

# 基于掺铒光纤的高增益低噪声光放大器实验研究

张珂卫<sup>1,2</sup> 赵 卫<sup>1</sup> 谢小平<sup>1,3</sup> 汪 伟<sup>1</sup> 钱凤臣<sup>1,3</sup> 韩 彪<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所,瞬态光学与光子技术国家重点实验室,陕西 西安 710119  
<sup>2</sup> 中国科学院大学,北京 100049  
<sup>3</sup> 西安通信学院,陕西 西安 710106

**摘要** 针对光放大器中高增益和低噪声系数之间存在矛盾的问题,利用掺铒光纤作为放大介质,采用两级掺铒光纤放大结构,并在两级之间加入前后向放大自发辐射(ASE)噪声抑制单元的实验方案,搭建了高增益、低噪声系数的掺铒光纤放大器。利用插值法,更加准确测量 ASE 噪声功率,分析了掺铒光纤放大器(EDFA)的增益和噪声系数等性能参数,并与商用的低噪声光放大器进行对比测试。实验结果表明,搭建的掺铒光纤放大器峰值增益为 40.1 dB,噪声系数最低为 3.8 dB,比量子极限高出 0.8 dB,而且在相同输入功率和相同增益条件下,自行搭建的低噪声光放大器的噪声系数比商用低噪声光放大器低 0.3 dB。

**关键词** 光通信;掺铒光纤放大器;放大自发辐射;低噪声

**中图分类号** TN722.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0506003

## Experimental Research of High Gain and Low Noise Figure Optical Amplifier Based on Erbium-Doped Fiber

Zhang Kewei<sup>1,2</sup> Zhao Wei<sup>1</sup> Xie Xiaoping<sup>1,3</sup> Wang Wei<sup>1</sup> Qian Fengchen<sup>1,3</sup> Han Biao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup> Xi'an Communication College, Xi'an, Shaanxi 710106, China

**Abstract** Considering the trade-off between the high gain and low noise figure in optical amplifier, a two-stage amplifier which has the structure to suppress the forward and backward-travelling amplified spontaneous emission noise with high gain and low noise figure based on Erbium-doped fiber is set up. Interpolation is used to test the power of amplified spontaneous emission (ASE) noise accurately. The gain and noise figures and some other parameters of the amplifier are analyzed. Comparison between the erbium-doped fiber amplifier (EDFA) and the commercial low noise EDFA is carried out. The results show that the highest gain of the EDFA in the experiment is 40.1 dB and the noise figure is 3.8 dB which is 0.8 dB above quantum-limit. The results when testing the amplifier and commercial EDFA in the same input power and gain show that the noise figure of the amplifier is 0.3 dB lower than the commercial EDFA.

**Key words** optical communications; erbium-doped fiber amplifier (EDFA); amplified spontaneous emission (ASE); low noise

**OCIS codes** 060.2330; 230.2285; 040.1880; 140.4480

## 1 引 言

高灵敏度光接收机应用于光纤通信和空间激光

通信系统中能降低发射功率、增加传输链路距离或者减少中继设备<sup>[1]</sup>。加入光前置放大器的直接探测

收稿日期: 2012-11-28; 收到修改稿日期: 2013-01-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61231012)资助课题。

作者简介: 张珂卫(1989—),男,硕士研究生,主要从事高灵敏度光接收方面的研究。E-mail: zhangkewei@opt.cn

导师简介: 赵 卫(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事超快光学、超快光电子学以及高功率激光技术等方面的研究。E-mail: weiz@opt.ac.cn

接收机能接近相干探测接收机的灵敏度<sup>[2,3]</sup>,而且结构简单,尤其不需要本振光源和考虑相位、频率、偏振控制的问题<sup>[4]</sup>,因此,研究基于光前置放大器的直接探测接收机具有重要的意义。

