

文章编号: 1001-3806(2009)05-0541-04

高功率 Er/Yb 共掺光纤脉冲放大器中 ASE 的影响分析

韩群, 宁继平, 周雷, 张伟毅, 王俊涛, 陈璋

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了研究自发辐射对高功率铒镱共掺脉冲光纤放大器性能的影响, 在速率方程理论的基础上, 采用有限差分法对理论模型进行了数值求解。对不同抽运、信号和光纤参量配置情况下, 自发辐射对放大器性能的影响进行了模拟分析。结果表明, 由于自发辐射自饱和的限制, 在其它条件相同的情况下, 为了得到最高的单脉冲能量和峰值功率, 放大器输入信号存在一个最佳的重复频率, 且该最佳重复频率与抽运功率成正比与脉冲宽度成反比。研究结果对高功率铒镱共掺光纤脉冲放大器的设计和实验研究有重要指导意义。

关键词: 光电子学; 光纤放大器; 有限差分法; 铒镱共掺; 脉冲放大

中图分类号: TN722 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.028

Impact of ASE on high power Er/Yb co-doped fiber pulse amplifiers

HAN Qun, NING Ji-ping, ZHOU Lei, ZHANG Wei-yi, WANG Jun-tao, CHEN Zheng

(Key Laboratory of Opto-electronics Information Science and Technology of Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to study the impact of amplified spontaneous emission (ASE) generation on the performance of high power Er/Yb co-doped fiber pulse amplifiers, based on the rate equation, the theoretical models for several amplifiers with different pump, signal and configure parameters were solved with finite difference method. The results show that because of the ASE self-saturation, there is an optimal repetition rate for the input signal in order to achieve the highest peak power and maximum pulse energy and the repetition rate is linear with the pump power and inverse to the pulse duration. The results are important for the design and experimental research of high power Er/Yb co-doped fiber pulse amplifiers.

Key words: optoelectronics; fiber amplifier; finite difference method; Er/Yb co-doped; pulse amplification

引言

高功率铒镱共掺光纤激光器和放大器具有结构紧凑、效率高、人眼安全等优点, 在工业、医疗、通信、军事、空间通信以及科研等领域有着很好的应用前景。为了得到高光束质量的高功率激光输出, 高功率光纤激光系统通常采用主振荡功率放大器 (master oscillator power amplifier, MOPA) 的结构。由主振荡器产生高质量的种子光, 然后通过 1 级或多级光纤放大器来提高输出功率或脉冲能量。因此, 光纤放大器的性能决定着整个激光系统的输出功率或脉冲能量。目前, 基于铒镱共掺 MOPA 的连续波输出最大功率为 $297\text{W}^{[1]}$, 脉冲方式工作时输出的最大单脉冲能量为 $1.15\text{mJ}^{[2]}$ 。铒镱共掺 MOPA 的激射波长位于 1550nm 波段, 人眼在这个波段的激光损伤阈值要比 1060nm 波段高 4 个

数量级以上, 具有“人眼安全”的特点。因此, 在激光雷达、激光加工等需要人员参与的应用领域具有广阔的市场前景。由于这些领域通常需要高峰值功率的短脉冲激光, 因此, 人们对高功率铒镱共掺脉冲 MOPA 系统的研究兴趣正在不断升温。

在脉冲光纤放大器中, 放大的自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 是影响放大器输出脉冲能量的一个重要因素。在高功率抽运情况下, 两个脉冲之间放大器的增益会迅速提高, ASE 会迅速积累以至达到饱和。ASE 自饱和以及由此导致的寄生振荡会消耗上能级的粒子数, 从而限制了以激活粒子的形式储存在增益光纤中的能量^[3]。虽然采用大模场面积的增益光纤可以增加光纤中储能, 但光纤芯径的增大会导致输出光束质量的降低, 并且只要抽运功率足够高, ASE 自饱和仍不可避免。因此, 对高功率脉冲光纤放大器中 ASE 影响程度和规律进行理论分析, 对高性能放大器的设计和实验研究具有重要意义。

