

文章编号: 0253-2239(2010)03-0681-05

## 抽运方案对 L 波段双通掺铒光纤放大器增益特性的影响

宋梅梅 冯素娟 毛庆和

(中国科学院安徽光学精密机械研究所安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 对正向和反向抽运的 L 波段双通掺铒光纤放大器(EDFA)的增益改善机制进行了实验研究,比较了两种抽运方案在不同掺铒光纤(EDF)长度下的增益改善效果。结果表明,两种抽运方案的增益改善机制不同,正向抽运方案时 EDF 中粒子数反转度沿纵向的分布有利于信号光功率在输入输出端附近的放大,进而对抽运输入端附近的放大的自发辐射(ASE)有抑制作用;反向抽运方案则利用抽运输入端附近产生的后向 C 波段 ASE 作为辅助抽运源。反向抽运时,因反射端 ASE 功率过大导致了 ASE 引起的增益自饱和效应,使得当 EDF 长度较短时,其增益改善效果比正向抽运方案稍差;正向抽运方案则在 EDF 长度较长时出现抽运不足问题,并使得输入信号光功率较低时的增益特性变差。

**关键词** 光学器件;双通掺铒光纤放大器;正向抽运;反向抽运;增益

**中图分类号** TN 253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103003.0681

## Influences of Pump Schemes on Gain Properties of L-Band Double-Pass Erbium-Doped Fiber Amplifiers

Song Meimei Feng Sujuan Mao Qinghe

(Key Laboratory of Photonics Devices and Materials of Anhui Province, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** The mechanisms for improving the gain properties of the forward- and backward-pumped L-band double-pass erbium-doped fiber amplifiers (EDFA) are experimentally investigated. The gain enhancements of the two EDFA are compared for different EDF lengths. The results show that, the gain improvement mechanisms of the two pumping schemes are different. With the forward-pumped scheme, the population inversion near the signal input (output) port is very high, which helps to amplify the L-band input signal quickly after entering the EDFA and boosting its power before being exited. Such high L-band signal power near the signal input port may in turn suppress the backward C-band amplified spontaneous emission (ASE) near the input pump port, and thus, improve the L-band gain properties. With the backward-pumped scheme, the backward C-band ASE generated in the pump input port may be reused as an auxiliary pump source to enhance the L-band gain. However, for the backward-pumped scheme, the reuse of the backward C-band ASE may cause the gain self-saturation effect due to the high ASE level. It is found that the gain improvements of the EDFA with forward pumping scheme is slightly better than those with backward pumping when the EDF length is 20 m, because of the gain self-saturation effect caused by the high ASE. However, when the EDF length is more than enough for pump absorption, compared with the backward-pumped scheme, the forward-pumped L-band double-pass EDFA exhibits obviously insufficient pump, deteriorating its gain improvement, especially for the relatively low input signal power.

**Key words** optical devices; double-pass EDFA; forward pump; backward pump; gain

收稿日期: 2009-03-03; 收到修改稿日期: 2009-05-11

基金项目: 国家 973 计划(2007CB936603)和国家自然科学基金(60677050)资助课题。

作者简介: 宋梅梅(1984—),女,硕士研究生,主要从事稀土掺杂光纤放大器方面的研究。E-mail: smm926@siom.ac.cn

导师简介: 毛庆和(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事光纤光学、激光物理与器件、微纳光子学器件等方面的研究。E-mail: mqinghe@aiofm.ac.cn(通信联系人)

