

文章编号: 0258-7025(2008)06-0835-05

# 连续掺镱光纤放大器的提取效率

殷树鹏 闫平 李晨 巩马理

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

**摘要** 连续光纤激光器在加工及军事等领域都有重要应用。为了研究掺镱光纤放大器中影响提取效率的关键因素, 在稳态激光速率方程基础上, 考虑光纤放大器中自发辐射放大, 建立了高功率光纤放大器的数值模型, 并分析提取效率与光纤端面反射率, 信号光功率以及抽运光功率之间的关系。采用反向抽运光纤放大器的实验方案, 对有关提取效率的理论分析进行了初步验证。理论计算结果与实验验证结果的偏差小于 10%。研究结果定性描述了光纤端面反射率、信号光的功率和抽运光的功率对光纤放大器提取效率的影响。

**关键词** 光纤光学; 光纤放大器; 提取效率; 放大自发辐射

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Extraction Efficiency in Continuous-Wave Ytterbium-Doped Fiber Amplifier

Yin Shupeng Yan Ping Li Chen Gong Mali

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Continuous-wave fiber amplifier plays an important role in the field of manufacture and military. In order to investigate the critical factors that modify the extraction efficiency of continuous-wave ytterbium-doped fiber amplifier, this paper describes a model of a fiber amplifier incorporating amplified spontaneous emission (ASE) based on the steady-state rate equations. The relationships between extraction efficiency and the reflectivity of fiber ends, signal power, pump power are researched. The model by comparing predictions with experimental results obtained from backward pump fiber amplifier was tested. Deviation of these two results is less than 10%. The results show that how the extraction efficiency of fiber amplifier is impacted by those factors and these influences could be beneficial to the design and application of continuous-wave high power fiber amplifier.

**Key words** fiber optics; fiber amplifier; extraction efficiency; amplified spontaneous emission

### 1 引言

掺镱光纤激光器、光纤放大器与传统的固体激光器<sup>[1]</sup>相比, 具有高功率输出、高光束质量、高效率以及散热性良好等诸多优点, 特别是近年来特种光纤技术和高亮度半导体激光器技术的不断进步, 使其得到了飞速发展, 在加工、传感、雷达以及医学<sup>[2~5]</sup>等领域的应用日趋广泛。目前, 连续运转光纤激光振荡器的输出功率已经达到 1.36 kW<sup>[6]</sup>。光纤放大器亦可以对激光进行有效的放大, 从而获得高功率激光输出。

C. Jones 等<sup>[7]</sup>对掺镱光纤放大器在低功率水平

下的提取效率进行了详细的理论分析并在毫瓦量级上给出了初步的实验验证。美国密歇根州大学获得了高脉冲能量的光纤激光输出<sup>[8]</sup>, 纳秒级激光脉冲宽度 50 ns, 单脉冲能量 27 mJ。然而目前对于掺镱光纤放大器放大特性的理论分析与实验工作都是集中在低功率水平下或脉冲体制下的研究。本文研究了高功率连续光纤放大器中, 功率提取效率与光纤端面反射情况、信号功率水平以及抽运功率水平等因素的关系, 为连续高功率掺镱光纤放大器的设计提供依据。

收稿日期: 2007-08-16; 收到修改稿日期: 2007-11-02

作者简介: 殷树鹏(1983—), 男, 吉林人, 博士研究生, 主要从事高功率光纤激光器研究。

E-mail: ysp06@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介: 巩马理(1959—), 男, 四川人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光技术及光电子信息工程研究。

E-mail: gongml@mail. tsinghua. edu. cn

## 2 理论分析与数值计算

抽运光耦合进入光纤使增益光纤处于粒子数反转分布的状态,当信号光单程经过增益光纤后,能否将光纤内储存的抽运功率有效地提取出来并使之转化为激光输出,关键在于增益光纤内的放大自发辐射(ASE)能否得到有效的抑制。首先建立计算正反方向放大自发辐射功率分布的数值模型,以此作为分析光纤放大器提取效率的基础,进一步探讨各方面因素对提取效率的影响。