本文中以速率方程为基础, 采用有限差分法对高功率抽运下铒镱共掺光纤脉冲放大器中 ASE 的影响

作者简介: 韩群 (1977-), 男, 讲师, 主要研究方向为光纤激光器和放大器。

E-mail: hanqun@tju.edu.cn

收稿日期: 2008-11-08; 收到修改稿日期: 2008-12-08

情况进行了理论分析。对不同抽运、信号和光纤参量配置情况下, ASE 对放大器性能的影响进行了模拟分析,对 ASE 的影响程度及规律进行了总结和讨论。

1 理论模型

钇镱共掺系统的能级结构如图 1 所示。抽运光子

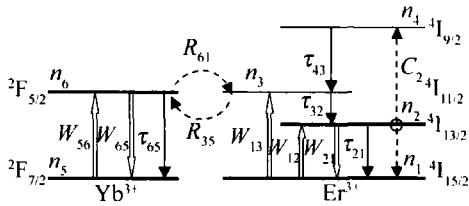


Fig. 1 Energy level of the Er/Yb co-doped system

首先将 Yb^{3+} 从 $2\text{F}_{7/2}$ 激发到 $2\text{F}_{5/2}$ 能级。然后,激发态的 Yb^{3+} 将能量转移给基态的 Er^{3+} , 将其由基态 $4\text{I}_{11/2}$ 激发到 $4\text{I}_{15/2}$ 。 Er^{3+} 的 $4\text{I}_{11/2}$ 能级的寿命很短, 激发上来的 Er^{3+} 迅速通过无辐射跃迁弛豫到上能级 $4\text{I}_{13/2}$ 上, 然后通过能级 $4\text{I}_{13/2}$ 到 $4\text{I}_{15/2}$ 间的受激辐射跃迁对激光信号进行放大。在掺杂浓度较高的情况下, 上能级 $4\text{I}_{13/2}$ 上聚集在一起的 Er^{3+} 还会发生合作上转换, 其中一个粒子

被激发到能量更高的 $4\text{I}_{9/2}$ 能级, 另一粒子回到基态。由于 $4\text{I}_{9/2}$ 的能级寿命极短, 激发上去的粒子很快 ($\tau_{43} \approx 0$) 会通过无辐射跃迁弛豫到能级 $4\text{I}_{11/2}$, 因此, 通常假定该能级上是空的^[4]。各能级上的集居数密度比的变化满足如下的速率方程组^[4-6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial n_2}{\partial t} = -\frac{n_2}{\tau_{21}} + \frac{n_3}{\tau_{32}} + W_{12}n_1 - W_{21}n_2 - 2C_2N_{\text{Er}}n_2^2 \\ \frac{\partial n_3}{\partial t} = -\frac{n_3}{\tau_{32}} + W_{13}n_1 + R_{61}N_{\text{Yb}}n_6n_1 - R_{35}N_{\text{Yb}}n_3n_5 + C_2N_{\text{Er}}n_2^2 \\ \frac{\partial n_6}{\partial t} = -\frac{n_6}{\tau_{65}} + W_{56}n_5 - W_{65}n_6 - R_{61}N_{\text{Er}}n_6n_1 + R_{35}N_{\text{Er}}n_3n_5 \\ n_1 = 1 - n_2 - n_3 \\ n_5 = 1 - n_6 \end{cases} \quad (1)$$

式中, n_i 表示能级 i 上的集居数密度比, τ_{ij} 表示能级 i 的自发辐射寿命, R_{ij} 为能级 i 与 j 之间的交叉弛豫系数, N_{Er} 和 N_{Yb} 分别为 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 的掺杂浓度, C_2 为上转换系数, W_{ij} 表示能级 i 与 j 之间的受激跃迁速率, 由下列式子给出:

