

掺 Yb^{3+} 光纤激光器 MOPA 工作方式中的 放大自发辐射

沈琪皓 伍波 周鼎富 何幸镨 杨泽后 杨峰 赵斌 杨闯

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘要 为了研究光纤激光器工作中的自发辐射现象,从掺 Yb^{3+} 光纤的能级结构和速率方程出发,建立主振荡功率放大(MOPA)光纤激光器的数学模型,对系统内各参量进行了数值计算。分析结果显示:在抽运工作稳态条件下,放大器的系统储能和自发辐射受到抽运强度和粒子掺杂浓度的影响;对于低重复频率的脉冲信号,放大过程中的自发辐射非常严重。为了减弱自发辐射,将连续抽运换成适当脉宽的脉冲抽运,即在信号脉冲前进行一段能够刚好让上能级粒子数充分恢复的脉冲抽运,可以在不影响信号脉冲放大的前提下,明显削弱连续抽运情况持续存在的自发辐射。数值模拟表明该方法在适当的抽运脉宽和强度下是可行的,实验数据则较为完好地印证了计算结果。

关键词 激光器; 光纤激光; 放大自发辐射; 数值计算; 掺 Yb^{3+} 光纤放大器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.071402

Amplified Spontaneous Emission of Yb^{3+} -Doped Fiber Laser Based on MOPA

Shen Qihao Wu Bo Zhou Dingfu He Xingkai Yang Zehou Yang Feng
Zhao Bin Yang Chuang

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract In order to research the phenomenon of spontaneous emission in fiber laser, the numerical model of master oscillator power amplifier (MOPA) system is established based on the energy-level structure and rate equation of Yb^{3+} -doped fiber. The analysis results by numerical calculation show that the system energy storage and amplified spontaneous emission (ASE) of amplifier are influenced by the pump power and particle population. The ASE is extremely serious in amplifying process with a low repetition rate. To reduce the ASE, continuous pump is changed to pulse pump, which means that a period of pump pulse that recovers the upper-level population adequately is set before the signal pulse. The ASE existing continuously in continuous pump system could be reduced obviously without influencing the signal pulse amplification. Numerical simulation shows that this method is feasible with a suitable pulse width and pump power, furthermore, the result of corresponding experiment agrees well with the calculation result.

Key words lasers; fiber laser; amplified spontaneous emission; numerical calculation; Yb^{3+} -doped fiber amplifier

OCIS codes 140.3510; 140.3615; 060.2320

1 引言

随着光纤制造工艺与半导体激光器生产技术的日趋成熟,光纤激光器和光纤放大器得到快速发展,光纤激光器作为光源在光通信领域已得到广泛应用。双包层掺杂光纤的出现大大提升了光纤激光器的出光功率,各类工作方式的光纤激光器受到广泛的关注和研究^[1-6]。光纤激光器以其光束质量好、结构简单、成本低廉等优势在通信、传感、工业加工、医疗和军事等方面得到广泛应用,成为部分传统激光器的理想替代者。

增益光纤大都采用掺稀土元素作为增益介质,其中 Yb^{3+} 粒子拥有较宽的吸收带和发射带,对抽运源波长要求宽松,发射波长选择范围较大。此外,掺 Yb^{3+} 光纤具有能级结构简单、掺杂浓度高、吸收发射效率高等优点^[7],因而备受青睐。在国内,利用掺 Yb^{3+} 双包层光纤研制的光纤激光器输出功率已达到千瓦量级^[8-9]。