数值计算以二能级速率方程理论为基础,考虑放大自发辐射对反转粒子数的消耗,得到速率方程

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} = -\frac{dN_2}{dt} = & \left( \frac{\sigma_{ep}P_p\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{\sigma_{es}P_s\Gamma_s}{h\nu_s A} + \right. \\ & \left. \sum_j \frac{\sigma_{e,j}P_{ASE,j}\Gamma_{ASE,j}}{h\nu_j A} + \frac{1}{\tau} \right) N_2 - \\ & \left( \frac{\sigma_{ap}P_p\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{\sigma_{as}P_s\Gamma_s}{h\nu_s A} + \sum_j \frac{\sigma_{a,j}P_{ASE,j}\Gamma_{ASE,j}}{h\nu_j A} \right) N_1. \end{aligned} \quad (1)$$

建立速率方程后,可以由增益光纤上任一点的激光强度来计算该处的粒子数分布状态。建立抽运功率、激光功率以及各波段放大自发辐射功率的功率传输方程[9]

$$\pm \frac{dP_p}{dz} = (N_2\sigma_{ep} - N_1\sigma_{ap})P_p\Gamma_p - \alpha_p P_p, \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_s}{dz} = (N_2\sigma_{es} - N_1\sigma_{as})P_s\Gamma_s - \alpha_s P_s, \quad (3)$$

$$\pm \frac{dP_{ASE,j}}{dz} = (N_2\sigma_{e,j} - N_1\sigma_{a,j})P_{ASE,j}\Gamma_{ASE,j} - \alpha_{ASE} P_{ASE,j} + N_2\sigma_{e,j} \frac{2hc^2 \Delta\lambda_{ASE}}{\lambda^3}, \quad (4)$$

式中  $P_p$  为抽运光总功率,  $P_s$  为激光总功率,将 800~1200 nm 的放大自发辐射光谱划分为 80 等份,  $P_{ASE,j}$  为第  $j$  波段的放大自发辐射功率;信号光波长选取 1090 nm,抽运光波长选取 975 nm;  $N_1$  为下能级粒子数密度,  $N_2$  为上能级粒子数密度,  $N_1 + N_2 = 4.5 \times 10^{25}/\text{m}^3$ ; 抽运吸收截面  $\sigma_{ap} = 2.28 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ , 抽运发射截面  $\sigma_{ep} = 2.28 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ , 激光吸收截面  $\sigma_{as} = 7.11 \times 10^{-27} \text{ m}^2$ , 激光发射截面  $\sigma_{es} = 2.50 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_{a,j}$  和  $\sigma_{e,j}$  分别为第  $j$  波段放大自发辐射的吸收和发射截面;  $\text{Yb}^{3+}$  上能级寿命  $\tau$  为 1 ms。数值计算所选取的增益光纤的技术指标为:纤芯直径  $d = 30 \mu\text{m}$ , 抽运包层直径  $D = 600 \mu\text{m}$ , 光纤长度  $L = 7 \text{ m}$ 。

根据以上给出的理论模型以及相关参数的赋值,可以求解各种不同条件下正反两个方向的放大

自发辐射功率沿增益光纤的分布,得到自发辐射消耗反转粒子数的情况,进而分析光纤放大器提取效率的表现和变化规律。

### 2.1 光纤端面反射率的影响

增益光纤两端均为与光纤轴线成  $10^\circ$  夹角的倾斜端面,可以有效抑制正反两个方向的激光反馈,实现激光的单程放大。并且掺镱光纤的高增益特性亦可以保证激光放大器具有很高的提取效率。但光纤端面的角度会影响光纤的数值孔径,改变激光的发射方向,特别是对于目前广泛采用的低数值孔径增益光纤,端面角度将严重影响信号光的耦合。如图 1 所示,输入信号光 5 W,假设光纤端面反射率为  $10^{-5}$  并以此作为微分方程组边界条件进行计算。结果显示,激光输出 45 W,两个方向的放大自发辐射均被压制在毫瓦量级。这是由于光纤端面的角度几乎完全抑制了两个方向的激光反馈,所以正反向放大自发辐射得不到反馈增强,始终处于较弱的辐射状态,只要输入一个小信号的种子激光,便可以使受激辐射占据主导地位,有效提取抽运功率。考虑抽运光的不完全吸收,计算光纤放大器的提取效率为