## 1 引 言

L 波段掺铒光纤放大器(EDFA)的增益处于 1570~1610 nm<sup>[1]</sup>,该波长范围依然属石英玻璃光纤的低损耗区,因此,L 波段 EDFA 可用来拓宽现有波分复用(WDM)光纤传输系统的带宽<sup>[2]</sup>。但是,由于 L 波段 EDFA 的工作波长远离掺铒光纤(EDF)的受激吸收和发射峰,抽运输入端附近的反向 C 波段放大的自发辐射(ASE)将消耗大量的反转粒子,影响了对 L 波段信号光的放大效果<sup>[3]</sup>。近年来,人们发展出了多种能有效克服后向 C 波段 ASE 影响以改善 L 波段放大性能的方案<sup>[4~10]</sup>。2002 年,反射式双通 L 波段 EDFA 方案被提出,这种反射式双通结构既能抑制 C 波段 ASE 的不利影响以提高 L 波段增益,又可大大缩短所需 EDF 长度,因而倍受重视。事实上,反射式双通 L 波段 EDFA 有正向抽运方案<sup>[11]</sup>和反向抽运方案<sup>[12]</sup>之分,它们的增益特性相比于单通结构的 EDFA 都有很大改善,但两种 L 波段 EDFA 的输出谱不同,相比于反向抽运方案,正向抽运时输出谱中携带了大量的 C 波段 ASE,这种差异隐含着两种 L 波段 EDFA 的增益改善机制及改善程度的不同。迄今,对这种因抽运方案不同引起的反射式双通 L 波段 EDFA 增益改善机制异同的研究未见报道。本文研究正向和反向抽运的 L 波段双通 EDFA 的增益改善机制,着重考察 C 波段 ASE 在增益改善机制中的作用和影响,并在不同 EDF 长度下,比较两种抽运方案对增益特性的改善效果。

## 2 实验方案

图 1 为正向和反向抽运 L 波段双通 EDFA 的结构示意图。为方便表述,将抽运光输入方向与信号光输入方向相同的结构称为正向抽运方案,而将与信号光输入方向相反的结构称为反向抽运。对于这两种 EDFA,信号光均由光环形器(CIR1)的 1 端口输入,正向传输放大后,由反射机构反馈至 EDF 中,再经反向传输放大,最后由 CIR1 的 3 端口输出。反射机构由处于反射端的环形器(CIR2)的非公共端(1 和 3 端口)相连构成,CIR1 和 CIR2 能同时满足 C 和 L 波段工作,隔离度均大于 50 dB,插入损耗均小于 0.3 dB;所用掺铒光纤为标准单模 EDF,数值孔径为 0.19,截止波长为 955 nm,在 1531 nm 处的吸收系数为 11.7 dB/m;由 980 nm 半导体激光器通过宽带(C 和 L 波段)波分复用耦合器

(WDM)抽运 EDF,WDM 的插入损耗为 0.5 dB,抽运源的最大输出功率为 220 mW。为便于实验测试分析,在反射机构内插入一分光比为 90:10 的光纤耦合器(OFC)用于实验监测。实验所用信号光源为 Agilent 8164B 可调激光器,测试设备为 Agilent 86140B 光谱分析仪和 EXFO 光功率计。

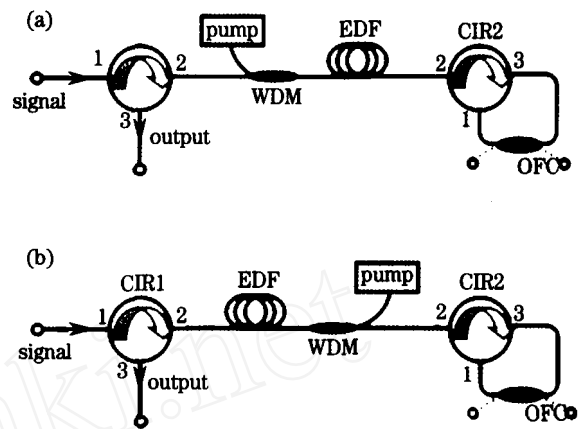


图 1 L 波段双通 EDFA 结构示意图。

(a) 正向抽运;(b) 反向抽运

Fig. 1 Configurations of the L-band double-pass EDFA.

(a) forward-pumped;(b) backward-pumped

## 3 结果与讨论

实验研究了 EDF 长度为 20 m 时正向和反向抽运双通 L 波段 EDFA 的增益特性。图 2 为测得的两两种 EDFA 在 80 mW 抽运光功率下对不同输入功率信号光的增益谱,其中空心和实心符号分别表示正向和反向抽运,而正方形、圆形和三角形符号则表示信号光功率分别为 -23, -13 dBm 和 0 时测得的数据。由图可见,两种抽运方案的增益谱形状基本相似,对于相同功率的输入信号光,正向抽运时的增

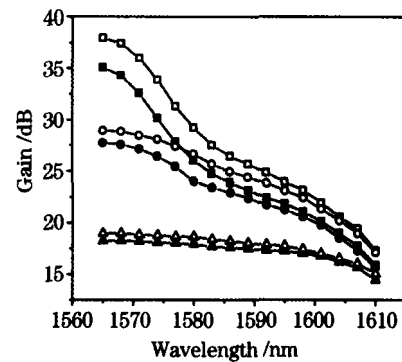


图 2 正向和反向抽运双通 L 波段 EDFA 的增益谱特性  
(20 m EDF,  $P_p = 80$  mW)