收稿日期: 2013-01-10; **收到修改稿日期**: 2013-02-14; **网络出版日期**: 2013-06-20

作者简介: 沈琪皓(1984—),男,工程师,主要从事高功率光纤激光器及其应用等方面的研究。

E-mail: shen_qihao@163.com

主振荡功率放大(MOPA)采用种子光源连接光纤放大器的方式,是获取高峰值功率脉冲激光的主要方法^[10-14],放大脉冲峰值功率达 4.5 MW 的光纤放大器已有报道^[15-16]。但是在 MOPA 的工作方式下,受粒子掺杂浓度^[17]、光纤长度、截面填充因子、抽运强度^[18]等因素的影响,自发辐射伴随着整个放大过程,给光谱线宽、转换效率等方面带来负面影响。本文对 MOPA 工作方式中的自发辐射进行了数值模拟和实验验证,对其特性及抑制方法进行探讨。

2 数学模型

根据 Yb^{3+} 粒子的二能级简化结构及激光在光纤中的传输特性,MOPA 工作方式下掺 Yb^{3+} 光纤中的激光传输方程可描述为^[19]

$$\pm \frac{\partial P_p^\pm(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial P_p^\pm(z,t)}{\partial t} = -\Gamma_p [\sigma_a(\lambda_p) N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_p) N_2(z,t)] \cdot P_p^\pm(z,t) - \alpha(\lambda_p) P_p^\pm(z,t), \quad (1)$$

$$\pm \frac{\partial P_k^\pm(z,t,\lambda_k)}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial P_k^\pm(z,t,\lambda_k)}{\partial t} = \Gamma_k [\sigma_e(\lambda_k) N_2(z,t) - \sigma_a(\lambda_k) N_1(z,t)] \cdot P_k^\pm(z,t,\lambda_k) - \alpha(\lambda_k) P_k^\pm(z,t,\lambda_k) + 2\sigma_e(\lambda_k) N_2(z,t) \frac{hc^2}{\lambda_k^3} \Delta\lambda + S_{\alpha\text{Rs}}(\lambda_k) \cdot P_k^\mp(z,t,\lambda_k) \quad (k = 1, 2, 3, \dots, S, \dots, K), \quad (2)$$

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA} [\sigma_a(\lambda_p) N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_p) N_2(z,t)] \cdot [P_p^+(z,t) + P_p^-(z,t)] + \frac{\Gamma_k}{hcA} \sum_{k=1}^K \lambda_k [\sigma_a(\lambda) N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda) N_2(z,t)] \cdot [P_k^+(z,t) + P_k^-(z,t)] - \frac{N_2(z,t)}{\tau}, \quad (3)$$

$$N_t = N_1(z,t) + N_2(z,t), \quad (4)$$

式中 $P_p^\pm(z,t)$ 表示时刻 t , 光纤中位置 z 前向(+) 和后向(-) 传输的抽运光功率; $P_k^\pm(z,t,\lambda_k)$ 表示波长为 λ_k 时的纤芯传输光功率; $\sigma_a(\lambda)$ 和 $\sigma_e(\lambda)$ 分别为各波长对应的吸收截面和发射截面; N_t 、 N_1 、 N_2 分别表示粒子总数、下能级粒子数和上能级粒子数; v 为各波长对应光在光纤中传输的群速度; Γ 为填充因子; A 为光纤掺杂部分截面面积; τ 为上能级粒子寿命; α 为光纤中的传输衰减系数; $S_{\alpha\text{Rs}}$ 为瑞利散射系数。

(1)式描述了前后向抽运光在时间和空间上的光功率全微分增量,包括粒子对抽运光的吸收与发射、抽运自身的传输衰减。(2)式描述了光纤中 K 个波长($\lambda_k, k = 1, 2, 3, \dots, S, \dots, K$) 的光在时间和空间上的光功率全微分增量,其中 $k = S$ 的一组方程对应信号光放大,其他波长($\lambda_k, k \neq S$) 不为信号光所对应,可认为是自发辐射,该方程组包括粒子对各波长激光的吸收与发射、各波长带宽内($\Delta\lambda$) 自发辐射、光传输衰减以及放大过程中的后向瑞利散射量。(3)式描述了光纤中上能级粒子数 N_2 在时间上的微分增量,该增量由该位置的上能级粒子数、前后向抽运光以及前后向各波长激光共同决定。(4)式表示粒子总数守恒。