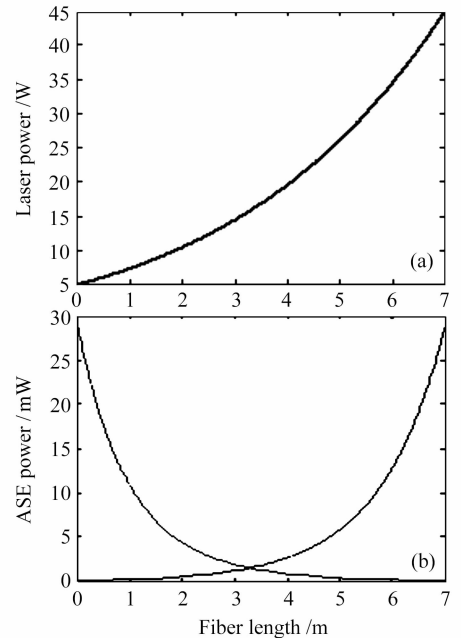


图 1 光纤两端为  $10^\circ$  倾斜角时光纤放大器的放大特性。(a) 激光功率沿光纤长度方向上的分布;(b) 正向和反向放大自发辐射功率沿光纤长度方向上的分布  
Fig. 1 Characteristics of fiber amplifier with two angled end faces of  $10^\circ$ . (a) laser power distribution as a function of fiber length; (b) forward and backward ASE power distribution as a function of fiber length

$$\eta = \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{in}}}{P_{\text{pump}}} = 83.8\%。 \quad (5)$$

信号输入端为垂直端面有利于信号光的耦合,但是菲涅耳反射将对放大自发辐射传输以及抽运功率的提取有所影响。激光输出端附近产生的放大自发辐射经过光纤反向传输至信号输入端并有 4% 被反馈,经过光纤正向传输至激光输出端,由于掺镱光纤具有极高的增益,所以该放大自发辐射两次经过光纤后将会在输出端消耗掉大量的反转粒子数,导致光纤放大器提取效率下降。如图 2 所示,同样输入信号光 5 W 的情况下,假设两光纤端面反射率分别为 0.04 和  $10^{-5}$  并以此作为微分方程组边界条件进行计算,结果显示激光输出为 41.3 W,正向放大自发辐射功率为 4.5 W,而反向放大自发辐射功率为 0.1 W,这是由于光纤端面反射率的差异破坏了放大自发辐射输出的平衡。考虑抽运光的不完全吸收,计算光纤放大器提取效率为 75.5%。

只有在输入信号光功率足够大的情况下,才可以压制放大自发辐射的增强,保证光纤放大器的提取效率。

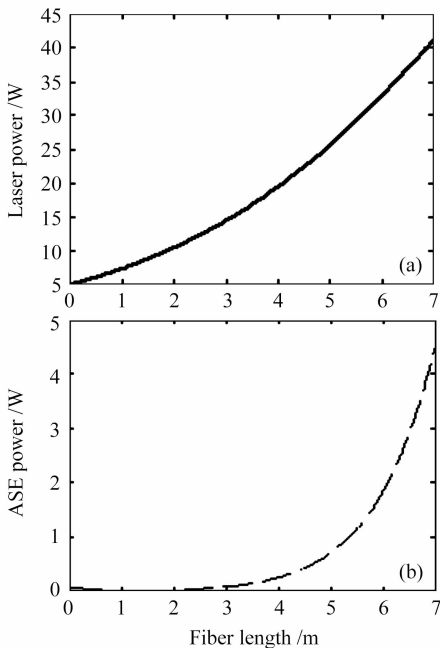


图 2 光纤信号输入端为垂直端面、输出端为倾斜端面时光纤放大器的放大特性。(a) 激光功率沿光纤长度方向上的分布;(b) 正向和反向放大自发辐射功率沿光纤长度方向上的分布

Fig. 2 Characteristics of fiber amplifier with input end straight and output end angled. (a) laser power as a function of fiber length; (b) forward and backward ASE power as a function of fiber length

光纤两端构成谐振腔,平行反馈使部分波长的放大自发辐射得到极大的增强,无法对输入的信号光实现有效的放大。如图 3 所示,输入 5 W 信号光的情况下,假设两光纤端面反射率均为 0.04 并以此作为微分方程组边界条件进行计算,结果显示激光输出为 4.1 W,没有得到放大,放大自发辐射功率为 23.6 W。

