

文章编号: 0258-7025(2009)07-1880-06

全光纤高功率 Er/Yb 共掺双包层光纤放大器

周 雷 宁继平 张蔚青 韩 群 陈 铮 张伟毅 王俊涛

(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 结合 Er/Yb 共掺双包层光纤(EYDCF)和主振荡功率放大(MOPA)技术,采用高功率多模抽运方式设计和实验研究了全光纤化两级放大器。分析了放大器的各种性能参数;1550 nm 连续光放大得到最大斜率效率为 29%,最大输出功率 1.52 W,功率稳定度 0.4%;2 kHz 脉冲放大时得到最大输出功率 1.1 W,功率稳定度 0.45%,最大斜率效率 25%。并从放大后光谱和时域波形分析了导致脉冲放大时斜率效率和功率转换效率较低的主要原因为 Yb³⁺ 离子波段放大自发辐射(ASE)的出现和 Er 离子波段 ASE 的过多积累。在高功率放大时,增益随输入信号功率增大迅速下降;同时结合抽运光谱随驱动电流变化分析了其对放大器性能的影响。

关键词 激光技术;光纤放大器;主振荡功率放大;Er/Yb 共掺双包层光纤

中图分类号 TN248.1;TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1880

All-Fiber High Power Er/Yb Co-Doped Double Clad Fiber Amplifier

Zhou Lei Ning Jiping Zhang Weiqing Han Qun Chen Cheng
Zhang Weiyei Wang Juntao

(Key Laboratory of Optoelectronic Information Science & Technology of Ministry of Education,
College of Precision Instrument & Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Using the high power multimode pumping method, the Er/Yb co-doped double clad fiber (EYDCF) two-stage master oscillation power amplification (MOPA) based on all-fiber configuration is experimentally studied. With continuous wave (CW) amplification, the maximal output power is 1.52 W, the degree of stability is 0.4% and the slope efficiency is 29%. While with 2 kHz pulsed amplification, the maximal output power is 1.1 W, the degree of stability is 0.45% and the slope efficiency is 25%. The fact that the slope efficiency and the power conversion efficiency (PCE) of pulsed amplification are lower than the CW is caused by the appearance of the Yb³⁺ band, and the accumulation of the Er³⁺ band ASE deduces from the output spectrum and time domain waveform. The gain of the amplifier decreases seriously as the input power increases under the high power amplification condition. The impact that the fluctuation of the pump spectrum with the driven current on the amplifier performance is also analyzed.

Key words laser technique; fiber amplifier; master oscillation power amplification; Er/Yb co-doped double clad fiber

1 引 言

Er/Yb 共掺光纤放大器工作在 1.5 μm 波段,具有“人眼安全”的特点。Yb 离子的掺入,能够克服掺 Er 光纤浓度淬灭效应,提高 Er 离子的掺杂浓度进而有利于实现大功率放大,也使得 Er/Yb 共掺光纤的吸收谱大大加宽(800~1100 nm)^[1,2],且具有优良的噪声特性和增益平坦特性^[3,4]。这些使得

其在激光雷达、激光测距、遥感、环境监测、自由空间光通信和引力波探测^[5~7]等方面得到了广泛的应用与研究,并逐渐发展成为 1.5 μm 波段高功率激光领域的一大研究热点。连续光放大,平均功率达到了 151 W^[8],脉冲放大时,最大单脉冲能量已经达到了 1.15 mJ^[9];采用大模场面积 Er/Yb 共掺光子晶体光纤,峰值功率达到 50 kW,脉宽达到 100 fs^[10];