Fig. 2 Measured gain spectra of the forward- and backward-pumped L-band double-pass EDFA  
(20 m EDF,  $P_p = 80$  mW)

益高于反向抽运。当输入信号光功率为  $-23$  dBm 时,正向抽运时的增益比反向抽运在整个 L 波段均高约  $1.5\sim 2.5$  dB,随着信号光功率的增大,两者间的增益差值逐渐减小,当输入信号光功率增加到  $0$  时,两种抽运方案之间的增益差别减小至  $1$  dB 左右。可见,对于  $20$  m 的 EDF,正向抽运双通 L 波段 EDFA 的增益特性优于反向抽运。

但是,在相同抽运条件和相同的输入信号光功率下,正向抽运方案输出谱中所携带的 C 波段 ASE 远大于反向抽运时的情况,如图 3(a)和(b)所示。由于 ASE 由抽运光转化而来,根据能量守恒,反向

抽运方案输出 ASE 能量低,其增益和输出功率应更大,但实测结果却相反。为此,利用插入在反射环内的 OC 进一步研究了两种抽运方案的单程增益和光谱特性。实验测得,当输入信号光的波长和功率分别为  $1575$  nm 和  $-13$  dBm 时,正向和反向抽运方案的单程增益分别为  $12.95$  和  $12.2$  dB,即正向抽运时信号光经 EDF 第一次单程放大的效果优于反向抽运。由于在一定抽运条件下 EDF 放大正反向信号时的增益相等且与正反向信号光功率的相对大小无关<sup>[13]</sup>,因此,正向抽运方案的总增益高于反向抽运方案。

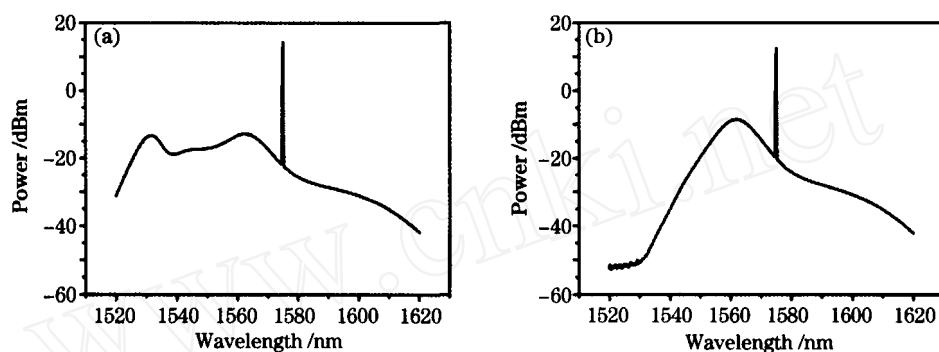


图 3 正向(a)和反向(b)抽运双通 L 波段 EDFA 的输出光谱。

Fig. 3 Measured output spectra of the forward (a) and backward (b) pumped L-band double-pass EDFA

由图 4(a)和(b)所示的在两种抽运方案反射环处测得的光谱来看(虚线和实线分别表示有、无输入信号光时的情况),与正向抽运方案不同,反向抽运方案的 ASE 谱覆盖了整个 C 和 L 波段,并且信号光输入后,对 ASE 抑制作用很小。将图 4(a)、(b)与图 3(a)、(b)相比较,并结合单程放大时的增益大小可见,反向抽运方案是通过反射环把抽运输入端附近产生的 C 波段 ASE 同时反馈至 EDF 中,该 C 波段 ASE 被 EDF 吸收后,起着辅助抽运源的作用,从而使反向抽运双通 L 波段 EDFA 的增益特性得到改善;而在正向抽运方案中,虽然不能利用抽运输

入端附近产生的后向 C 波段 ASE[如图 3(a)所示],但信号光输入端也是抽运输入端,粒子数反转度高、增益系数大,利于 L 波段信号光功率的增长,进而有利于抑制前向 ASE,并且,信号光经反射环后反向放大时,EDF 反转粒子数的纵向分布与其功率增长的要求相一致,信号光在抽运输入端附近的功率较高,也利于抑制 C 波段 ASE,从而使得正向抽运时虽无 C 波段 ASE 辅助抽运作用,但其增益特性依然得到改善。但是,由于两种抽运方案具有上述不同的增益改善机制,反向抽运方案虽能再利用抽运输入端附近的后向 C 波段 ASE 作为辅助抽运,