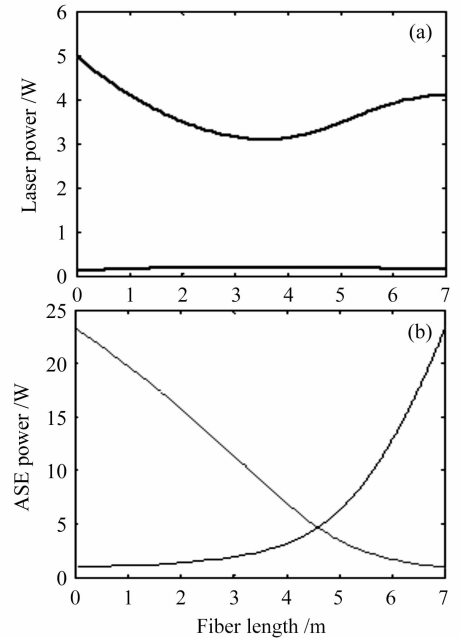


图 3 光纤两端均为垂直平面时光纤放大器的放大特性。(a) 激光功率沿光纤长度方向上的分布;(b) 正向和反向放大自发辐射功率沿光纤长度方向上的分布

Fig. 3 Characteristics of fiber amplifier with two straight end faces. (a) laser power as a function of fiber length; (b) forward and backward ASE power as a function of fiber length

## 2.2 信号光功率的影响

在 975 nm, 60 W 恒定功率反向抽运作用下,分别考虑斜面 ( $R = 10^{-5}$ )-斜面 ( $R = 10^{-5}$ ), 直面 ( $R = 0.04$ )-斜面 ( $R = 10^{-5}$ ) 两种不同光纤端面边界条件,计算光纤放大器的提取效率随输入信号光功率的变化规律,如图 4 所示。

增益光纤两端为倾斜端面时可以抑制放大自发辐射的反馈,小信号便可以提取出几乎全部的抽运功率,如图 4(a) 所示,当信号光功率为 1.5 W 时,提取效率达 80%,完全可以使抽运功率有效地转化为激光输出,随着信号的增强,提取效率变化十分缓慢并趋于极大值<sup>[10]</sup>。当增益光纤信号输入端存在 4% 反馈、输出端无反馈时,放大自发辐射的建立和加强将会消耗掉大量的抽运能量,小信号输入无法获得

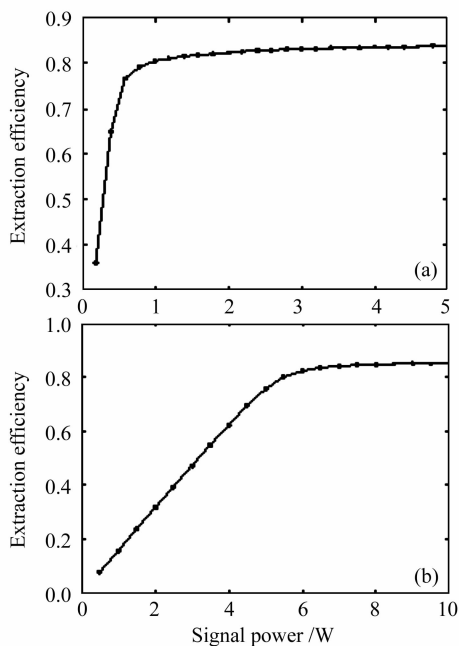


图4 掺镱光纤放大器提取效率与输入信号光功率之间的关系。(a)增益光纤两端为倾斜端面;(b)增益光纤信号输入端为垂直端面,输出端为倾斜端面

Fig. 4 Extraction efficiency of fiber amplifier changes as a function of signal power. (a) gain fiber with two angled end faces; (b) gain fiber with input end straight and output end angled

