

文章编号: 0258-7025(2008)05-0734-05

Er/Yb 共掺光纤放大器前向放大自发辐射模型

凌 磊 傅焰峰 张 石 龙 浩

(武汉邮电科学研究院武汉光讯科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要 提出了 Er/Yb 共掺的光纤放大器中, Yb 离子仍然存在基态能级斯塔克(Stark)分裂的假设, 考虑 1060 nm 波段辐射, 利用速率方程和传输方程, 结合 Er/Yb 共掺双包层光纤的吸收和发射系数谱, 采用 4 阶龙格-库塔(Runge-Kutta)算法, 建立了模拟 Er/Yb 共掺双包层光纤放大器放大自发辐射(ASE)光谱的理论模型。通过改变抽运功率和信号功率, 对其前向放大自发辐射光谱特性进行了全面的分析。大信号入射时, 改变抽运功率, 只改变输出功率大小, 输出光谱形状不变, 而当信号功率足够小时, 前向放大自发辐射光谱在 1535 nm 和 1543 nm 处会出现 2 个局部峰值, 理论模拟与实验数据相符。

关键词 光纤光学; 光纤放大器; Er/Yb 共掺光纤放大器; 理论模型; 放大自发辐射

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Theory Model of Forward Amplified Spontaneous Emission in Er³⁺/Yb³⁺ Co-Doped Double Clad Fiber Amplifiers

Ling Lei Fu Yanfeng Zhang Shi Long Hao

(Wuhan Research Institute of Post & Telecommunication,
Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Forward amplified spontaneous emission (ASE) in Er³⁺/Yb³⁺ co-doped double clad fiber amplifiers is studied by use of rate equations and transmission equations model, Stark energy level splitting theory containing 1060 nm wave band radiation, Er³⁺-Yb³⁺ absorption and emission cross sections, and Runge-Kutta 4th-order method. A multi-theoretical model is founded to analyze the ASE spectrum generally by changing the pumping power and signal power. When the signal is strong enough, it only can change the output power by changing pump power without changing the spectrum figure. When the signal is small enough, two local peaks appear at the 1535 nm and 1543 nm at the ASE spectrum. The theory is validated by experiment.

Key words fiber optics; fiber amplifier; Er/Yb co-doped double-clad fiber amplifier; theoretical model; amplified spontaneous emission

1 引 言

随着 CATV 网络成长、演化为综合业务的宽带网络, 为了承载更多的用户及增值服务, 提高分节点的光功率, 系统对光放大器输出光功率提出越来越高的要求。Er/Yb 共掺光纤放大器(EYDFA)由于能提供比传统的掺铒光纤放大器(EDFA)大一个数量级以上的输出光功率, 成为目前理想的解决方案。

在传统掺 Er 光纤中, 将 Yb 离子作为敏化剂掺入, 可以大幅提高 Er 离子的掺杂浓度, 抑制 Er 离子

簇的形成, 防止 Er 离子对受激猝灭现象的发生, 间接提高了对 Er 离子的抽运效率。但也使其能量传递机制、理论模型区别于传统的单掺 Er 光纤放大器。一些文献建立了自己的理论模型^[1~4], 但是一般都没有涉及到由于 Yb 的掺入而引起的 1060 nm 波段的辐射, 对放大器信号波长附近放大自发辐射(ASE)光谱的分析也不够详细。本文提出了 Er/Yb 共掺的光纤放大器中, Yb 离子仍然存在基态能级斯塔克(Stark)分裂的假设(在单掺 Yb 的激光介

收稿日期: 2007-10-09; 收到修改稿日期: 2007-11-02

作者简介: 凌 磊(1979—), 男, 湖北人, 硕士研究生, 主要从事光纤放大器方面的研究。E-mail: lei.ling@accelink.com

导师简介: 傅焰峰(1964—), 男, 湖北人, 高级工程师, 博士, 主要从事光通信电子器件、模拟光电及射频收发模块、光纤放大器等方面的研究。E-mail: yanfeng.fu@accelink.com

质中, Yb 离子基态存在此分裂^[5,6], 其分裂能级分别对应抽运波段和 1060 nm 波段的跃迁基态能级, 并建立了理论模型。因实验上易于测量, 通过模拟和实验, 着重分析了其前向放大自发辐射(与信号光传播方向相同的放大自发辐射)光谱, 同理可得后向放大自发辐射光谱。通过分析不同输入光功率条件下的前向放大自发辐射光谱, 论证该模型的合理性。