收稿日期: 2009-03-31; 收到修改稿日期: 2009-05-18

作者简介: 周 雷(1982—),男,满族,博士研究生,主要从事光纤通信器件、高功率光纤放大器等方面的研究。

E-mail: zhouleij_tju@tju.edu.cn

导师简介: 宁继平(1945—),女,教授,博士生导师,主要从事光通信器件与技术、激光技术及非线性光学等方面的研究。

E-mail: jnping@tju.edu.cn

南安普敦大学采用纤芯直径分别为 18 μm, 50 μm, 90 μm 的 3 级 Er/Yb 共掺光纤放大器, 得到了重复频率 1 kHz, 脉宽 88 ns, 峰值功率 6.6 kW, 单脉冲能量达 1 mJ 的窄线宽脉冲输出^[11]。这些都是通过分立器件, 经过透镜进行抽运光和信号光的耦合来实现的。本文设计了全光纤化两级主振荡功率放大器(MOPA), 实验分析比较了连续光和脉冲光放大的特性, 重点分析了脉冲放大过程中引起放大器效率下降的原因和解决方法。

2 实验结果和讨论

图 1 为两级主振荡功率放大实验结构, LD1, LD2 为输出功率 100 mW 和 200 mW 的 975 nm 抽运激光器。ISO1, ISO2 为光隔离器, 用来消除不必要的反射光并避免产生寄生激光振荡。WDM1, WDM2 为 980 nm/1550 nm 波分复用器, 掺饵光纤(EDF)采用 Corective 公司生产的长为 8 m 的 C600; LD3, LD4 各为输出功率 6 W 的多模 915 nm 半导体激光器, 输出尾纤为普通多模光纤, 纤芯直径/包层直径 105 μm/125 μm, 数值孔径 0.22; Er/Yb 共掺光纤(EYDF)为 Corective 公司的 8 m 双包层光纤, 915 nm 抽运光吸收系数 1.5 dB/m, 纤芯直径 10 μm, 纤芯数值孔径 0.190, 内包层截面为六角形, 内包层直径 125 μm, 内包层数值孔径 0.472; WDM3 为 Avensys (ITFLab) 公司生产的 (2+1):1 高功率耦合器, 信号输入端为双包层无源光纤, 纤芯直径/内包层直径为 8 μm/125 μm, 纤芯数值孔径/内包层数值孔径为 0.14/0.46, 两个抽运光输入端为普通多模光纤, 纤芯直径/包层直径为 105 μm/125 μm, 数值孔径为 0.22。耦合输出端所用光纤是与信号输入端相同的双包层无源光纤。首先考察了 1550 nm 连续光放大情况。

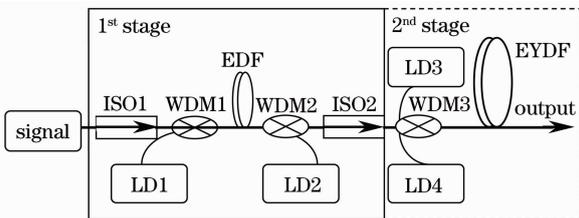


图 1 全光纤两级功率放大实验结构

Fig. 1 All-fiber two stage power amplifier experimental configuration

图 2 为测得的输出信号光功率随抽运功率的变化曲线, 在输入信号功率分别为 32 mW, 56 mW, 72 mW 情况下输出信号光功率都随着抽运光功率

的增加而上升, 没有出现饱和现象, 耦合进入双包层最大抽运功率为 5.86 W 时得到最大信号光输出功率 1.52 W, 2 h 内测量的功率稳定度为 0.4%, 最大斜率效率达到了 29%。图 3 表明随着输入信号光的增大, 输出功率线性上升, 也没有出现饱和现象, 表明如果提高抽运功率或者提高输入信号光功率, 输出功率将会得到进一步提高。此外, 这里得到的斜率效率仍然偏低, 主要原因分析为: (2+1):1 耦合器的耦合输出端(纤芯直径 8 μm)与双包层光纤(纤芯直径 10 μm)的纤芯直径不匹配导致的焊点损耗比较严重, 以及焊接过程中纤芯对准不精确导致的信号光损耗过大也会引起输出功率下降^[12], 应该采用专用大模场双包层光纤焊接机; 光纤长度偏短, 从光谱图中可见, 抽运光仍有较多剩余; 从图 2 中可以发现, 信号光功率有限, 不能完全提取增益介质的能量, 也是导致斜率效率下降的原因。