最大提取效率。如图4(b)所示,当输入信号光大于9 W的时候,放大自发辐射才被很好地压制,提取效率逐渐趋于最大值。

### 2.3 抽运光功率的影响

在输入一定功率信号光的情况下,分别考虑斜面( $R = 10^{-5}$ )-斜面( $R = 10^{-5}$ ),直面( $R = 0.04$ )-斜面( $R = 10^{-5}$ )两种不同光纤端面边界条件,计算光纤放大器提取效率随抽运光功率的变化规律,如图5所示。增益光纤两端为倾斜端面时,抽运光功率较低导致了信号光与放大自发辐射对反转粒子数的竞争激烈,提取效率无法达到极大值,随着抽运光功率的增加,提取效率不断增大直至趋于极大。当增益光纤信号输入端存在4%反馈、输出端无反馈时,需要注入更高功率的抽运光,并且在增大信号光功率的前提下,才可以有效抑制放大自发辐射的进一步放大,获得最大提取效率。

## 3 实 验

仅对连续掺镱光纤放大器提取效率的分析作了初步的验证。增益光纤采用武汉邮电科学院研制的掺镱光纤,纤芯直径 $30\ \mu\text{m}$ ,内包层直径 $600\ \mu\text{m}$ ,长

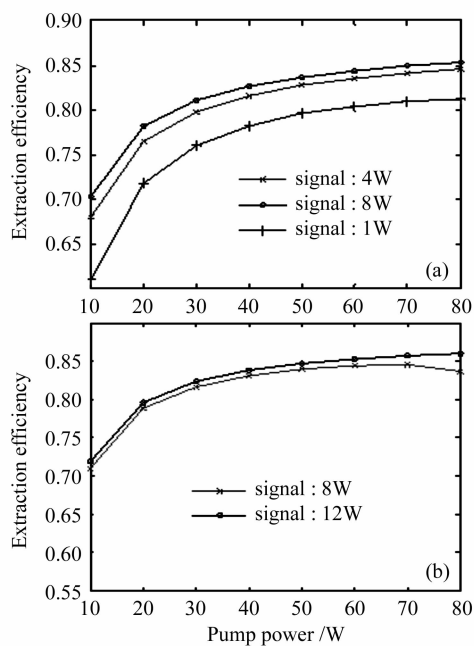


图5 掺镱光纤放大器提取效率与抽运光功率之间的关系。(a)增益光纤两端为倾斜端面;(b)增益光纤信号输入端为垂直端面,输出端为倾斜平面

Fig. 5 Extraction efficiency of fiber amplifier changes as a function of pump power. (a) gain fiber with two angled end faces; (b) gain fiber with input end straight and output end angled

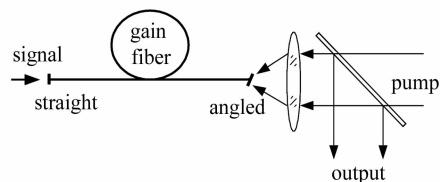


图6 掺镱光纤放大器实验装置

Fig. 6 Experimental setup of Yb-doped fiber amplifier 度为7 m,信号光输入端为垂直平面,激光输出端为 $10^\circ$ 倾斜角以抑制信号光的反馈。信号光波长1090 nm,抽运光波长975 nm,抽运光经过耦合镜由光纤倾斜端面注入增益光纤,反向抽运光纤放大器,输出激光由 $45^\circ$ 双色镜导出。具体实验方案如图6所示。

测量了同一抽运功率下,输入不同信号光所获得的输出。如图7(a)中曲线所示,提取效率随信号光功率的增加呈现增大的趋势,并且35.7 W抽运光作用下的提取效率总体上高于25.9 W抽运作用下的提取效率。图7(b)中曲线表示在输入3.45 W信号光功率的前提下,提取效率随抽运功率的变化规律。实验结果显示光纤放大器提取效率随抽运功率的增强而增大。由于实验中输入的信号光功率较

小,所以当抽运光功率达到67.4 W的时候,提取效率仍然没有达到极大值。从激光物理机制上来看,提取效率的变化曲线不会有奇异点出现,图7(a)中的曲线没有通过采集更多实验数据点进行拟合,实验数据的变化趋势可以验证理论计算的正确性。