2 理论分析

采用速率方程和传输方程相结合的方法, 为了简化计算, 仍然认为抽运光和信号光在截面内均匀分布, 不考虑横截面上不同能级的粒子数分布与光强大小的关系, 并引入重叠因子来描述信号和抽运的吸收概率。图 1 为 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 的能级结构及相关跃迁过程。参考 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 的能级结构及交叉跃迁, 考虑了 Yb 的基态能级 $^2F_{7/2}$ 在单一波长抽运条件下的二个主要斯塔克分量, 分别对应抽运波段和 1060 nm 波段的跃迁能级。考虑如下主要的传递过程: 1) Yb 离子的 $^2F_{7/2}$ 能级对抽运光子的吸收; 2) Yb 离子的 $^2F_{5/2}$ 能级的自发辐射衰减; 3) Yb 离子对 Er 离子的能量传递: $^2F_{5/2} + ^4I_{15/2} \rightarrow ^2F_{7/2} + ^4I_{11/2}$; 4) Er 离子的 $^4I_{15/2}$ 能级的受激吸收; 5) Er 离子的 $^4I_{13/2}$ 能级的受激发射; 6) Er 离子的 $^4I_{13/2}$ 能级的自发辐射衰减; 7) 两个处于 $^4I_{13/2}$ 能级的成对 Er 间的协同上转换: $2^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{9/2} + ^4I_{15/2}$, 用二次项描述, 系数用 C_{up} 表示; 8) 与 1060 nm 波段相关的能级跃迁过程。

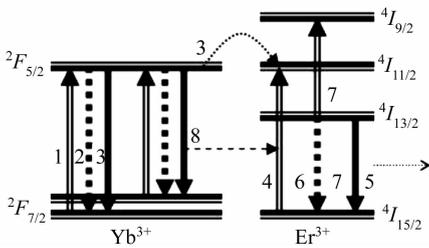


图 1 $\text{Er}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$ 的能级结构及相关跃迁过程
Fig. 1 Energy level diagram of the $\text{Er}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$ co-doped system

设 N_1, N_2, N_3 和 N_4 分别为 Er 离子的 $^4I_{15/2}, ^4I_{13/2}, ^4I_{11/2}$ 和 $^4I_{9/2}$ 能级上的有效离子数密度, N_5 和 N_6 分别为 Yb 离子的 $^2F_{7/2}$ 和 $^2F_{5/2}$ 能级上的有效离子数密度。并且 $^2F_{7/2}$ 有二个主要斯塔克分量用下标 5 和 7 表示。考虑到 $^4I_{9/2}, ^4I_{11/2}$ 能级寿命远小于 $^4I_{13/2}$ 能级寿命, 得到 Er 离子和 Yb 离子的粒子数密度的速率方程

$$\frac{\partial N_2(z)}{\partial t} = W_{12} N_1(z) - W_{21} N_2(z) - \frac{N_2(z)}{\tau_{21}} + C_{\text{cr}} N_1(z) N_6(z) - C_{\text{up}} N_2^2(z), \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_6(z)}{\partial t} = W_{56} N_5(z) - \frac{N_6(z)}{\tau_{65}} - W_{65} N_6(z) - C_{\text{cr}} N_1(z) N_6(z) + W_{76} N_5(z) - W_{67} N_6(z), \quad (2)$$

$$N_{\text{Er}} = N_1(z) + N_2(z), \quad (3)$$

$$N_{\text{Yb}} = N_5(z) + N_6(z), \quad (4)$$

式中 W_{ij} 表示能级 i 和 j 之间的受激吸收和受激发射跃迁概率, C_{cr} 表示 Yb 离子对 Er 离子的能量传递的交叉弛豫系数, τ_{21} 和 τ_{65} 分别为 Er 离子 $^4I_{13/2}$ 能级和 Yb 离子 $^2F_{5/2}$ 能级的自发辐射寿命, N_{Er} 和 N_{Yb} 分别为 Er 离子和 Yb 离子的有效总粒子数密度。在考虑信号波段放大自发辐射影响的情况下, 受激吸收和受激发射跃迁概率 W_{ij} 为

