t)] - \frac{N_2}{\tau} + \frac{\Gamma}{hcA} \sum_{k=1}^E \lambda_k \times$ $[N_1(z,t) \sigma_a(\lambda_k) - N_2(z,t) \sigma_e(\lambda_k)] \times$ $[P^+(z,t, \lambda_k) + P^-(z,t, \lambda_k)]$	$\text{Neum}(0), \text{Neum}(L)$

和  $\gamma$  为 0;  $u, d_a, \beta, \alpha, f$  的取值见表 1。  $h$  为 1,  $r$  根据实际情况, 分别设为狄利克 (Diriclet) 和诺伊曼 (Neumann) 边界条件, 当设为狄利克边界时,  $r$  的值与 (5) 式分别对应,  $r$  的设置见表 1, (O) 和 (L) 分别表示初始端和末端。为了找出初始条件, 假设脉冲信号来临之前系统处于稳态, 即  $\frac{\partial}{\partial t} = 0$  和  $P_s^+(0) = 0$ , 得到  $N_2(z, 0)$ ,  $P_s(z, 0)$  和  $P_{ASE}^\pm(z, 0)$  的值。

### 3 数值模拟和理论分析

为了验证模拟的结果, 计算中所用的光纤放大器的参量与文献 [1] 中相同。光纤长度为 10m, 抽运功率  $P_p^+(0) = 20W$ 。图 2 表示稳态条件下, 上能级粒子分

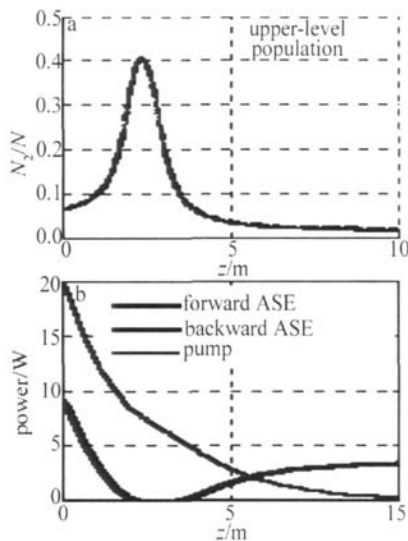


Fig 2 Steady-state distribution

布 (见图 2a), 以及抽运光、噪声光功率的分布 (见图 2b)。结果与文献 [1] 中的图 3 符合一致。由图可见,  $N_2$  在 3m 处达到最大值, 后向 ASE 光功率达到最小值。在光纤两端,  $N_2$  值较低, 这是因为前、后向 ASE 消耗了大量的粒子。

图 3 表示输出功率变化和光纤长度关系。输入信

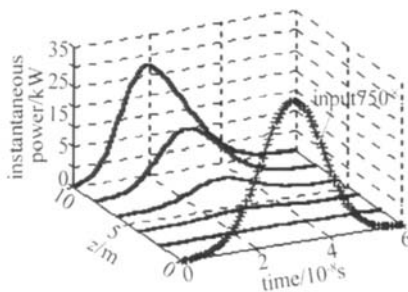


Fig 3 Transient output power change for several fiber lengths

号光为能量  $1\mu J$ , 脉宽 20ns 的高斯脉冲。为了便于和输出脉冲相比较, 输入信号脉冲扩大了 750 倍。可见, 随着光纤长度的增加, 脉冲信号的功率升高, 同时脉冲信号的形变也增加。脉冲前沿变陡, 脉冲后沿被拉长。

由于反转粒子数随时间的变化, 致使脉冲的前沿增益大于其后沿增益。

光纤中储存能量的变化由图 4 表示。脉冲的重

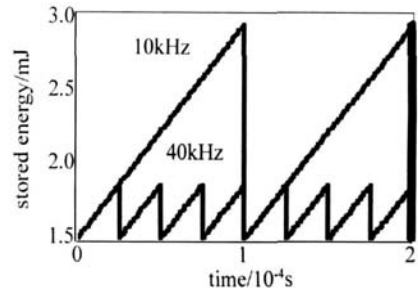


Fig 4 Evolution of stored energy under different repetition rates

复频率分别为 10kHz 和 40kHz, 抽运功率为 20W。可见, 重复频率越高, 光纤中储存的能量越低。因为重复频率越高, 两个信号光之间相隔的时间越短, 消耗的能量来不及恢复。