光前置放大接收机的一个重要组成部分就是光前置放大器。光放大器包括半导体光放大器(SOA)、掺铒光纤放大器(EDFA)和拉曼光纤放大器(FRA)等。但是一般的光放大器只能实现中等增益、较高噪声系数(NF)的光放大作用<sup>[5~11]</sup>。国外如 Abedin 等<sup>[5]</sup>在 2011 年研制的多芯掺铒光纤放大器,噪声系数约为 4 dB,但是增益只有 23 dB~27 dB; Bilal 等<sup>[6]</sup>在 2012 年研制的包含掺铒光纤放大器和拉曼放大器的混合放大器,增益约为 20 dB,噪声系数大于 4.2 dB。国内如刘博文等<sup>[10]</sup>在 2010 年研究的光纤飞秒激光放大器,利用非线性效应进行放大,增益只有 20 dB 左右<sup>[10]</sup>; 郑礼炳等<sup>[11]</sup>2012 年利用铒镱共掺的三元配合物新型材料作为放大介质进行放大<sup>[11]</sup>,但是增益仅为 1.87 dB。而掺铒光纤放大器经过优化可以实现高增益、低噪声系数的放大。掺铒光纤放大器的主要噪声源是放大自发辐射(ASE)噪声<sup>[12,13]</sup>。前向传输的 ASE 噪声可以利用滤波器减小到最低<sup>[14]</sup>。但是后向传输的 ASE 噪声会随着抽运功率的升高获得很高的强度,从而耗尽抽运功率,减少激发态载流子的数量,导致光放大器增益减小和噪声系数增加。有效抑制前后向传输的 ASE 噪声,能显著提高掺铒光纤放大器的性能。

本文针对掺铒光纤放大器中高增益和低噪声系数之间存在矛盾的问题<sup>[15]</sup>,采用两级掺铒光纤放大结构,并在两级之间加入 ASE 噪声抑制单元的实验方案。同时与商用低噪声光放大器在相同输入功率和相同增益条件下对比测试了噪声性能。

## 2 理论分析

掺铒光纤中  $\text{Er}^{3+}$  的能级简图如图 1 所示,  $\text{Er}^{3+}$  在没有抽运光的情况下,处在最低能级 E1(基态)上,当有抽运光入射时,铒离子吸收抽运光能量,向高能级跃迁。抽运光的波长不同会使得粒子跃迁的能级不同。由于 E2 能级(亚稳态能级)上粒子寿命比较长,跃迁到高能级上的粒子以非辐射跃迁的形式不断向 E2 能级汇集,从而实现粒子数的反转分布。当波长为 1520~1570 nm 的信号光通过掺铒光纤时,亚稳态能级上的粒子以受激辐射的形式跃迁到基态上,同时产生与信号光相同的光子,增加了信号光光子数量,实现信号光的放大作用<sup>[16]</sup>。

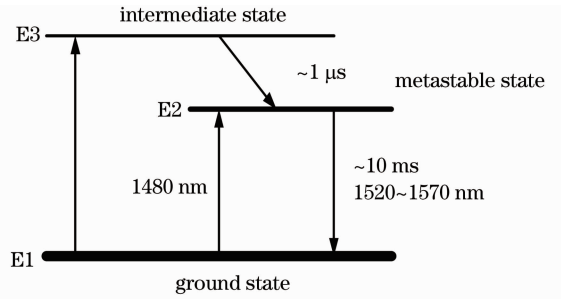


图 1 掺铒光纤中  $\text{Er}^{3+}$  能级简图

Fig. 1 Energy levels of  $\text{Er}^{3+}$  in erbium-doped fiber

掺铒光纤放大器的抽运波长有多种选择,但不合适的抽运光(如波长为 514 nm、807 nm)会使得激发态粒子跃迁到更高的能级,在多光子作用下,粒子由第四能级快速弛豫到激发态,产生很强的激发态吸收(ESA)现象,吸收抽运光,严重降低抽运效率<sup>[16]</sup>。理论和实验证明,当使用波长为 980 nm 抽运源来对  $\text{Er}^{3+}$  进行抽运时,掺铒光纤放大器能有最高的增益<sup>[17,18]</sup>。因此,本实验方案中采用 980 nm 的抽运源。