$$W_{12} = \frac{\Gamma_s(\nu)\sigma_{12}(\nu_s)}{h\nu_s A_{\text{core}}} P_s(z) + \frac{\Gamma_s(\nu)}{hcA_{\text{core}}} \int_0^\infty \sigma_{12}(\nu) [P_{\text{ASE}}^+(z, \lambda) + P_{\text{ASE}}^-(z, \lambda)] \lambda d\lambda + \frac{\Gamma_{1060}(\nu)}{hcA_{\text{core}}} \int_0^\infty \sigma_{12}(\nu) [P_{1060}^+(z, \nu) + P_{1060}^-(z, \nu)] \lambda d\lambda, \quad (5)$$

$$W_{21} = \frac{\Gamma_s(\nu)\sigma_{21}(\nu_s)}{h\nu_s A_{\text{core}}} P_s(z) + \frac{\Gamma_s(\nu)}{hcA_{\text{core}}} \int_0^\infty \sigma_{21}(\nu) [P_{\text{ASE}}^+(z, \lambda) + P_{\text{ASE}}^-(z, \lambda)] \lambda d\lambda, \quad (6)$$

$$W_{56} = \frac{\Gamma_p(\nu)\sigma_{56}(\nu_p)}{h\nu_p A_{\text{core}}} P_p(z), \quad (7)$$

$$W_{65} = \frac{\Gamma_p(\nu)\sigma_{65}(\nu_p)}{h\nu_p A_{\text{core}}} P_p(z), \quad (8)$$

$$W_{76} = \frac{\Gamma_{1060}(\nu)\sigma_{76}(\nu_{1060})}{h\nu_{1060} A_{\text{core}}} P_{1060}(z), \quad (9)$$

$$W_{67} = \frac{\Gamma_{1060}(\nu)\sigma_{67}(\nu_{1060})}{h\nu_{1060} A_{\text{core}}} P_{1060}(z), \quad (10)$$

式中 $\sigma_{12}(\nu_s), \sigma_{21}(\nu_s), \sigma_{56}(\nu_p), \sigma_{65}(\nu_p), \sigma_{76}(\nu_{1060})$ 和 $\sigma_{67}(\nu_{1060})$ 分别为 Er 离子以及 Yb 离子的二个主要斯塔克分量的吸收和发射截面, h 为普朗克常数, c 为真空中光速, ν 为辐射光频率, A_{core} 为纤芯截面积, P_s, P_p 和 P_{1060} 分别为信号、抽运和 1060 nm 波段辐射光功率, Γ 为重叠因子, $P_{\text{ASE}}^\pm(z, \lambda)$ 为正向和反向信号光波段放大自发辐射光功率。

对于信号光、抽运光及 1060 nm 波段辐射光和信号光波段放大自发辐射光的传输方程, 利用其重叠因子, 考虑主要的吸收和发射过程, 则传输方程为

$$\frac{dP_s}{dz} = \Gamma_s [\sigma_{21} N_2(z) - \sigma_{12} N_1(z)] P_s(z) - \alpha_s P_s(z), \quad (11)$$

$$\frac{dP_p^\pm}{dz} = \mp \Gamma_p [\sigma_{56} N_5(z) - \sigma_{65} N_6(z)] P_p^\pm(z) \mp \alpha_p P_p^\pm(z), \quad (12)$$

$$\frac{dP_{1060}^\pm}{dz} = \pm \Gamma_{1060}(\nu) \{ \sigma_{67}(\nu) N_6(z) (2hc^2/\lambda^3) + [\sigma_{67}(\nu) N_6(z) - \sigma_{76}(\nu) N_5(z) - \sigma_{12} N_1(z)] P_{1060}^\pm \} \mp \alpha_{1060} P_{1060}^\pm, \quad (13)$$

$$\frac{dP_{ASE}^\pm(z, \lambda_k)}{dz} = \pm 2h \frac{c}{\lambda_k} \Delta\nu_k \Gamma_s(\lambda_k) \sigma_{21}(\lambda_k) N_2(z) \pm \Gamma_s(\lambda_k) [\sigma_{21}(\lambda_k) N_2(z) - \sigma_{12}(\lambda_k) N_1(z)] P_{ASE}^\pm(z, \lambda_k) \mp \alpha_{ASE} P_{ASE}^\pm, \quad (14)$$