根据传输方程,为了求解任意时刻光纤中任意位置的抽运、信号、自发辐射功率及上能级粒子数等参量,需要知道两部分边界条件:一部分为任意时刻光纤两端注入的抽运光功率 $P_p^\pm(0,t)$ 、 $P_p^\pm(Z,t)$ 和激光功率 $P_k^\pm(0,t)$ 、 $P_k^\pm(Z,t)$;另一部分为初始时刻光纤中每一位置的上能级粒子数分布 $N_2(z,0)$ 。其中第一部分边界条件根据实际情况取得,第二部分边界条件不易直接取得,可以将上能级粒子数先取为 0,让光纤放大器模型在该条件下运行。迭代计算显示,模型工作一段时间(约为 1 ms)后,上能级粒子数分布会趋于一稳定值,该值即可作为第二部分边界条件使用。

3 数值计算

根据第 2 节中的数学模型,结合实验中使用的光纤情况,选取表 1 所示光纤参数^[19](其他波长的吸收发射截面系数对照图 1 中 Yb^{3+} 粒子的吸收发射截面曲线取得),对光纤中的上能级粒子数、信号光和自发辐射光功率、功率谱密度等参量的分布进行数值计算。

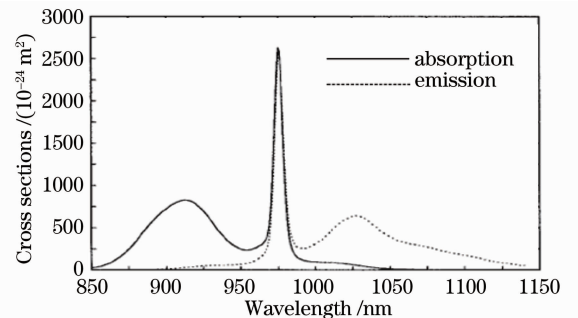


图 1 Yb^{3+} 粒子的吸收、发射截面

Fig. 1 Absorption and emission cross sections of Yb^{3+}

表 1 系统模型中使用参数

Table 1 Parameters used in the system model

Central wavelength of pump	λ_p/nm	975
Center wavelength of signal	λ_s/nm	1064
Wavelength vange	$\lambda_l \sim \lambda_k/\text{nm}$	950~1100
Doped area	A/m^2	3×10^{-10}
Fiber length	Z/m	5
Signal bandwidth	$\Delta\lambda/\text{nm}$	2
Total population	N_t/m^{-3}	6×10^{25}
Overlapping factor of pump	Γ_p	0.01
Overlapping factor of signal	Γ_k	0.85
Upper-level particle lifetime	τ/s	8.4×10^{-4}
Rayleigh scattering coefficient	$S_{\text{aRS}}(\lambda_k)/\text{m}^{-1}$	1.2×10^{-7}
Fiber attenuation coefficient of pump	$\alpha(\lambda_p)/\text{m}^{-1}$	3×10^{-3}
Fiber attenuation coefficient of signal	$\alpha(\lambda_k)/\text{m}^{-1}$	5×10^{-3}
Absorption cross section of pump	$\sigma_a(\lambda_p)/\text{m}^2$	2.5×10^{-24}
Emission cross section of pump	$\sigma_e(\lambda_p)/\text{m}^2$	2.5×10^{-24}
Absorption cross section of signal	$\sigma_a(\lambda_s)/\text{m}^2$	5×10^{-27}
Emission cross section of signal	$\sigma_s(\lambda_s)/\text{m}^2$	3.4×10^{-25}