放大器性能的重要指标是增益和噪声系数两个参数。放大器增益定义<sup>[16]</sup>如下:

$$g = \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{noise}}}{P_{\text{in}}}, \quad (1)$$

将(1)式改写成分贝表示为

$$G = 10 \lg g, \quad (2)$$

式中  $P_{\text{out}}$  为输出总功率,  $P_{\text{noise}}$  为输出端噪声功率,  $P_{\text{in}}$  为输入信号光功率。

放大器的噪声系数是对信号通过放大器之后信噪比(SNR)恶化等级的一个度量。噪声系数的定义为<sup>[19]</sup>

$$f_{\text{NF}} = \frac{R_{\text{SN-in}}}{R_{\text{SN-out}}}. \quad (3)$$

式中  $R_{\text{SN-in}}$  是放大器输入端的信噪比,  $R_{\text{SN-out}}$  是输出端的信噪比。由文献[16]中的分析,对(3)式进行取对数处理可得

$$F_{\text{NF}} = 10 \lg f_{\text{NF}} = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{noise}}}{G h \nu B_0} + \frac{1}{G} \right), \quad (4)$$

式中  $B_0$  是光谱仪分辨率对应的噪声等效带宽,  $B_0 = \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda$ ,  $\lambda$  是信号中心波长,  $\Delta \lambda$  是光谱仪实际分辨率,  $\nu = c/\lambda$  是信号光频率,  $c$  是真空中光速,  $h$  是普朗克常量。

## 3 实验装置

实验装置如图 2 所示。信号光和抽运光先经过

隔离器(ISO),以减小反向传输噪声对放大器性能的影响。因为光在长距离传输过程中,各种损耗会使得信号光功率不断降低,本实验采用光衰减器(VOA)控制输入到放大器中的光功率来模拟实际应用中的传输损耗。抽运光和衰减后的信号光分别经过 90:10 的光耦合器(OC),10%端口连接光功率计用来监测信号光功率和抽运光功率,90%端口连接 980/1545 nm 光波分复用器(WDM-1)的两个输入端,并通过输出端口一起注入到第一段掺铒光纤(EDF-1)中,实现一级放大作用。放大之后的光信号通过 ASE 噪声抑制单元,先经 980/1545 nm

WDM-2 将信号光和抽运光分离开,抽运光直接经过下路传输到 WDM-3 中,信号光经过滤波器,该滤波器既能滤除前向传输的 ASE 噪声,又能抑制后向传输的 ASE 噪声,最大程度地利用抽运光,提高放大增益,降低噪声系数。由 ASE 噪声抑制单元输出的光向前传输到下一级掺铒光纤(EDF-2)中进行放大处理,两级放大之后的光信号通过放大器输出端口(OUT)输出到光谱分析仪(OSA)中进行测量。WDM 和 EDF 以及 ASE 噪声抑制单元之间均通过熔接连接,最大程度地降低插入损耗。