$$\begin{cases} W_{ij} = \sum_s \frac{c_{ij}(\lambda_s) [P_s^+(\lambda_s, z, t) + P_s^-(\lambda_s, z, t)] \lambda_s}{A_{\text{core}} hc N_{\text{Er}}} + \sum_k \frac{c_{ij}(\lambda_k) [P_{\text{Er}}^+(\lambda_k, z, t) + P_{\text{Er}}^-(\lambda_k, z, t)] \lambda_k}{A_{\text{core}} hc N_{\text{Er}}} \\ W_{lm} = \sum_p \frac{c_{lm}(\lambda_p) [P_p^+(\lambda_p, z, t) + P_p^-(\lambda_p, z, t)] \lambda_p}{A_{\text{core}} hc N_{\text{Yb}}} + \sum_k \frac{c_{lm}(\lambda_k) [P_{\text{Yb}}^+(\lambda_k, z, t) + P_{\text{Yb}}^-(\lambda_k, z, t)] \lambda_k}{A_{\text{core}} hc N_{\text{Yb}}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, 下标 $ij = 12, 21, lm = 13, 56, 65$, A_{core} 为纤芯面积, $P_p, P_s, P_{\text{Yb}}, P_{\text{Er}}$ 分别表示抽运功率、信号功率、Yb 波段 ASE 的功率和 Er 波段 ASE 的功率, $c_{ij}(\lambda_k)$ 为能级 i 与 j 之间对 λ_k 的吸收或发射系数:

$$\begin{cases} c_{ij}(\lambda_k) = \Gamma_k \sigma_{ij}(\lambda_k) N_{\text{Er}} \\ c_{lm}(\lambda_k) = \Gamma_k \sigma_{lm}(\lambda_k) N_{\text{Yb}} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\sigma_{ij}(\lambda_k)$ 为能级 i 与 j 间对 λ_k 的吸收或发射截面, Γ_k 是波长为 λ_k 的光波模式与掺杂区域的交叠因子。

在钇镱共掺光纤放大器中, 各光谱成分的功率变化可由如下的功率传输方程组来描述:

$$\pm \frac{\partial P_p^\pm}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial P_p^\pm}{\partial t} = [n_6 c_{65}(\lambda_p) - n_5 c_{56}(\lambda_p) - n_1 c_{13}(\lambda_p) - \alpha_p] P_p^\pm \quad (4)$$

$$\pm \frac{\partial P_s^\pm}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial P_s^\pm}{\partial t} = [n_2 c_{21}(\lambda_s) - n_1 c_{12}(\lambda_s) - \alpha_s] P_s^\pm \quad (5)$$

$$\pm \frac{\partial P_{\text{Yb}}^\pm(\lambda_k)}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial P_{\text{Yb}}^\pm(\lambda_k)}{\partial t} = [n_6 c_{65}(\lambda_k) - n_5 c_{56}(\lambda_k) - n_1 c_{13}(\lambda_k) - \alpha_k] P_{\text{Yb}}^\pm(\lambda_k) + \frac{2hc^2}{\lambda_k^3} m_p n_6 c_{65} \Delta \lambda \quad (6)$$

$$\pm \frac{\partial P_{\text{Er}}^\pm(\lambda_k)}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial P_{\text{Er}}^\pm(\lambda_k)}{\partial t} = [n_2 c_{21}(\lambda_k) -$$

$$n_1 c_{12}(\lambda_k) - \alpha_k] P_{\text{Er}}^\pm(\lambda_k) + \frac{2hc^2}{\lambda_k^3} m_s n_6 c_{65} \Delta \lambda \quad (7)$$

式中, \pm 表征光的传播方向, h 为普朗克常数, c 为真空中的光速。(4)式~(7)式分别描述了抽运功率、信号功率、Er 波段 ASE 功率和 Yb 波段 ASE 功率的演化, α_k 为光纤对波长为 λ_k 的光波的损耗系数, m_p 和 m_s 分别表示纤芯中 Yb 波段和 Er 波段 ASE 的模式数。

(1)式~(7)式共同构成了钇镱共掺光纤放大器的理论模型, 该模型的有效性已经在文献[5]中进行了实验验证和讨论。辅以适当的边界条件, 通过求解该理论模型就可以对各种不同结构的钇镱共掺放大器进行模拟。在忽略端面反射和连续抽运情况下, 对于同向抽运, 边界条件如下:

$$\begin{cases} P_p(0, t) = P_{p0}, P_s(0, t) = P_s(t) \\ P_{\text{Yb}}^+(0, t) = 0, P_{\text{Yb}}^-(L, t) = 0 \\ P_{\text{Er}}^+(0, t) = 0, P_{\text{Er}}^-(L, t) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, P_{p0} 为抽运功率, $P_s(t)$ 为 t 时刻的信号功率, L 为增益光纤长度。