图 2(a)和(b)分别显示了前向连续抽运功率为 20、40、60、80 W,无信号光注入情况下上能级粒子数和自发辐射功率的稳态分布。两者结合显示,上能级粒子储能集中于光纤中部,自发辐射集中于光纤的两端,自发辐射极大地消耗了系统储能。图 3(a)和(b)分别显示了抽运功率为 20 W 和 80 W 时光纤输出位置 $z=Z$ 的自发辐射光谱,自发辐射的中心波长集中在 1035 nm 附近,谱线宽度约为 20 nm,由于掺 Yb^{3+} 光纤激光器的输出波长通常为 1064 nm,这样的自发辐射分布并不利于窄线宽的信号放大。

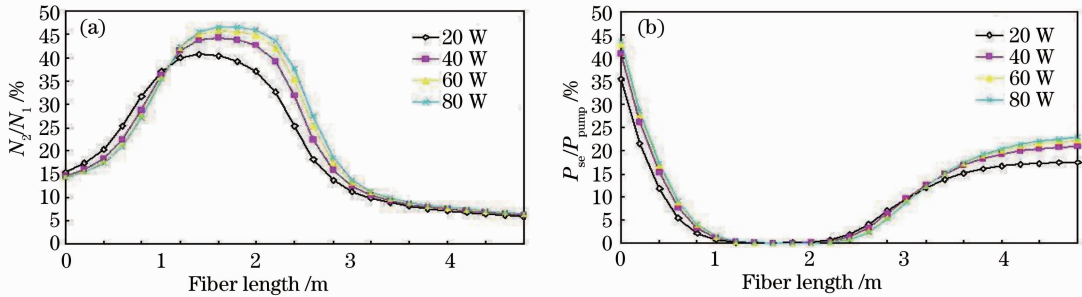


图 2 前向抽运作用下(a)上能级粒子数及(b)自发辐射功率稳态分布

Fig. 2 Steady distributions of (a) upper-level population and (b) spontaneous emission power with forward pump

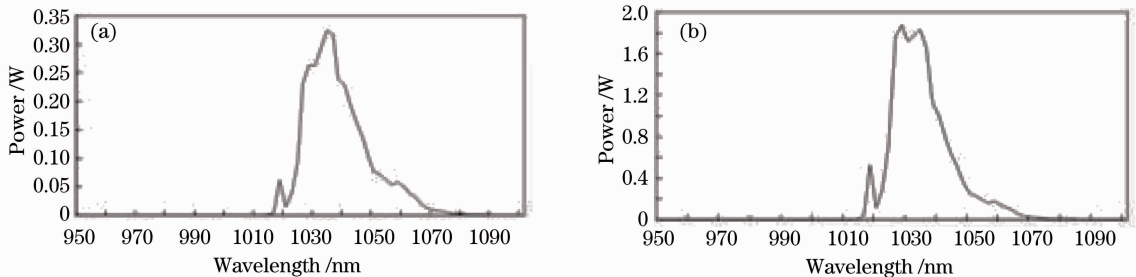


图 3 不同功率前向抽运作用下的自发辐射光谱。(a) 20 W; (b) 80 W

Fig. 3 Spontaneous emission spectrum with forward pump at different powers. (a) 20 W; (b) 80 W

将连续或高重复频率的种子光注入光纤,相比于自发辐射种子光更容易获取系统储能,因此可以表现出较好的光谱特征。图 4(a)显示了 10 kHz 种子光放大后的光谱。但如果降低种子光功率或重复频率,自发辐射将获取部分系统储能,图 4(b)和(c)分别为将种子光重复频率降低到 1 kHz 和 100 Hz 情况下的输出光谱。可以看出,随着种子光重复频率的降低,自发辐射开始出现。当重复频率降低至 100 Hz 时,自发辐射已经占据明显优势。

针对 100 Hz 时自发辐射较强这种情况,将连续抽运换成一定脉宽的脉冲抽运可以在不影响信号放大的情况下较好地削弱自发辐射。具体方式为先进行一段时间的抽运,在上能级粒子数刚达到饱和(即系统储能最大)时关闭抽运,随即注入信号脉冲,直至下一个周期,脉冲抽运可以消除信号占空段不必要的自发辐射。抽运脉宽的选择与光纤各项参数相关,对其影响最大的是 Yb^{3+} 粒子的上能级寿命,在本计算中,脉冲宽度选择为 1 ms,该值同时也表明此方法只对重复频率小于 1 kHz 的脉冲信号放大有效。图 4(d)为 100 Hz 脉冲信号放大使用该方法后的效果,对比图 4(c),其信号光功率谱密度未受影响,但自发辐射得到了明显的削弱。