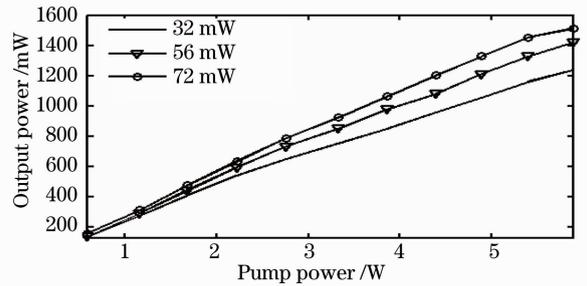


图 2 输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 2 Output power versus pump power

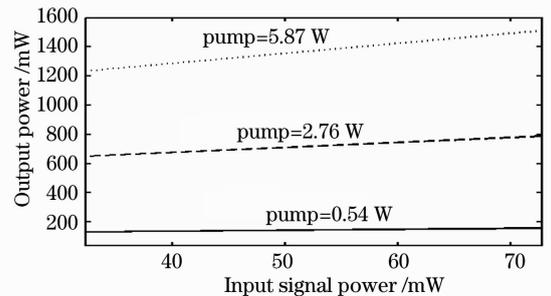


图 3 输出功率随输入信号功率的变化曲线

Fig. 3 Output power versus input signal power

光纤放大器一个非常重要的评价指标是抽运转换效率(power conversion efficiency, PCE), 简单的定义为

$$\eta_c = \frac{P_s(L) - P_s(0)}{P_p(0)}, \quad (1)$$

其中 $P_s(L)$ 为放大器输出信号光功率, $P_s(0)$ 为输入信号光功率, $P_p(0)$ 为输入抽运功率。由于高功率抽运激光器的价格昂贵, 所以较高的 PCE 意味着成本的降低。

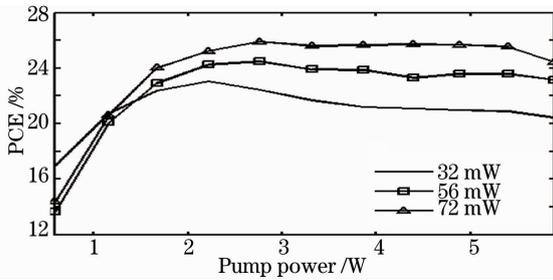


图4 PCE随抽运功率的变化曲线

Fig. 4 PCE versus pump power

图4为实验测得不同输入信号功率下PCE随抽运光的变化曲线,可以看到PCE都随着抽运光增加而逐渐上升,在达到最大值后保持了很宽的平坦

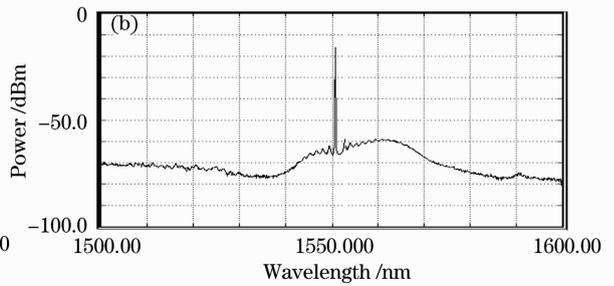
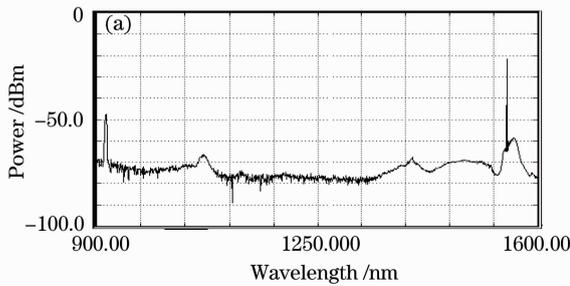