2 仿真结果与讨论

采用有限差分法^[7]对上述理论模型进行了编程

求解,并在此基础上对放大器中 ASE 的影响进行了分析。在铒镱共掺光纤中,ASE 在 $1\mu\text{m}$ 和 $1.5\mu\text{m}$ 两个波段均有可能发生。但由于 Yb^{3+} 上能级粒子数会迅速通过交叉弛豫将能量传递给 Er^{3+} ,其寿命被大大缩短, $1\mu\text{m}$ 波段的 ASE 的自饱和阈值要比 $1.5\mu\text{m}$ 波段的高得多,并且随着掺杂比例和光纤结构的优化, $1\mu\text{m}$ 波段的 ASE 的影响被进一步降低^[8],因此,同限制铒镱共掺脉冲光纤放大器输出性能的 ASE 主要来自 $1.5\mu\text{m}$ 波段。

计算中采用的主要参量如表 1 所示,其中的光纤

Table 1 Parameter value used in the simulation

parameters	values
λ_p	976nm
λ_s	1550nm
A_{core}	$227\mu\text{m}^2$
N_{Er}	$2.450 \times 10^{25}\text{m}^{-3}$
N_{Yb}	$3.526 \times 10^{26}\text{m}^{-3}$
R_{35}	$1.00 \times 10^{-22}\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
R_{61}	$1.00 \times 10^{-22}\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
C_2	$1.00 \times 10^{-24}\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
τ_{21}	$1.00 \times 10^{-2}\text{s}$
τ_{32}	$1.00 \times 10^{-9}\text{s}$
τ_{65}	$1.50 \times 10^{-3}\text{s}$
m_p	4
m_s	2

参量取自 CorActive 公司生产的 HPA-EY-17-02 型双层铒镱共掺光纤^[9]。图 2 为厂家提供的增益光纤的吸收和发射系数谱。

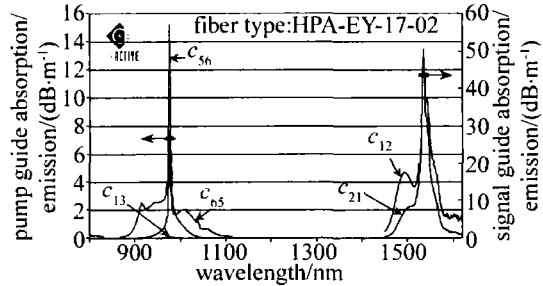


Fig. 2 Absorption and emission spectrum of a gain fiber

2.1 重复频率的影响

在其它参量一定的情况下,降低输入信号的重复频率有利于增益介质储能,从而有利于脉冲能量和峰值功率的提高。但是,降低重复频率使得脉冲间隔增加,也有利于 ASE 的积累。因此,在设计放大器是应合理选择输入信号的重复频率。

图 3 所示为计算得到的抽运功率分别为 100W, 200W 和 300W 时,铒镱共掺放大器输出特性随重复频率的变化。增益光纤长度分别为 6m, 10m 和 13m,输入信号是半峰全宽为 100ns、峰值功率 50W 的高斯脉冲。从图中可以看出,在抽运功率一定时,存在一个最佳的重复频率,使得脉冲能量和峰值功率达到最大值。最佳重复频率随抽运功率的升高而提高。当重复频率

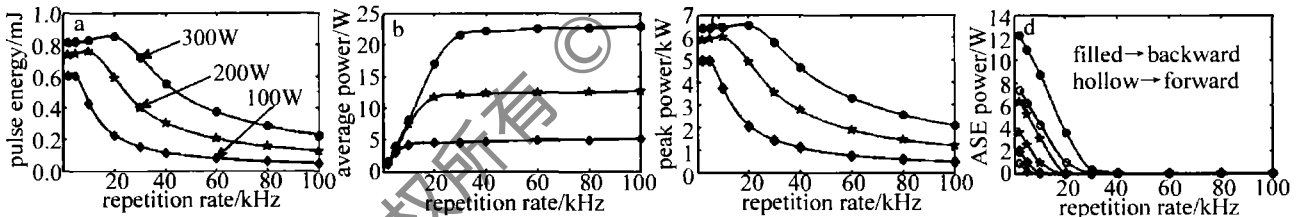


Fig. 3 Output characteristics of an amplifier under different pump power

低于最佳重复频率时,因 ASE 平均功率迅速增长(见图 3d),输出脉冲能量和峰值功率相对最佳重复频率时会有所降低。应该说明,上述数值模拟结果是在假设增益光纤端面无反射的条件下进行了。若存在端面反射,ASE 功率增长到一定程度会诱发寄生振荡,极大