其中 P_p^\pm , P_{1060}^\pm 和 P_{ASE}^\pm 的上标 \pm 代表光的传播方向, $\Delta\nu_k = -c \Delta\lambda_k / \lambda_k^2$ 。考虑前向抽运的边界条件为: $P_s(0) = P_s^{\text{in}}$, $P_p^+(0) = P_p^{\text{in}}$, $P_p^-(L) = 0$; 其中 P_s^{in} , P_p^{in} , $P_p^{\text{-in}}$ 分别为输入的信号光和正向抽运光以及反向抽运光功率。

以上方程中涉及的参数,在模拟时参考了文献[1~4]的参数以及所使用的 Er/Yb 共掺双包层光纤的参数,具体数值如表 1 所示。

表 1 速率方程和传输方程所用参数表

Table 1 Parameters of Er³⁺-Yb³⁺ co-doped double-clad fiber for simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
λ_s / nm	1550	Γ_s	0.82
λ_p / nm	940	Γ_p	0.00128
Fiber length / m	10	$\tau_{\text{Er}^{21}}$ / s	11×10^{-3}
A_{core} / m ²	1.667×10^{-11}	$\tau_{\text{Yb}^{65}}$ / s	1.5×10^{-3}
Signal / W	0.003	α_s / m ⁻¹	2×10^{-3}
Pump ⁺ / W	10	α_p / m ⁻¹	3×10^{-3}
[Er ³⁺] _e / m ⁻³	2×10^{25}	C_{cr} / (m ³ /s)	5×10^{-22}
[Yb ³⁺] _e / m ⁻³	3×10^{26}	C_{up} / (m ³ /s)	5×10^{-24}
σ_{56} / m ²	5×10^{-25}	c / (m/s)	3×10^8
σ_{65} / m ²	5×10^{-25}	h / (J · s)	6.63×10^{-34}

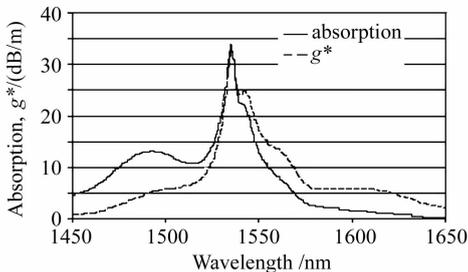


图 2 Er-Yb 共掺双包层光纤的吸收和发射系数
Fig. 2 Absorption and emission cross sections for Er³⁺-Yb³⁺ co-doped double-clad fiber

图 2 是实验使用的 Er/Yb 共掺双包层光纤在信号波段附近的吸收和发射系数,可转化为吸收和发射截面。

3 模拟结果及分析

采用 4 阶龙格-库塔(Runge-Kutta)算法,模拟了在信号波长为 1550 nm,抽运波长为 940 nm 多模抽运光前向抽运条件下,分别改变抽运光强和信号光强时,信号波段前向放大自发辐射光谱的变化,并结合实验实测光谱加以分析说明。

以 4 W 抽运功率,0.03 W(15 dBm)信号光强,10 m Er/Yb 共掺双包层光纤为模拟基准,谱线如图 3,图 4 中实线所示。其中图 3 为仅改变抽运光强度,分别为 1 W,2 W,4 W,10 W 的情况。图 4 为仅改变信号光强度,分别为 0.001 W,0.01 W,0.03 W,0.1 W 的情况。

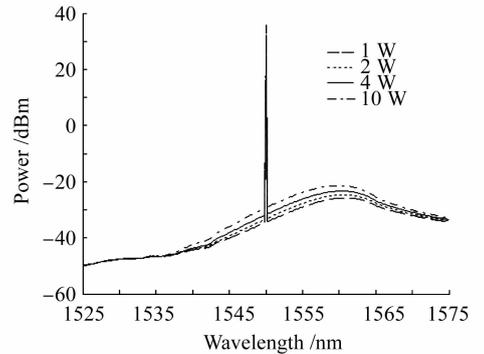


图 3 不同抽运光强度信号波段前向放大自发辐射光谱
Fig. 3 ASE as a function of wavelength by different pump power

由图 3 可以看到,Er/Yb 共掺双包层光纤放大器的前向放大自发辐射一般起始于 1540 nm,并在 1560 nm 处达到最大值。在 1545~1565 nm 波长范围内,均能实现对信号光的有效放大。当抽运功率逐渐增大时,前向放大自发辐射光谱表现为整体的拾升,但拾升幅度有限,主要是由于受到抽运吸收饱和的影响,多余的抽运光会泄漏出去。