图5 输出光谱。(a)全波段;(b)Er³⁺离子辐射波段

Fig. 5 Output spectrum. (a)All band;(b)Er³⁺ emission band

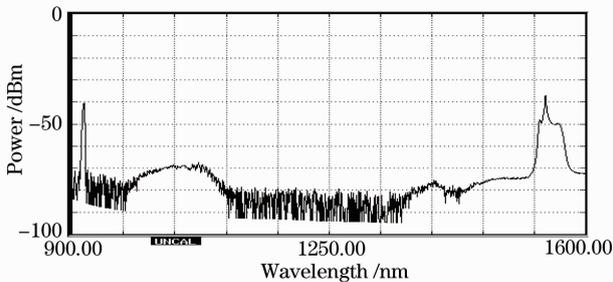


图6 最大抽运功率不加信号光情况下ASE的分布曲线

Fig. 6 ASE distribution without the signal at the highest pump power

接下来进行了中心波长1550 nm,重复频率2 kHz,占空比50%的方波脉冲实验研究。

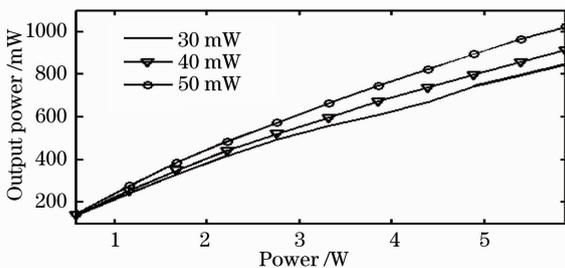


图7 输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 7 Output power versus pump power

区域。这说明,放大器在保证高输出功率的同时保持了高的抽运转换效率,也暗示了自发辐射在连续光放大的过程中得到了很好的抑制(图5)。本实验得到的最大PCE为26%。

图5为在最大抽运功率、最大输出信号功率时的光谱,图5(a)表明在高功率抽运时,由于Yb³⁺向Er³⁺能量传递的瓶颈效应导致Yb³⁺波段的放大自发辐射(ASE)开始出现,但功率很微弱;其中在1390 nm附近出现的ASE通过图6可知,这是由增益光纤本身带来的噪声。图5(b)表明Er³⁺波段的ASE抑制得很好,信噪比达到了40 dB。

图7表明输出信号功率随抽运功率和信号光功率的增加而上升。图8表明在同一抽运功率下,输出功率随输入信号功率的增长而变大,未出现饱和现象。表明输入信号光功率不足,如果继续加大输入功率,输出功率和斜率效率会得到提高。但此时的输出功率和斜率效率都比连续光放大要低。得到的最大斜率效率为25%,2 h内测量的功率稳定度为0.45%,最大输出功率1.1 W。

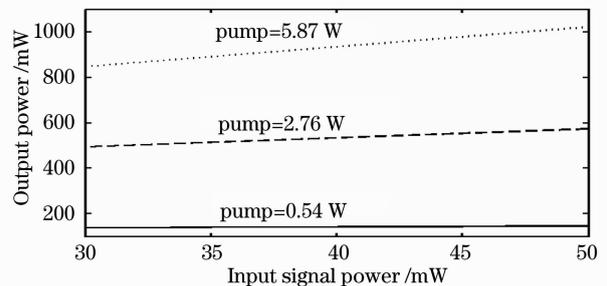


图8 输出功率随输入信号功率的变化曲线

Fig. 8 Output power versus input signal power

图9为PCE随抽运功率的变化曲线,在脉冲放大过程中,对同一输入信号功率,随着抽运功率的上升,PCE存在着一个最大值。这里在输入50 mW信号光时,得到的最大值为20%,低于连续光放大时的

26%。达到最大值后,继续加大抽运功率,PCE 将会下降,而不是连续光放大那样保持不变。这一方面是由于在高功率抽运时,上能级粒子数得到足够积累,且信号光能量不够强,不能完全提取上能级储能,导致 Er 离子上能级反转粒子数剩余,使得这个波段的 ASE 过多积累。另一方面在强抽运情况下 Yb³⁺ 向 Er³⁺ 的能量转移速率不够, Yb³⁺ 离子上能级粒子数也出现剩余,导致 1.06 μm 波段 ASE 的出现,且在大功率脉冲放大的情况下,1.06 μm 波段 ASE 的出现是限制信号光能量获取的一个主要原因^[8]。解决这个问题一个方法是提高注入信号光的能量,另一种非常有效的方法是采用后向抽运方式,1.06 μm 波段 ASE 会得到充分抑制以便提高 PCE^[13]。