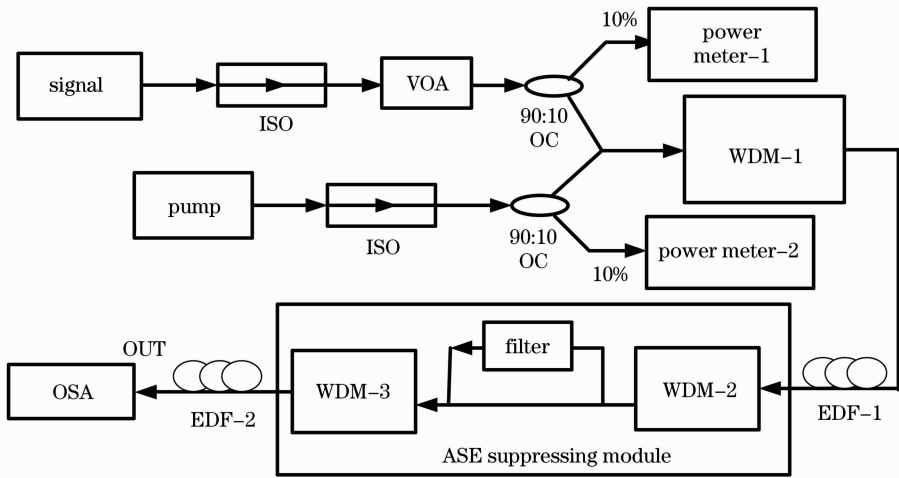


图2 实验装置

Fig.2 Experimental setup

## 4 性能测试与分析

### 4.1 增益和噪声系数测试与分析

基于图2所示实验装置搭建实验系统,并对研制的放大器增益和噪声系数进行实验研究。连续光激光器产生中心波长为 1545.3 nm,功率为 5 mW (7.0 dBm)的连续光。通过调节衰减器的衰减系数,监测输入信号功率,使得输入信号光功率为 -40.0 dBm,光谱仪测得光源自发辐射(SSE)噪声为 -72.5 dBm。抽运源产生 980 nm 抽运光,调节抽运光功率从 10 mW (10.0 dBm)不断升高到 100 mW (20.0 dBm),每次升高 10 mW。设定合适的光谱仪分辨率,并根据光谱仪参数记录光谱仪实际的分辨率  $\Delta\lambda$ 。然后测试信号光功率和噪声功率。

图3是放大器输出光谱图,图中峰值处(A点)的功率值即为中心波长处的输出总功率  $P_{out}$ 。在测量噪声功率时,为了更加准确地测量中心波长处的噪声功率值,在中心波长(1545.3 nm)两侧+0.5 nm处即 1544.8 nm(B点)和 1545.8 nm(C点)处分别测量噪

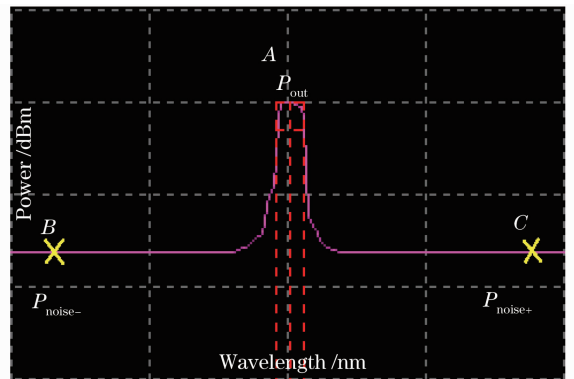


图3 放大器输出光谱图

声功率值,记为  $P_{noise-}$  和  $P_{noise+}$ ,然后利用插值法<sup>[19,20]</sup>,得到中心波长处的噪声功率值  $P_{noise}$ 。由测试数据可知,SSE噪声功率与信号功率及ASE噪声功率相比非常小,对增益和噪声系数影响可以忽略不计。

根据上述实验测量数据,通过(2)式和(4)式分

析计算,可以分别得到光放大器增益和噪声系数值。图 4 是光放大器增益随抽运光功率变化的曲线,当抽运功率为 10 mW 时,还没有进入放大器的增益区域,因此几乎没有放大作用,当达到 20 mW 时,增益明显升高,而且随着抽运功率的不断增大,增益也越来越大,最后趋于饱和,实验测量所得最高增益为 40.1 dB。图 5 是噪声系数随抽运功率变化的曲线,中间横线代表  $F_{NF}=4.0$  dB。可以看出放大器整体的噪声系数在 4.0 dB 上下波动,最低为 3.8 dB。