用脉宽 20ns, 峰值功率分别为 5W 和 0.05W 的方波脉冲作为脉冲放大的另一个例子。光纤放大器的参量与文献 [1] 中相同。图 5 表示输出信号功率、能量

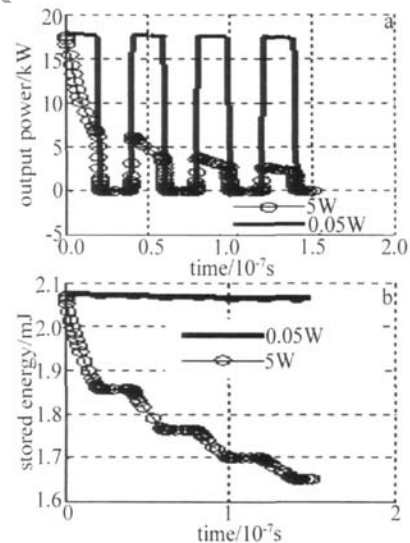


Fig 5 a—the transient output power b—stored energy variations under different input signal powers

的变化。图 5a 中实线表示输入信号的峰值功率为 0.05W 时, 输出信号在图中放大了 100 倍显示。可见, 当输入信号峰值功率较小时, 放大器对此输入脉冲的任一部分功率增益是相等的, 输出端的脉冲没有发生畸变; 当输入信号峰值功率较大时, 脉冲不再被线性放大。因为强脉冲前沿通过掺  $Yb^{3+}$  光纤时, 反转粒子数将会因受激辐射而被迅速消耗; 当脉冲后沿通过时, 前沿引起的受激辐射已使反转粒子数降低, 所以后沿只能得到较小的增益。结果输出的脉冲将发生畸变, 输入脉冲的前沿放大比后沿大。此计算结果与文献 [10] 中本质机理上相符合。

(下转第 206 页)

Table 1 The related parameters in Eqs (2)~Eqs (4)

parameters	values	parameters	values
$l$	10cm	$\nu$	$2.82 \times 10^{14}$ Hz
$d$	0.5cm	$c$	$3.0 \times 10^8$ m/s
$L_c$	40cm	$n_1$	1.81
$\sigma$	$8.8 \times 10^{-19}$ cm <sup>2</sup>	$n_2$	1.49
$\sigma^0$	$1.0 \times 10^{-17}$ cm <sup>2</sup>	$n_3$	3.48
$\sigma^+$	$2.3 \times 10^{-16}$ cm <sup>2</sup>	$\beta$	$2.6 \times 10^{-8}$ cm $\cdot$ W <sup>-1</sup>
$n_0$	$1.2 \times 10^{16}$ cm <sup>-3</sup>	$\delta_e$	0.1
$n_0^+$	$1.4 \times 10^{15}$ cm <sup>-3</sup>	$L$	0.15
$\tau$	230 $\mu$ s		

算的脉冲形状,可得脉冲的宽度和脉冲的对称因子。图2和图3中的实线及图4中的点划线是理论的计算结果。图2~图4表明,理论的估算与实验结果基本相符。

### 3 结论

实现了电光-GaAs主被动双调Q激光运转。结果表明,双调Q激光不仅脉冲宽度更窄,而且脉冲波型更对称。给出了双调Q激光运转耦合的方程组,数值求解方程组得到的理论值与实验结果相符。

#### 参考文献

- [1] BASS M. Electrooptic Q-switching of the Nd:YVO<sub>4</sub> laser without an intracavity polarizer [J]. IEEE J Q E, 1975, 11(12): 938-941.
- [2] FRIEL G J, CONNEY R S, KEMP A J, et al Q-switching of a diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser using a quadrupole electron-optic deflector [J]. Appl Phys, 1998, B67(2): 267-270.