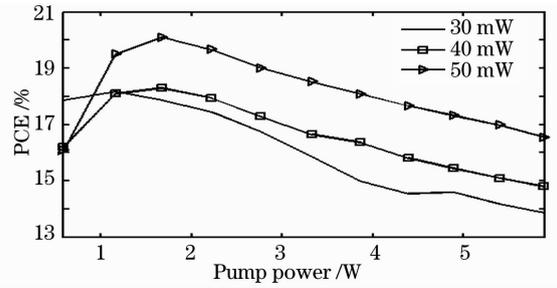


图 9 PCE 随抽运功率的变化曲线

Fig. 9 PCE versus pump power

从脉冲光的时域波形和频域光谱可以更进一步理解脉冲放大效率降低的原因。图 10 为测得的各级输出放大波形,测量过程中经过了适当的衰减以避免损坏示波器。

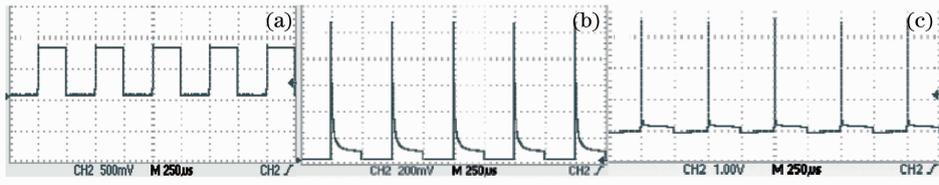


图 10 (a)初始输入脉冲波形;(b)第一级输出波形;(c)第二级输出波形

Fig. 10 (a)Initial input pulse waveform;(b)1st stage output waveform;(c)2nd stage output waveform

图 10(b)表明方波脉冲信号在经过第一级 EDFA 预放大后,产生了严重的失真,脉冲前沿由于最先消耗上能级粒子数,且方波前沿的变化非常陡峭,导致脉冲前沿峰值急剧上升,大量消耗上能级粒子,而方波下降沿由于反转粒子数没有及时得到补充,导致可获得能量急剧下降^[14],在前沿过后的大约 10 μs [图 10(b)],后沿的输出才稳定在一个非常低的功率水平。同时,可以看到在两级放大中,250 μs 脉宽的方波脉冲经过第一级预放大后,尽管得到了一个时域上比较高的峰值脉冲,但同时也出现了一个持续时间为 240 μs 的低功率输出阶段即一个很长的直流底座,占到整个脉冲周期的 96%,这在第二级放大时,将对最终输出信号光质量产生严重影响。图 10(c)所示是在第二级最大抽运功率 5.86 W 情况下得到的输出放大脉冲序列,可以看到,在第二级能够有效提取激活介

质能量的有效时间仅为 10 μs 左右,剩余 240 μs 时间段由于信号光的功率非常低,以致于无法在第二级放大中提取可观的能量,即在两个脉冲间的有效时间间隔变为 480 μs 而不再是 250 μs,这一时间的延长一方面为 Er 离子上能级粒子的积累提供了时间,造成了过多的 Er 波段 ASE 的积累。导致脉冲放大时斜率效率、增益和 PCE 均小于连续波放大。如果采用脉冲抽运方式将会大大减少在信号脉冲间隔期间的 ASE^[15]。

图 11 为在最大抽运功率、最大输出信号功率 1.1 W 时测得的光谱,由图 11(a)可见,如前面讨论的情况,1.06 μm 波段 ASE 已经出现。图 11(b)也符合上述情况, Er 离子波段 ASE 比较严重,光信噪比约为 20 dB,远小于连续光时的 40 dB。如果在两级放大之间加入窄带滤波器来滤除第一级产生的