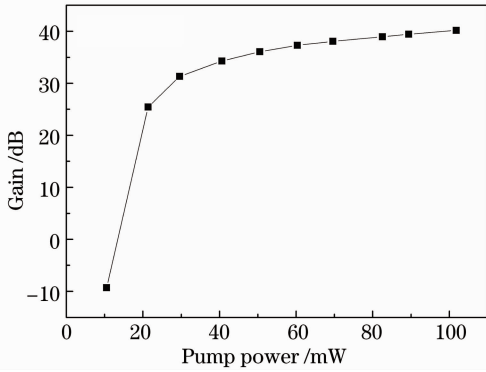


图 4 增益随抽运功率变化的曲线  
Fig. 4 Gain versus pump power

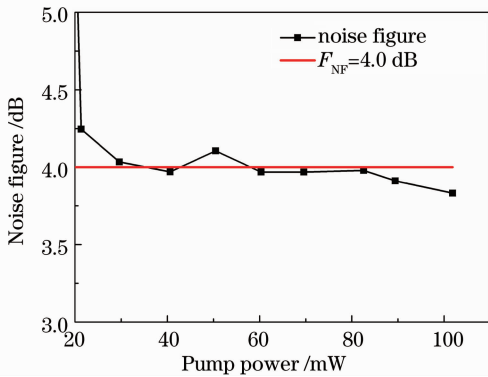


图 5 噪声系数随抽运功率变化的曲线  
Fig. 5 Noise figure versus pump power

#### 4.2 与商用低噪声光放大器对比测试与分析

最后对比测量了自行搭建的低噪声光放大器与 Alnair 公司的 LNA-200-C 商用低噪声光放大器的噪声性能,在相同输入功率下,调节抽运功率,使放大器达到相同增益,测试放大器的噪声功率,利用(4)式分别计算各自的噪声系数并进行对比。图 6 是两个放大器噪声系数对比图,圆点代表商用 EDFA,方形代表自行搭建的 EDFA。从图中可以看出,在相同输入功率和相同增益的条件下,自行搭建的低噪声光放大器比商用的低噪声光放大器噪声系数低 0.3 dB。

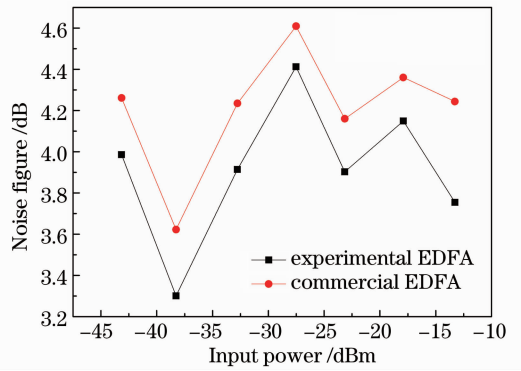


图 6 放大器噪声系数对比图  
Fig. 6 Comparison of noise figure between experimental EDFA and commercial EDFA