由图 4 看到,当入射的信号光小到一定程度的时候,其前向放大自发辐射光谱形状会发生变化,在

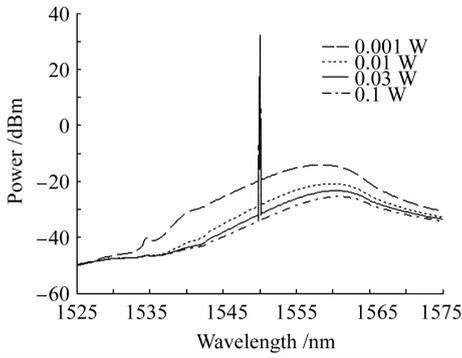


图 4 不同信号光强度信号波段前向放大自发辐射光谱

Fig. 4 ASE as a function of wavelength by different small signal power

1535 nm和1543 nm处会出现 2 个局部峰值,这是由 Er/Yb 共掺光纤的吸收和发射截面的特性决定的。

4 实验验证及分析

实验中,采用如图 5 所示的前向抽运方式,信号源采用分布反馈(DFB)半导体激光光源,实际输出 1550 nm 的单模信号光。抽运采用 3 只额定输出 4 W 的 940 nm 输出的多模抽运源。合波器采用(6+1)×1 结构的光纤束(bundle)作为信号耦合及抽运注入装置,并使用 Er/Yb 共掺双包层光纤作为增益介质,在光路中合适位置加入隔离器,以防止反向传输光对光器件的损伤。

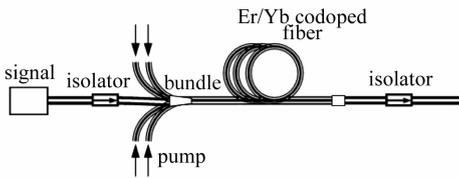


图 5 前向抽运 Er/Yb 共掺双包层光纤放大器实验装置图

Fig. 5 Schematic structure of forward pump Er³⁺-Yb³⁺ co-doped double-clad fiber amplifiers

当改变输入抽运功率时,测试结果如图 6 所示。光进入光谱仪时已加入适当衰减损耗以保护光谱仪。可看到前向放大自发辐射的整体抬升,但光谱形状保持不变,与图 3 模拟曲线相符。

当信号光能量为 1 mW 时,为小信号光入射条件,测试结果如图 7 所示。与图 6 比较,其前向放大自发辐射光谱形状发生变化,短波长处放大自发辐射光谱被抬升。对比图 4 中模拟的小信号入射情况,可以看到前向放大自发辐射光谱在 1535 nm, 1543 nm 波长附近有二个局部峰值,与理论模拟相符。