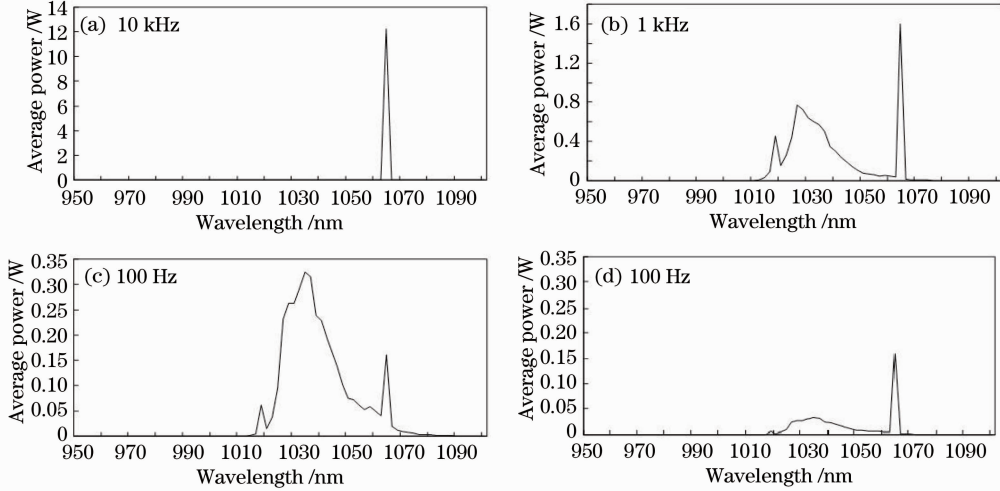


图 4 不同重复频率种子光时的信号及放大自发辐射光谱。(a) 10 kHz; (b) 1 kHz; (c) 100 Hz; (d) 100 Hz 且采用脉冲抽运

Fig. 4 Spectra of signal and ASE with different repetition rates of seed light. (a) 10 kHz; (b) 1 kHz; (c) 100 Hz; (d) 100 Hz with pulse pump

4 实验对比

对应模拟计算,在实验中选择一长度 5 m,纤芯直径 $6 \mu\text{m}$ 的掺 Yb^{3+} 单模光纤,采用 MOPA 工作方式,前向注入中心波长 1064 nm、能量 100 nJ 以及重复频率可调的信号光,以及一峰值功率 300 mW,从连续到重复频率 100 Hz 可调的抽运光。