地降低放大器的性能,甚至使其无法正常工作。

图 4 所示为抽运功率 300W、重复频率 10kHz 时,脉冲经过后 ASE 总功率的变化。从图 4 和图 3a 中可以看出,最佳重复频率由 ASE 自饱和时间(脉冲经过后 ASE 功率由最低到饱和和所需的时间)决定,二者之间近似成反比关系。

2.2 输入信号峰值功率的影响

图 5 所示为输入信号峰值功率改变时,放大器输出特性的变化。计算中所用的抽运功率为 300W,信号是半峰全宽为 100ns 的高斯脉冲,重复频率为 10kHz,增益光纤长度为 13m。从图中可以看出,输入信号的峰值功率提高时,脉冲能量和峰值功率均有所提高,ASE 平均功率有所下降。可见,通过提高输入信号峰值功率对抑制 ASE 有一定作用。

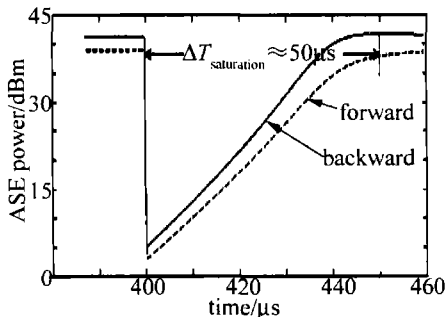


Fig. 4 Variation of the total ASE power after a pulse under 300W pump power and 10kHz repetition rate

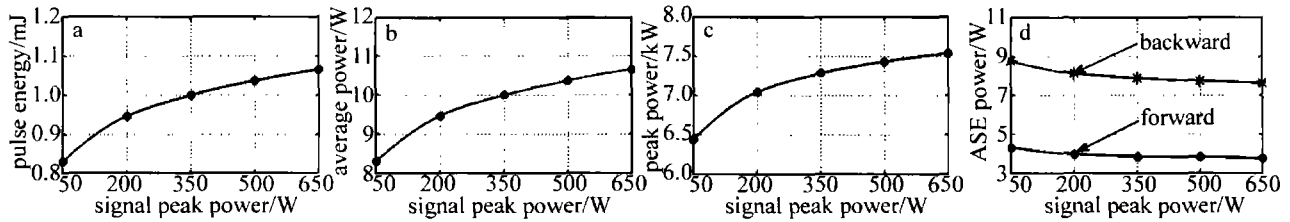


Fig. 5 Output characteristics of an amplifier as a function of the input signal peak power

2.3 输入信号脉冲宽度的影响

图6所示为输入信号脉冲宽度改变时,放大器输出特性的变化。计算中所用的抽运功率为300W,信

号为峰值功率500W、重复频率20kHz的高斯脉冲,增益光纤长度为13m。从图6c中可以看出,随着半峰全宽的变窄,脉冲峰值功率迅速提高。这是因为脉宽变

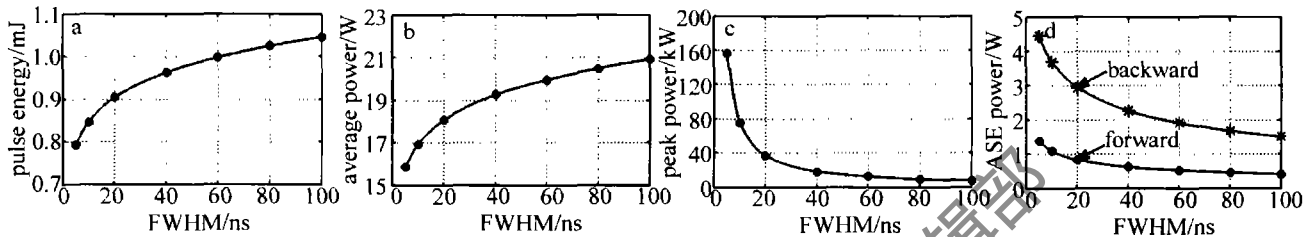


Fig. 6 Output characteristics of an amplifier as a function of the FWHM of the input signal