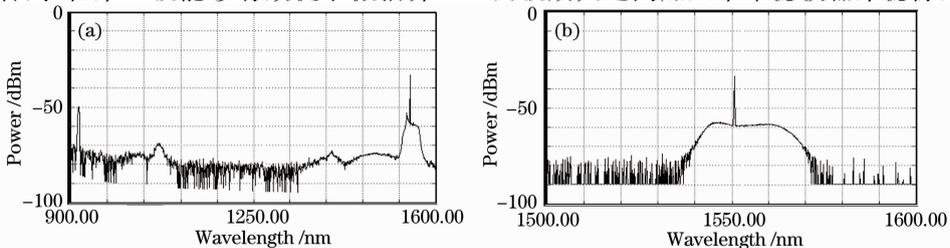


图 11 输出信号光谱。(a)全波段;(b) Er³⁺ 离子辐射波段

Fig. 11 Output spectrum, (a) All band;(b) Er³⁺ emission band

ASE,会对第二级的 ASE 产生一定的抑制作用,进一步提高输出信号功率。

图 5,图 11 都是在最大抽运功率下测得的光谱。1064 nm 波段 ASE 在我们的实验条件下,开始出现,但其功率和信号光功率相比仍然非常小,相差 45 dB。即 1064 nm 波段 ASE 尽管出现了但还是非常弱的,导致两种放大情况下此波段的 ASE 并没有明显变化,如图 12 所示。且只有在抽运功率足够大并达到一定值时,Yb 离子波段 ASE 才对放大器性能起决定作用并随着抽运功率提高而明显上升^[8]。因此,在本实验抽运功率条件下,抽运功率仍偏低,主要影响放大器性能的仍然为 Er 离子波段 ASE。

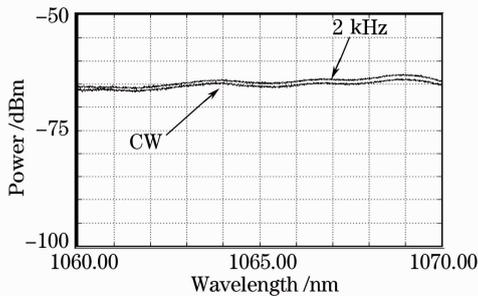


图 12 最高输出功率时 Yb 离子波段的 ASE

Fig. 12 Yb band ASE at the maximal output power

连续光放大和 2 kHz 方波放大,在 2.76 W 抽运功率下,放大器的增益随输入信号功率的变化如图 13 所示。可见在大功率放大时,第一级的输出信号功率相对较大,放大器增益随输入信号增大下降得很快。脉冲放大因为提取能量的时间变短和如前所述的 ASE 光变导致增益比连续光要低。

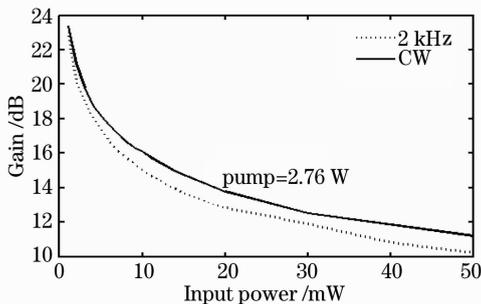


图 13 放大器增益随输入信号的变化曲线

Fig. 13 Gain versus input signal power

最后讨论 915 nm 高功率多模抽运源对放大器性能的影响。图 14 表明在低抽运功率情况下,抽运光的中心波长在 909 nm,3 dB 带宽较窄,随着输出功率上升,抽运光中心波长逐渐移到 915 nm,带宽也变宽。这是驱动电流增大引起的热效应导致激光器工作波长的漂移,这对增益介质上能级的粒子数