首先,实验进行了连续抽运情况下 1 kHz 和 100 Hz 的信号放大,输出光谱分别如图 5(a)和(b)所示,其

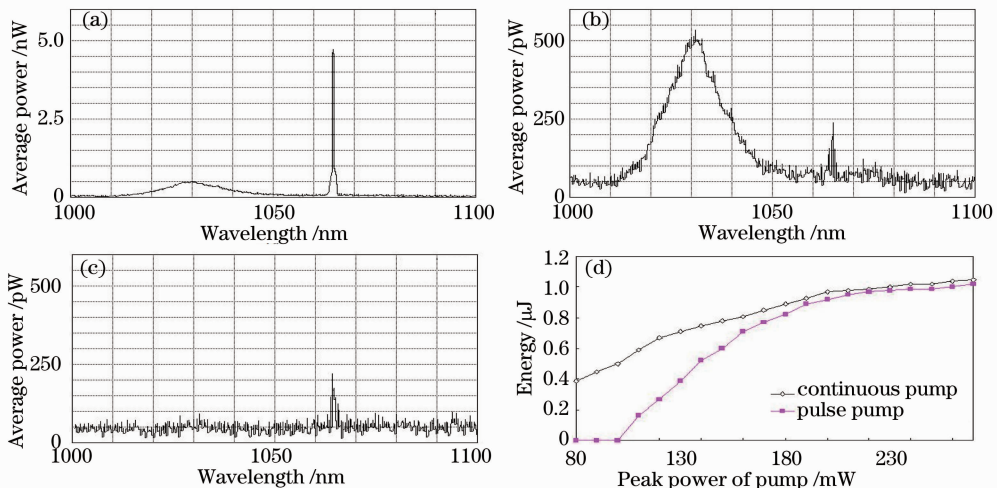


图 5 连续及脉冲抽运方式下的信号放大。(a) 1 kHz,连续抽运;(b) 100 Hz,连续抽运;

(c) 100 Hz,脉冲抽运;(d) 放大信号能量对比

Fig. 5 Amplified signal with continuous pump and pulse pump. (a) 1 kHz continuous pump; (b) 100 Hz, continuous pump; (c) 100 Hz, pulse pump; (d) comparison of amplified signal energy

光谱分布与数值计算结果较为符合,即 100 Hz 情况下自发辐射明显严重,且分布在 1030 nm 附近。

其次,进行了 100 Hz 重复频率下,将连续抽运改为脉冲抽运工作方式的实验,抽运脉宽选取为 1 ms,由一信号发生器保证抽运脉冲结束后信号立刻进入,且两者保持相同重复频率的同步关系,输出光谱如图 5(c)所示,1030 nm 位置的自发辐射得到了明显的削弱,与数值计算结果也较为符合。

为了验证脉冲抽运对信号放大能量的影响,在光纤输出端加一 1064 nm 的带通光片,滤除自发辐射波段,仅对比放大信号能量。重复 100 Hz 下的连续抽运和脉冲抽运实验,如图 5(d)所示两种方式的输出脉冲能量在抽运功率较强时几乎一致,即脉冲抽运方式在削弱自发辐射的同时不会对信号放大产生负面影响,实验证明该方法可行的。

5 结 论

根据 Yb³⁺ 粒子的吸收发射特性及光纤中的光传输模型,对 MOPA 方式工作下的掺 Yb³⁺ 光纤激光器模型进行数值计算,求解了光纤中上能级粒子数和自发辐射光谱的稳定分布。在此基础上,分析了脉冲信号放大与自发辐射的关系。同时,理论计算和实验验证了低重复频率信号放大情况下,脉冲抽运对自发辐射较好的削弱效果,为工程中可能遇到的类似问题提供一种参考。