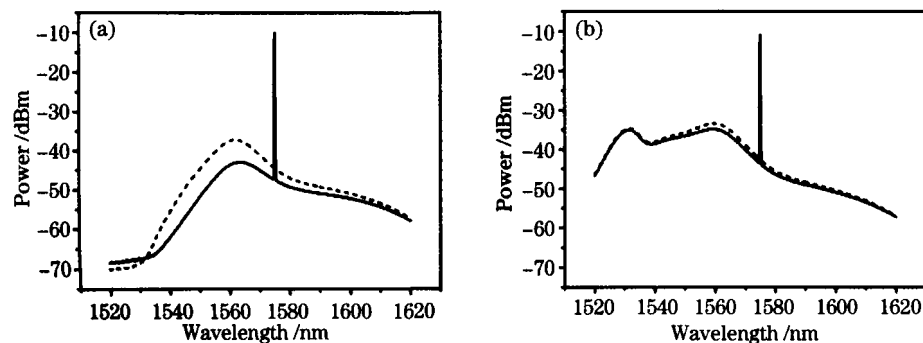


图 4 正向(a)和反向(b)抽运双通 EDFA 在反射环处监测的光谱。

Fig. 4 Measured spectra at the OC inserted in the reflection loop for the forward (a) and backward (b) pumped double-pass EDFA

但信号光输入和输出端附近粒子数反转度低,且在抽运输入端附近因 ASE 功率过大会引起 ASE 导致的增益自饱和效应<sup>[12]</sup>,该效应使 ASE 辅助抽运的效率降低,最终使得 EDF 为 20 m 时,正向抽运方案的增益改善效果优于反向抽运方案。

为进一步比较两种抽运方案的增益改善效果,将 EDF 的长度增加到 38 m,在 80 mW 抽运光功率下实验测量了两种 EDFA 的增益谱特性,结果如图 5 所示,空心符号分别表示正向和反向抽运。与 EDF 为 20 m 时(图 2)相比,增加 EDF 长度导致增益特性产生明显的变化,当输入信号光功率为 -23 dBm 时,正向抽运时的增益谱在 1577 nm 附近出现凹陷,而反向抽运的增益谱依然较平坦且增益值因 EDF 长度的增加提高到 30 dB 左右,这表明正向抽运时,抽运光相对于 38 m EDF 已经明显不足。事实上,正向抽运时的这种抽运不足可由反射环处有无信号光输入时测得的如图 6(a)所示的光谱清楚地看出,当无信号光输入时,正向抽运时反射环处的 ASE 位于 L 波段,且幅度较低,而当信号光输入后,C 和 L 波段的 ASE 背景却都相应增大,表明正向放大后的信号光在抽运不足的 EDF 中相对于 ASE 起着抽运源的作用,而增益谱在 1577 nm 附近出现的凹陷则是信号光在抽运不足的 EDF 中被吸收造成的。而对于反向抽运方案,如图 6(b)所

示,信号光输入前后在反射环处的 ASE 谱几乎不变,其中的 C 波段 ASE 经反射环后依然起着辅助抽运源的作用,而且 EDF 长度增加后,C 波段 ASE 作为辅助抽运的作用距离增加,从而使得反向抽运的增益值大于正向抽运方案。但是,随着输入信号光功率的增加,正向抽运 EDFA 的输入(出)端处 L 波段信号光相应增大,对抽运输入端附近的反向 C 波段 ASE 的抑制作用增强,使得正向抽运时的增益逐渐改善,当输入信号光功率为 0 时,正向抽运方案的增益已与反向抽运方案的增益基本相同。

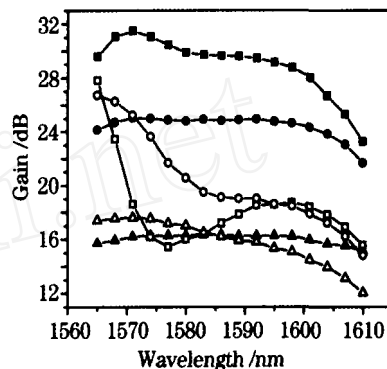


图 5 正向和反向抽运双通 L 波段 EDFA 的增益谱特性。  
(38 m EDF,  $P_p = 80$  mW)