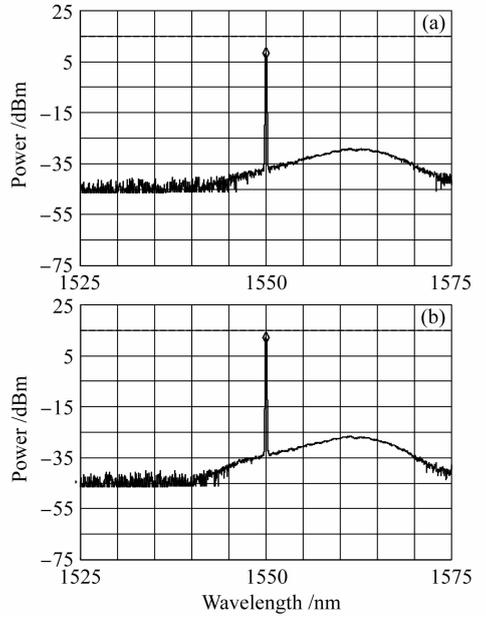


图 6 不同抽运功率条件下前向放大自发辐射光谱图

Fig. 6 Actual ASE as a function of wavelength by different pump power

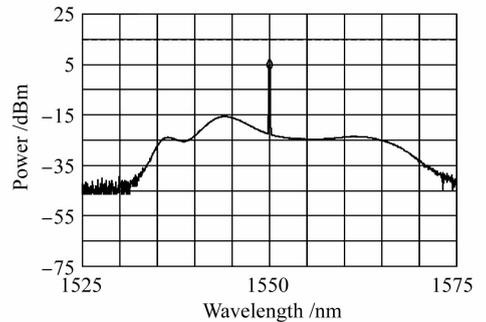


图 7 小信号光入射条件下前向放大自发辐射光谱图

Fig. 7 Actual ASE as a function of wavelength by small signal incidence

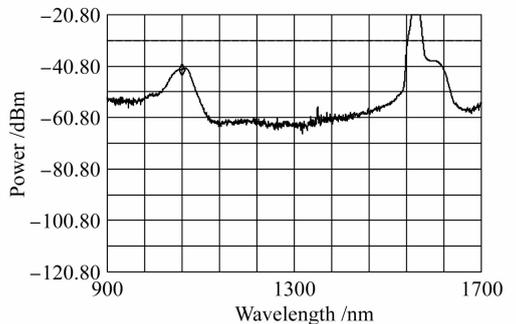


图 8 全波长范围前向放大自发辐射光谱图

Fig. 8 Actual ASE as a function of wavelength at whole spectrum

图 8 为 900~1700 nm 波长范围内的前向放大自发辐射光谱图,可以看到在 1060 nm 波段附近有辐射光谱存在。关于 Er/Yb 共掺光纤放大器在

1060 nm波段辐射,本文仅做此实验描述,以说明在 Er/Yb 共掺光纤放大器中,Yb 离子基态能级仍然存在斯塔克分裂假设的合理性,另文将对此做详细分析。

5 结 论

在 Er/Yb 共掺双包层光纤放大器中,假设 Yb 离子的基态能级仍然存在斯塔克分裂,利用速率方程和传输方程,结合 Er/Yb 共掺双包层光纤的吸收和发射系数谱,采用 4 阶龙格-库塔算法,对 Er/Yb 共掺双包层光纤放大器信号波段前向放大自发辐射的光谱特性进行了全面分析。模拟时通过改变抽运功率和信号功率,得到不同条件下的前向放大自发辐射光谱。大信号入射时,改变抽运功率,只改变输出功率大小,输出光谱形状不变,而在小信号输入条件下,前向放大自发辐射光谱在 1535 nm,1543 nm 波长附近有二个局部峰值。900~1700 nm 波长范围扫描光谱图中看到的 1060 nm 波段辐射的存在说明了 Yb 离子基态能级仍然存在斯塔克分裂假设的合理性。该理论模型与实际的 Er/Yb 共掺光纤放大器输出特性能较好吻合,为其设计提供帮助。

参 考 文 献

- 1 E. Yabeh, A. Hardy. Efficiency optimization of high-power Er³⁺-Yb³⁺-codoped fiber amplifiers for wavelength-division-multiplexing applications [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(6):1189~1197
- 2 F. D. Pasquale. Modeling of highly-efficient grating-feedback and Fabry-Perot Er³⁺-Yb³⁺ co-doped fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(2):326~332
- 3 Xia Guijin, Zhang Xu, Zhang Jumei *et al.*. Study on theory model of double cladding erbium-ytterbium co-doped fiber amplifiers [J]. *Laser & Infrared*, 2004, **34**(5):364~367
夏贵进,张旭,张居梅等. 双包层 Er-Yb 共掺光纤放大器理论模型研究[J]. *激光与红外*, 2004, **34**(5):364~367
- 4 Li Shufeng, Li Chengren, Song Changlie. Er-doped and Yb-Er co-doped Al₂O₃ waveguide amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5):928~934
李淑凤,李成仁,宋昌烈. 掺 Er 及 Yb-Er 共掺 Al₂O₃ 光波导放大器的理论与实验研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5):928~934
- 5 Chen Bai, Chen Lanrong, Fan Wei *et al.*. Tunable operation in ytterbium-doped cladding fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(9):835~838
陈柏,陈兰荣,范薇等. 掺 Yb 双包层光纤激光器波长调谐输出[J]. *光子学报*, 1999, **28**(9):835~838
- 6 Tian Yubing, Tan Huiming, Cao Hongzhong *et al.*. Low power laser diode-pumped solid-state Yb:YAG laser at room temperature [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):633~636
田玉冰,檀慧明,曹洪忠等. 低功率激光二级管抽运的室温运转 Yb:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):633~636