参 考 文 献

- 1 P Koplow, L Goldberg, R P Moeller, *et al.*. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(7): 442–444.
- 2 J Limpert, N Deguil-Robin, I Manek-Hönniger, *et al.*. High-power picosecond fiber amplifier based on nonlinear spectral compression[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(4): 714–716.
- 3 A K Abeeluck, C Headley, C G Jørgensen. High-power supercontinuum generation in highly nonlinear dispersion-shifted fibers by use of a continuous-wave Raman fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(18): 2163–2165.
- 4 R Selvas, J K Sahu, L B Fu, *et al.*. High-power, low-noise, Yb-doped, cladding-pumped, three-level fiber sources at 980 nm[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(13): 1093–1095.
- 5 J W Kim, P Jelger, J K Sahu, *et al.*. High-power and wavelength-tunable operation of an Er, Yb fiber laser using a volume Bragg grating[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(11): 1204–1206.
- 6 Wu Bo, Liu Yongzhi, Zhang Qianshu, *et al.*. High efficient narrow linewidth fiber laser based on fiber grating Fabry-Perot cavity[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(3): 350–353.
伍波,刘永智,张谦述,等.基于光纤光栅法布里-珀罗腔的高效窄线宽光纤激光器[J].*中国激光*, 2007, 34(3): 350–353.
- 7 Lou Qihong, Zhou Jun, Kong Lingfeng, *et al.*. Recent progress of high power pulsed double cladding fiber lasers[J]. *Chinese J Quantum Electronics*, 2005, 22(4): 510–515.
楼祺洪,周军,孔令峰,等.高功率脉冲双包层光纤激光器的新进展[J].*量子电子学报*, 2005, 22(4): 510–515.
- 8 Liu Zejin, Wang Xiaolin, Zhou Pu, *et al.*. 1.56 kW high power output with the coherent combination of nine fiber lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(7): 0705008.
刘泽金,王小林,周朴,等.9路光纤激光相干合成实现 1.56 kW 高功率输出[J].*中国激光*, 2011, 38(7): 0705008.
- 9 Yan Pin, Xiao Qirong, Fu Chen, *et al.*. 1.6 kW all-fiber ytterbium-doped fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0416001.
闫平,肖起榕,付晨,等.1.6 kW 全光纤掺镱激光器[J].*中国激光*, 2012, 39(4): 0416001.
- 10 Zhao Xiaojun, Xiao Yongliang, Wang Conggang, *et al.*. Simulation of pulse fiber amplifier with high peak power based on MOPA method [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(2): 172–175.
赵晓军,肖永亮,王从刚,等.MOPA 方式高峰值功率脉冲光纤放大器模拟[J].*激光技术*, 2009, 33(2): 172–175.
- 11 Wu Bo, Du Weimin, Hou Tianjin, *et al.*. High power narrow linewidth fiber amplifier and laser linewidth[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(7): 1866–1869.
伍波,杜伟敏,侯天晋,等.高功率窄线宽光纤放大器及放大线宽特性[J].*中国激光*, 2009, 36(7): 1866–1869.
- 12 Y Wang. Optimization of pulse amplification in ytterbium-doped double clad fiber amplifiers[J]. *J Lightwave Technol*, 2005, 23(6): 2139–2147.
- 13 Wang Xiongfei, Zhao Hong, Zhu Chen, *et al.*. Output characteristics of high-repetition-rate narrow-pulse-width pulsed fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(7): 1870–1875.
王雄飞,赵鸿,朱辰,等.高重复率窄脉宽光纤激光器的输出特性实验研究[J].*中国激光*, 2009, 36(7): 1870–1875.
- 14 Liu Xia, Du Songtao, Xue Yuhao, *et al.*. High repetition rate nanosecond pulse fiber amplifier based on China-made large-mode-area fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(7): 1876–1879.

- 刘 侠, 杜松涛, 薛宇豪, 等. 基于国产大模场面积双包层光纤的高重复频率纳秒脉冲光纤放大器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1876—1879.
- 15 C D Brooks, F D Teodoro. Multimegawatt peak-power, single-transverse-mode operation of a 100 μm core diameter, Yb-doped rodlike photonic crystal fiber amplifier[J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(11): 111119.
- 16 A Galvanauskas, M Y Cheng, K C Hou, *et al.*. High peak power pulse amplification in large-core Yb-doped fiber amplifiers [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2007, 13(3): 559—566.
- 17 Wu Yuexiang, Ma Xiaoming, Zhao Xiaoji. Effects of Er^{3+} and Yb^{3+} concentration on gain and noise coefficient of fiber amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1057—1061.
吴粤湘, 马晓明, 赵晓吉. 钕镱共掺特性对光放大器增益和噪声系数的影响[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1057—1061.
- 18 Xiang Zhen, Wang Dan, Li Tong, *et al.*. Numerical simulation and analysis for gain guiding effect in master oscillator power amplifier lasers[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0502004.
项 震, 汪 丹, 李 通, 等. 主振荡功率放大激光器增益导引效应的数值模拟及分析[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502004.
- 19 Y Wang, H Po. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification[J]. J Lightwave Technol, 2003, 21(10): 2262—2270.