的积累同样会产生影响,即对信号光可获得的最大能量产生限制。所以在高功率放大器设计中,较好的抽运源温度控制同样起到重要作用。

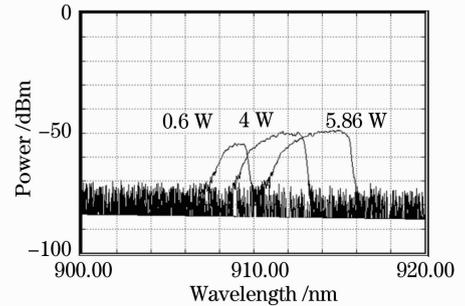


图 14 不同输出功率下的抽运光输出光谱

Fig. 14 Pump spectrum under different output pump power

3 结 论

设计了全光纤化两级主振荡功率放大器,并在 1550 nm 连续光放大和 2 kHz 脉冲放大下对放大器的特性进行了测试和比较。从放大后的信号输出光谱和时域波形分析了导致脉冲光放大较连续光放大时效率低的主要原因为 Yb³⁺ 离子和 Er 离子波段 ASE 的出现。在高功率放大时,增益随输入信号功率增大迅速下降,同时结合抽运光频谱随驱动电流变化分析了其对放大器性能的影响。

参 考 文 献

- 1 J. Nilsson, P. Scheer, B. Jaskorzynska *et al.*. Modeling and optimization of short Yb³⁺-sensitized Er³⁺-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 1994, **6**(3): 383~385
- 2 K. Aiso, Y. Tashiro, T. Suzuki *et al.*. Development of Er/Yb co-doped fiber for high-power optics amplifiers [J]. *Furukawa Review*, 2001, **20**: 41~45
- 3 P. F. Wysocki, N. Park, D. DiGiovanni. Dual-stage erbium-doped, erbium/ytterbium-codoped fiber amplifier with up to +26-dBm output power and a 17-nm flat spectrum[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21** (21): 1744~1746
- 4 G. Wilson, J. M. Delavaux, A. Stentz *et al.*. Low-noise 1-watt Er/Yb fiber amplifier for CATV distribution in HFC and FTTH/C system [C]. *Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest Series*, 2000, **4**: 58~60
- 5 Guillaume Canat, Jean-Claude Mollier, Jean-Pierre Bouzinac. Dynamics of high-power erbium-ytterbium fiber amplifiers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2005, **22**(11): 2309~2317
- 6 Eldad Yahel, Ortwin Hess, A. Amos *et al.*. Transient analysis of short, high-concentration, gain-clamped Er³⁺-Yb³⁺ codoped fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(5): 2191~2197
- 7 M. Achour. Free-space optics wavelength selection: 10 μm versus shorter wavelengths [J]. *J. Optical Networking*, 2003, **2**(6): 127~143
- 8 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. B. S. Soh *et al.*. High-power tunable single frequency single-mode erbium, ytterbium codoped large-

- core fiber master-oscillator power amplifier source [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(22): 2997~2999
- 9 V. Philippov, J. K. Sahu, C. Codemard *et al.*. All-fiber 1.15 mJ pulsed eye-safe optical source[J]. *SPIE*, 2004, **5335**: 1~7
- 10 A. Shirakawa, J. Ohta, M. Musha *et al.*. 50-kW, 100-fs pulse generation by large-mode-area erbium-ytterbium-doped photonic-crystal fiber amplifier [C]. In *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science and Photonic Applications Systems Technologies*, 2005, p. CTuK6
- 11 C. Codemard, C. Farrell, P. Dupriez *et al.*. Millijoule, high-peak power, narrow-linewidth, sub-hundred nanosecond pulsed fiber master-oscillator power-amplifier at 1.55 μm [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2006, **7**: 170~176
- 12 Fangpei Zhang, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. Impacts of seed power on amplification performance in pulsed double-clad fiber amplifier [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1): 19~21
- 13 Yong Wang, Hong Po. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification [J]. *J. Lightwave Technology*, **21**(10): 2262~2270
- 14 Duan Yunfeng, Huang Bangcai, Zhang Peng *et al.*. All-fiber pulse amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1379~1382
- 段云锋, 黄榜才, 张 鹏 等. 全光纤结构的脉冲光纤放大器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1379~1382
- 15 Changgeng Ye, Ping Yan, Mali Gong *et al.*. Pulsed pumped Yb-doped fiber amplifier at low repetition rate [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(5): 249~250