Fig. 5 Measured gain spectra of the forward- and backward-pumped L-band double-pass EDFA.  
(38 m EDF,  $P_p = 80$  mW)

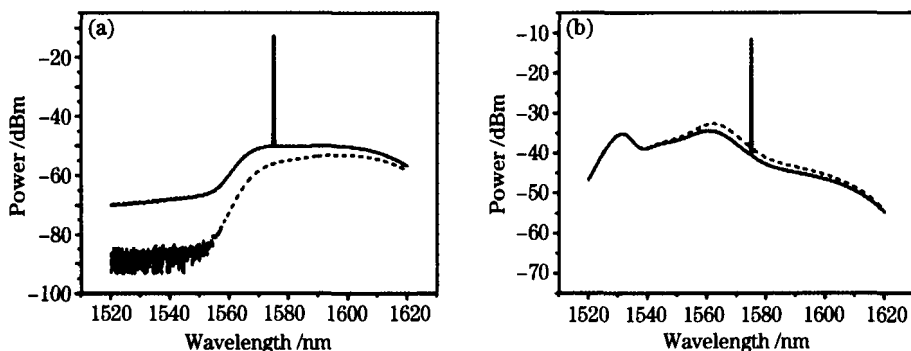


图 6 双通 EDFA 在反射环处监测的光谱。(a)正向抽运;(b)反向抽运

Fig. 6 Measured spectra at the OC inserted in the reflection loop for the two double-pass EDFA.

(a) forward-pumped; (b) backward-pumped

实验发现,对于 38 m 的 EDF,增加抽运光功率也可改善低输入信号光功率时的正向抽运方案的增益特性。图 7 为输入信号光功率为 -23 dBm 时在不同抽运光功率下的增益谱测试结果,空心符号分别表示正向和反向抽运。可以看出,当抽运光功率增加到 130 mW 时,正向抽运方案的增益与反向抽运方案在抽运光功率为 100 mW 时的增益相当,这表明,当输入信号光功率较低时,反向抽运方

案比正向抽运方案节约了 23% 的抽运光功率,因此,对于较长的 EDF,反向抽运方案因后向 C 波段 ASE 的辅助抽运作用,利于节约抽运光功率。值得指出,双通 EDFA 可以看作两级单端抽运的 EDFA 级联而成,而放大器的噪声主要由第一级噪声系数决定<sup>[14]</sup>,由于反向抽运方案在信号输入端粒子数反转度低,信噪比较差,所以相同条件下,反向抽运方案的噪声特性要比正向抽运方案差,本文实验结果

也反映了这种差别,但是,若在其前端放置低噪声的 EDFA,构成级联结构<sup>[15,16]</sup>,利用第一级低噪声 EDFA 改善反向抽运双通 EDFA 的噪声性能,可以实现 L 波段信号高增益、低噪声放大。

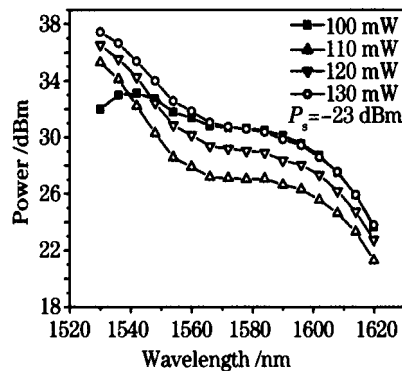


图 7 正向和反向抽运双通 EDFA 在不同抽运光功率下的增益谱特性

Fig. 7 Measured gain spectra of the forward- and backward-pumped L-band double-pass EDFA for different pump powers