## 5 结 论

利用两级掺铒光纤和中间加入 ASE 噪声抑制单元的结构,搭建了高增益、低噪声系数的掺铒光纤放大器。使放大器峰值增益达到 40.1 dB,噪声系数最低 3.8 dB,最高 4.3 dB。而且在相同输入功率和相同增益条件下,与商业的低噪声光放大器相比,具有更低的噪声系数。该高增益、低噪声系数掺铒光纤放大器在光纤通信和空间激光通信领域具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 J. C. Livas. High sensitivity optically preamplified 10 Gb/s receivers[C]. San Jose: Optical fiber Communicaiton Conference, 1996. 343~345
- 2 T. J. Paul, E. A. Swanson, J. C. Livas *et al.*. 3 Gbit/s optically preamplified direct detection DPSK receiver with 116 photon/bit sensitivity [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(7): 614~615
- 3 Zhu Zihang, Zhao Shanghong, Zhao Hui *et al.*. Optimization of optically preamplified inter-satellite microwave photonics links with two radio-frequency signal input [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(1): 0106003  
朱子行, 赵尚弘, 赵 辉 等. 两路输入前置光放大器星间微波光子链路优化[J]. *光学学报*, 2013, **33**(1): 0106003
- 4 Matthias Seimetz. High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission [M]. Berlin: Springer, 2009. 66~67
- 5 K. S. Abedin, T. F. Taunay, M. Fishteyn *et al.*. Amplification and noise properties of an erbium-doped multicore fiber amplifier [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(17): 16715~16721
- 6 S. M. Bilal, M. Zafrullah, M. K. Islam. Gain flattening of DWDM channels for the entire C & L bands [J]. *J. Opt. Technol.*, 2012, **79**(9): 557~560
- 7 M. C. Paul, S. W. Harun, N. A. D. Huri *et al.*. Performance comparison of Zr-based and Bi-based erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(17): 2882~2884
- 8 Koppole Kamakshi, Vipul Rastogi. Inherently gain flattened S-band erbium doped fiber amplifier based on dual core resonant leaky fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(12): 2821~2825
- 9 N. Md. Yusoff, A. F. Abas, S. Hitam *et al.*. Bidirectional-pumped L-band erbium-doped fiber amplifier with pump

- distribution technique [J]. *Laser Phys.*, 2012, **22**(7): 1252~1256
- 10 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Photonic crystal fiber femtosecond laser amplifier with millijoules and 100 fs level output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2415~2418  
刘博文, 胡明列, 宋有建等. 微焦耳、百飞秒光子晶体光纤飞秒激光放大器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2415~2418
- 11 Zheng Libing, Wang Jianbin, Liang Xu *et al.*. Study of polymer optical waveguide amplifier at 1.55  $\mu\text{m}$  wavelength [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(s1): s105003  
郑礼炳, 汪建斌, 梁旭等. 1.55  $\mu\text{m}$  波段聚合物光波导放大器的研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(s1): s105003
- 12 He Yang, Han Qun, Ning Jiping *et al.*. Suppressing amplified spontaneous emission in high-power pulsed Er-Yb codoped fiber amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(10): 1002004  
何洋, 韩群, 宁继平等. 高功率脉冲 Er-Yb 共掺光纤放大器中放大自发辐射的抑制办法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(10): 1002004
- 13 Hua Yun, Gui Youzhen, Yang Fei *et al.*. Analysis of repeater for time and frequency dissemination via optical fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(9): 0905002  
华芸, 桂有珍, 杨飞等. 光纤时频传递系统中的中继技术分析[J]. *中国激光*, 2012, **39**(9): 0905002
- 14 R. C. Steele, G. R. Walker, N. G. Walker. Sensitivity of optically preamplified receivers with optical filtering [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(6): 545~547
- 15 M. N. Zervas, R. I. Laming, D. N. Payne. Trade-off between gain efficiency and noise figure in an optimised fibre amplifier [C]. San Jose: Optical fiber Communication Conference, 1992. 148~156
- 16 P. C. Becker, N. A. Olsson, J. R. Simpson. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology [M]. San Diego: Academic Press, 1999. 132~145
- 17 R. I. Laming, M. C. Farries, P. R. Morkel *et al.*. Efficient pump wavelengths of erbium-doped fibre optical amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(1): 12~14
- 18 M. Shimuzu, M. Yamada, M. Horiguchi *et al.*. Erbium-doped fibre amplifiers with an extremely high gain coefficient of 11.0 dB/mW [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(20): 1641~1643
- 19 M. Movassaghi, M. K. Jackson, V. M. Smith *et al.*. Noise figure of erbium-doped fiber amplifiers in saturated operation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(5): 812~817
- 20 Douglas M. Baney, Philippe Gallion, Rodney S. Tucker. Theory and measurement techniques for the noise figure of optical amplifiers [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2000, **6**(2): 122~154

栏目编辑: 王晓琰