- [3] LU Q, GONG M, WU H, et al Electro-optic Q-switched Yb:YAG laser [J]. Laser Physics Letters, 2006, 3(5): 249-251.
- [4] PLAESSMANN H, YAMADA K S, RICH C E, et al Subnanosecond pulse generation from diode-pumped acousto-optically Q-switched solid-state lasers [J]. Appl Opt, 1993, 32(33): 6616-6619.
- [5] KAJAVA T T, GAETA A L. Q-switching of a diode-pumped Nd:YAG with GaAs [J]. Opt Lett, 1996, 21(16): 1244-1246.
- [6] KAJAVA T T, GAETA A L. Intra-cavity frequency-doubling of a Nd:YAG laser passively Q-switched with GaAs [J]. Opt Commun, 1997, 137: 93-97.
- [7] SPAR DSU K, CHEN W, STULTZ R, et al Dual Q-switching and laser action at 1.06 $\mu$ m and 1.4 $\mu$ m in a Nd<sup>3+</sup>:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG oscillator at 300K [J]. Opt Lett, 1993, 18(10): 814-816.
- [8] XIA H X, YAO Y Ch, LI Zh J. Fabrication and numerical simulation of passively Q-switched laser with composite crystal fiber [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 541-543 (in Chinese).
- [9] LU Ch Y, WANG X B, GUO Y L, et al Study on directional prism improving the output stability of Q-switched by Cr<sup>4+</sup>:YAG [J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 187-193 (in Chinese).
- [10] LI Zh G, XIONG Z, MOORE N, et al Pulse width reduction in AO Q-switched diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser with GaAs coupler [J]. Opt Commun, 2004, 237: 411-416.
- [11] ERNEUX T, PETERSON P, GAVER IEL DES A. The pulse shape of a passively Q-switched microchip laser [J]. European Journal of Physics, 2000, D10(4): 423-431.
- [12] YANG K J, ZHAO Sh Zh, LI G Q, et al Compression of pulse duration in a laser-diode, end-pumped, double Q-switched laser [J]. Appl Opt, 2005, 44(2): 271-277.
- [13] LI G Q, ZHAO Sh Zh, YANG K J, et al Pulse shape symmetry and pulse width reduction in diode-pumped doubly Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP green laser with AO and GaAs [J]. Optics Express, 2005, 13(4): 1178-1187.
- [14] YANG K J, ZHAO Sh Zh, LI G Q. Pulse symmetry and pulse duration compression in a diode-pumped doubly passively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser with Cr<sup>4+</sup>:YAG and GaAs saturable absorbers [J]. Appl Phys, 2005, B81(5): 633-636.

(上接第203页)

### 4 结论

从分析结果看,本文中的研究结果和以前的研究结果具有良好的一致性,表明 FEMLAB 能够很好地模拟掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤放大器。应用 FEMLAB 数据包,可以很方便地根据实际需要和实际条件确定掺镱光纤放大器的抽运形式、掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤长度和抽运功率等其它参量,用于预测和指导今后的实验设计,对今后掺镱光纤放大器的系统设计和参量优化具有很好的参考价值。另外应该指出,FEMLAB 还能应用于任何类型光纤的光纤放大器和激光器的模拟,以及光子晶体光纤特性的模拟。

#### 参考文献

- [1] WANG Y, PO H. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(10): 2262-2270.
- [2] HARDY A, ORON R. Signal amplification in strongly pumped fiber amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(3): 307-313.
- [3] VALLEY G C, WRIGHT M. Modeling transient gain dynamics in a cladding-pumped Yb<sup>3+</sup>-doped fiber amplifier pulsed at low repetition

- rates [C]//CLARKSON A. CLEO 2001 Paper CWA51. Baltimore, United States: Conference on Lasers Electro-Optics, 2001: 300-301.
- [4] LU X Q, CHEN Sh H. Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(3): 209-214 (in Chinese).
- [5] PASCHOTAL R, NILSSON A C J. Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(7): 1049-1056.
- [6] KONG L F, LOU Q H, ZHOU J, et al Frequency response and transient gain of Yb-doped clad fiber amplifier [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(11): 1286-1289 (in Chinese).
- [7] HANNA D C, PERCIVAL R M, PERRY I R, et al An ytterbium-doped monomode fiber laser: broadly tunable operation from 1.010 $\mu$ m to 1.162 $\mu$ m and three-level operation at 974nm [J]. Journal of Modern Optics, 1990, 37(4): 517-525.
- [8] BRUNET F, TALLON Y, GALARNEAU P, et al Practical design of double-clad ytterbium-doped fiber amplifiers using giles parameters [J]. IEEE J Q E, 2004, 40(9): 1294-1300.
- [9] COMSOL A B. FEMLAB. Version 2.1 pre reference manual [EB/OL]. [2006-12-10]. <http://www.comsol.com>.
- [10] WRIGHT M W, VALLEY G C. Yb-doped fiber amplifier for deep-space communications [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(3): 1369-1374.
- [11] ZHAN Y, ZHENG Y, ZHAO Y H, et al The gain and noise characteristics of double cladding ytterbium-doped fiber amplifiers at different pump modes [J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 50-53 (in Chinese).