窄,脉冲前后沿变窄,脉冲经过放大器时,增益介质中储存的能量通过受激辐射在更短的时间内得以释放,因此使得峰值功率急剧提高。但是脉宽变窄也使得脉冲从增益介质提取能量的时间变短,脉冲经过放大器后所提取的总能量下降,因此单脉冲能量会降低(见图6a)。在相同的抽运条件下,脉冲提取能量的下降,使得放大器中的平均增益提高,更有利于ASE的快速积累而饱和,因此ASE平均功率升高(见图6d)。

实际应用的需要,合理选择放大器参量,使放大器工作在最佳重复频率附近,以获得最佳的脉冲输出和性价比。

根据前面的讨论,在其它条件相同的情况下,放大器工作在最佳重复频率时得到的脉冲能量和峰值功率最高,而且最佳重复频率与ASE自饱和时间成反比。随着脉宽变窄,ASE自饱和时间缩短,最佳重复频率也会随之提高,即最佳重复频率与脉宽之间是成反比例的关系。图6所示的情况,在信号的半峰全宽为100ns时,放大器工作在最佳重复频率约20kHz,在半峰全宽小于100ns时,放大器的最佳重复频率应大于20kHz,脉宽越窄,最佳重复频率越高,因此随着脉宽变窄,如果适当提高重复频率,可以提高单脉冲能量并进一步提高脉冲的峰值功率。

参考文献

- [1] YOONCHAN J, SEONGWOO Y, CODERAARD C A, *et al.* Erbium:ytterbium co-doped large-core fiber laser with 297W continuous-wave output power [J]. *Selected Topics in IEEE J Q E*, 2007, 13(3): 573-579.
- [2] PHILIPPOV V, SAHU J K, CODEMARD C, *et al.* All-fiber 1.15mJ pulsed eye-safe optical source [C]//*Solid State Laser Technologies and Femtosecond Phenomena*. Bellingham: International Society for Optical Engineering, 2004: 284-288.
- [3] SINTOV Y, GLICK Y, KOPLOWITZ T, *et al.* Extractable energy from erbium-ytterbium co-doped pulsed fiber amplifiers and lasers [J]. *Opt Commun*, 2008, 281(5): 1162-1178.
- [4] YAHEL E, HARDY A. Efficiency optimization of high-power, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber amplifiers for wavelength-division-multiplexing applications [J]. *J O S A*, 2003, B20(6): 1189-1197.
- [5] CANAT G, MOLLIER J C, BOUZINAC J P, *et al.* Dynamics of high-power erbium-ytterbium fiber amplifiers [J]. *J O S A*, 2005, B22(11): 2308-2318.
- [6] ZHUANG M L, ZHAO Sh H, DONG Sh F, *et al.* Numerical analysis of the population distribution characteristics in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped double-clad fiber amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4): 379-382 (in Chinese).
- [7] PRESS W H, TEUKOLSKY S A, VETTERLING W T, *et al.* Numerical recipes: the art of scientific computing [M]. 3ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 1024-1097.
- [8] MORASSE B, AGGER S, CHATIGNY S, *et al.* 10W ASE-free single mode high power double cladding $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ amplifier [C]//*Fiber Lasers IV: Technology, Systems, and Applications*. San Jose: International Society for Optical Engineering, 2007: 645324/1-645324/8.
- [9] CorActive. com. CorActive high power Er/Yb doped fibers PM and non-PM [EB/OL]. [2006-05-31]. <http://www.coractive.com/an/pdf/highpowererdoped.pdf>.

3 小结

通过对钕镱共掺光纤放大器理论模型的求解,对不同抽运、信号和光纤参量配置情况下,ASE对放大器性能的影响进行了模拟分析。研究发现,由于ASE自饱和的限制,在其它条件相同的情况下,为了得到最高的单脉冲能量和峰值功率,放大器输入信号存在一个最佳的重复频率,且该最佳重复频率与抽运功率成正比与脉冲宽度成反比。在放大器的设计中,应根据实