## 4 结 论

通过实验对比正向和反向抽运 L 波段双通 EDFA 的输出特性,研究了它们的增益改善机制。结果表明,对于正向抽运双通 EDFA,信号光输入和输出端也是抽运输入端,粒子数反转度高,有利于 L 波段信号光输入后的功率快速增长和输出前的功率提升,从而导致 L 波段信号光在抽运输入端附近的功率高,利于抑制 C 波段 ASE,使其增益特性得到改善;反向抽运方案是通过反射环把抽运输入端附近产生的 C 波段 ASE 同时反馈至 EDF 中,该 C 波段 ASE 被 EDF 吸收后,起着辅助抽运源的作用,从而使反向抽运双通 L 波段 EDFA 的增益特性得到改善。但是,反向抽运在反射端因 ASE 功率过大会产生增益自饱和和效应,使得当 EDF 长度较短时,正向抽运方案的增益改善效果稍优于反向抽运;当 EDF 长度增加时,输入信号光功率较低时,正向抽运方案表现出明显的抽运不足,增益特性差,而反向抽运方案因对 C 波段 ASE 的利用程度提高,增益改善基本不受输入信号光功率高低的影响。

## 参 考 文 献

1 Li Peng, Liu Jianhui. Research progress of wide-band and ultra-wide-band fiber amplifiers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(6): 67~72

厉 鹏, 刘俊辉. 宽带、超宽带光纤放大器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(6): 67~72

2 T. Ono, Y. Yano. Key technologies for terabit/second WDM systems with high spectral efficiency of over 1 bit/s/Hz [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, 34(11): 2080~2088

3 F. A. Flood, C. C. Wang. 980 nm pump-band wavelength for long-wavelength-band Erbium-doped fiber amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, 11(10): 1232~1234

4 M. Bumki, Y. Hosung, L. Wanjae. Coupled structure for wide-band EDFA with gain and noise figure improvements from C to L-band ASE injection [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, 12(5): 480~482

5 M. A. Mahdi, F. R. Mahamd Adikan, P. Poopalan *et al.*. Long-wavelength EDFA gain enhancement through 1550 nm band signal injection [J]. *Opt. Commun.*, 2000, 176(1-3): 125~129

6 M. A. Mahdi, H. Ahmad. Gain enhanced L-band EDFA utilizing unwanted backward ASE [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, 13(10): 1067~1069

7 Meng Hongyun, Gao Weiqing, Dong Xiaoyi *et al.*. WGain enhancement of L-band erbium-doped fiber amplifiers based on fiber loop mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, 31(7): 825~828

蒙红云, 高伟清, 董孝义 等. 基于光纤环镜的 L 波段掺铒光纤放大器增益的提高 [J]. *中国激光*, 2004, 31(7): 825~828

8 H. B. Choi, J. M. Oh, D. Lee *et al.*. Simple and efficient L-band erbium-doped fiber amplifiers for WDM networks [J]. *Opt. Commun.*, 2002, 213(1-3): 63~66

9 Dai Yufeng, Lu Lin, Wang Rong *et al.*. Design and realization of a novel bidirectional EDFA [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(s2): 267~269

代玉峰, 卢 麟, 王 荣 等. 一种新的双向掺铒光纤放大器设计与实现 [J]. *光学学报*, 2009, 29(s2): 267~269

10 Jia Dongfang, Wang Yanyong, Bao Huanmin *et al.*. High gain low noise L-band preamplifier with cascade double-pass structure [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, 3(6): 311~312

11 S. W. Harun, P. Poopalan, H. Ahmad. Gain enhancement in L-band EDFA through a double-pass technique [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, 14(3): 296~297

12 Qinghe Mao, John W. Y. Lit. Amplification enhancement of L-band erbium-doped fiber amplifier by reflection scheme [J]. *Opt. Commun.*, 2002, 201(1-3): 61~69

13 Qinghe Mao, Jingsong Wang, Xiaohan Sun *et al.*. A theoretical analysis of amplification characteristics of bi-directional erbium-doped fiber amplifiers with single erbium-doped fiber [J]. *Opt. Commun.*, 1999, 159(1-3): 149~157

14 C. Ming, L. Xiaoming, C. Jing *et al.*. Study on noise characteristic of gain-clamped erbium-doped fiber-ring lasing amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, 9(8): 1093~1095

15 X. Bing, R. C. Lawrence. Comparison of the static and dynamic properties of single and double-pass partially gain-clamped two-stage L-band EDFAs [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, 15(4): 519~521

16 Zhang Yanbin, Peng Jiande, Liu Xiaoming. L-band erbium doped fiber amplifier with intrinsic gain flattening bandwidth of > 33 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, 29(11): 987~990

张岩滨, 彭江得, 刘小明. 本征平坦增益带宽 > 33 nm 的高增益、低噪声 L-波段掺铒光纤放大器 [J]. *中国激光*, 2002, 29(11): 987~990