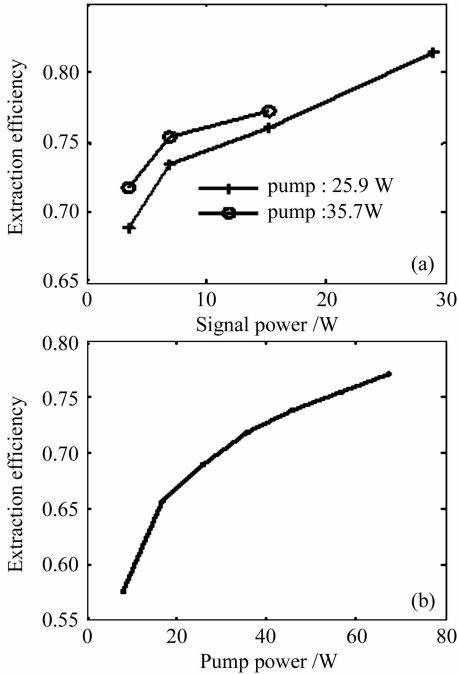


图7 实验测得的光纤放大器提取效率与信号光功率(a),抽运光功率(b)之间的关系

Fig.7 Extraction efficiency of fiber amplifier obtained from experiment versus signal power (a) and pump power (b)

由以上分析可知,理论计算结果与实验测量结果在总体趋势上吻合得相当好,并且两种方法得到的提取效率的误差不超过10%。数值计算所使用的镱离子光谱吸收截面积和光谱发射截面积都是直接参考了理论上的数据,然而实际上由于光纤拉制工艺以及光纤成分上的差别,会导致增益光纤在各个波段上的光谱吸收,发射截面积有很大的差别。此外,数值计算过程中将多模激光的横向功率分布近似为高斯函数,而且忽略了信号光的谱线宽度,这些简化模型做法都会使得理论计算的结果与实际测量值产生偏差。

## 4 结论

连续高功率掺镱光纤放大器的提取效率是影响

光纤激光输出的重要性能指标。研究了放大自发辐射的功率分布并据此分析了光纤放大器的提取效率,分别讨论了光纤端面反射率、信号光功率和抽运光功率对提取效率的影响。分析表明,增益光纤输入端面反射率的增大将导致需要更高功率的信号光和抽运光来压制放大自发辐射以保证提取效率,并且提取效率随信号光功率和抽运光功率的增大而增大,进而趋于极大值。

## 参 考 文 献

- 1 Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo *et al.*. 1.5 kW laser diode-pump Nd:YAG disk laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):35~38  
姚震宇,蒋建锋,涂波等. 1.5 kW激光二极管抽运Nd:YAG薄片激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):35~38
- 2 Liao Jianhong, Meng Hongyun, Wang Hongwei *et al.*. Investigation and applications of fiber laser precision cutting system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):133~136  
廖健宏,蒙红云,王红卫等. 光纤激光精密切割系统的研制及其应用[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):133~136
- 3 Wang Yiping, Li Anmin, Yun Bingfeng *et al.*. Fiber Bragg grating sensor system based on virtual instrument and tunable laser technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1132~1135  
汪弋平,李安民,恽斌峰等. 基于虚拟仪器和可调谐激光技术的光纤光栅传感系统[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8):1132~1135
- 4 Qian Jingren, Liu Fang, Su Jue. Investigation of frequency null-drift in polarimetric fiber laser current sensors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):791~794  
钱景仁,刘方,苏觉. 激光型光纤电流传感器频率的零漂[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6):791~794
- 5 Meng Hongyun, Liao Jianhong, Guan Banggui *et al.*. Fiber laser cutting technology on coronary artery stent [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):733~736  
蒙红云,廖健宏,官邦贵等. 心血管支架的光纤激光切割工艺[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):733~736
- 6 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25):6088~6092
- 7 D. C. Jones, A. M. Scott. A model of a fibre amplifier incorporating amplified spontaneous emission [C]. *SPIE*, 2004, **5335**:73~80
- 8 MingYuan Cheng, Yu-Chung Chang, Almantas Galvanauskas *et al.*. High-energy and high-peak-power nanosecond generation with beam quality control in 200- $\mu\text{m}$  core highly multimode Yb-doped fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(4):358~360
- 9 Aude Bouchier, Gaëlle Lucas-Leclin, François Balembois *et al.*. Theoretical and experimental investigations of a single-mode 976-nm Yb-doped fiber amplifier [C]. *SPIE*, 2004, **5460**:23~30
- 10 A. Liem, J. Limpert, H. Zellmer *et al.*. 100-W single-frequency master-oscillator fiber power amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17):1537~1539