

# 掺铒光纤放大器光谱特性和 噪声特性的研究\*

施可彬<sup>1</sup> 盛秋琴<sup>1</sup> 葛春风<sup>2</sup> 杨秀峰<sup>2</sup> 董孝义<sup>2</sup>

(南开大学<sup>1</sup> 物理系, <sup>2</sup> 现代光学研究所 天津 300071)

**提要** 报道了利用 980 nm 波长的单抽运光源抽运掺铒光纤得到的放大自发辐射谱(ASE 谱)特性,对在较小抽运功率条件下得到的掺铒光纤荧光谱特征图进行了探讨;在此基础上对采用两个 980 nm LD 作抽运光源的掺铒光纤放大器(EDFA)的噪声特性进行了实验研究,得到具有良好噪声特性的结果。

**关键词** 掺铒光纤放大器,增益,噪声,放大的自发辐射谱

激光放大器是长距离光纤传输如陆地干线和海底光缆系统以及其他光通信系统和光信息处理系统中需要补偿损耗所需要的关键器件。近年来,掺铒光纤放大器(EDFA)的出现,为全光通信及光通信集成奠定了基础,引起了光通信技术的一场革命。我们对 EDFA 的光谱和噪声特性进行了实验研究。

在光谱特性研究中,我们以放大的自发辐射谱为主,因为其近似于 EDFA 的小信号增益谱,对它的研究将对以后的掺铒光纤放大器有理论指导意义;并在 ASE 谱实验数据的基础上对双抽运 EDFA 的噪声特性进行了实验研究,得到了理想的符合。

## 1 实验方法

ASE 谱的测量装置如图 1,用 980 nm 的半导体激光器(LD)直接抽运掺铒光纤,其 ASE 光谱经一隔离器进入光谱仪进行检测。实验中并没有对 LD 的尾纤和 EDF 进行熔接,而是在熔接机上对准,这样可以避免 LD 尾纤因多次和掺铒光纤熔接而进行端面处理,以保留其必须的长度。光隔离器可以一定程度地避免端面反射引起的振荡。

实验使用的掺铒光纤是电子部 46 所提供的,掺杂浓度 $\sim 200 \times 10^{-6}$ ,数值孔径 N. A. = 0.215,截止波长  $\lambda_c = 940$  nm,外径 $\sim 125$  nm,芯径 $\sim 3$   $\mu\text{m}$ 。半导体激光器由中国科学院半导体研究所提供,峰值波长为 974.5 nm,半宽度为 2.4 nm,尾纤的最大输出功率为 62 mW,采用 980 nm 波段的半导体激光器做抽运源,因其不仅不存在激励态吸收,而且抽运效率高,响应速度快,量子转换效率接近百分之百。光谱仪是电子部 41 所生产的 AV6361 型,最小波长分辨

\* 国家自然科学基金(编号:69878007)资助项目。

收稿日期: 1998-10-12; 收到修改稿日期: 1998-11-23

率为 0.1 nm, 最小可测功率为 -71 dBm。熔接机处损耗为 0.02 dB。

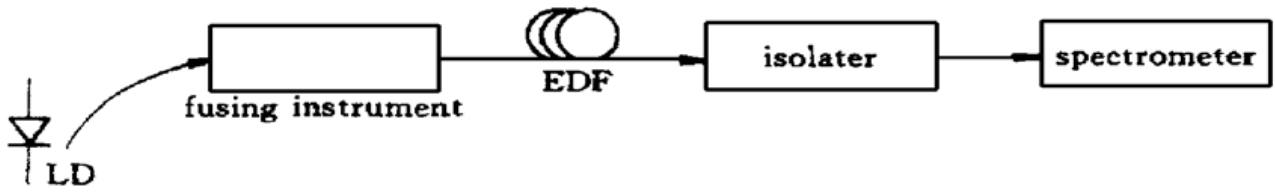


图 1 ASE 谱测量实验装置图

Fig. 1 Schematic view of ASE detection setup

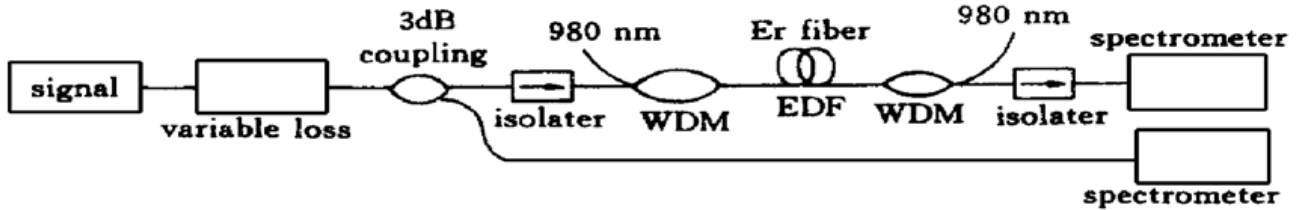


图 2 EDFA 的实验装置示意图

Fig. 2 Experimental setup of EDFA

图 2 是 EDFA 的实验装置示意图。抽运光经波分复用(WDM)光纤耦合器, 激发掺铒光纤中的铒离子形成粒子数反转, 信号光通过同一耦合器进入掺铒光纤, 诱发受激辐射而得到放大, 为防止放大器的自激振荡及传输光路中的光反馈, 在放大器的输入端和输出端需置光隔离器。实验中通过可调衰减器(每次衰减间隔约为 5 dB)来控制信号光的强度变化, 信号光经 3 dB 耦合器分为两束, 一束用作信号光的监测, 另一束和 980 nm 抽运光一同耦合进入掺铒光纤, 经 EDFA 最终放大的信号可在光谱仪上进行观测, 以和信号光进行比较。本实验中采用如图所示的双向抽运。所用信号光源是中心波长为 1546 nm 的 LED, 980 nm/1550 nm 耦合器由厦门安特光电子技术有限公司提供。实验中, 采用如下公式<sup>[1]</sup>对 EDFA 的噪声系数作测量计算

$$NF(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left[ \frac{P_{\text{ASE}}}{h\nu G B_0} + \frac{1}{G} \right]$$

其中,  $G$  为放大器的净增益,  $B_0$  为带宽;  $P_{\text{ASE}}$  为自发发射功率, 它的测量即采用图 1 所用方法。

## 2 实验结果和讨论

图 3 是 3 m 长铒光纤在不同功率下的谱图。在一定的长度以内, 抽运光功率很小时, 增益谱仅在 1560 nm 附近有峰值, 随着抽运光功率的逐渐加大, 在 1532 nm 附近出现峰值, 但其小于 1560 nm 附近的峰值, 在 1540 nm 附近形成一个低谷, 1531 nm 处峰值随抽运光功率的增长速度远大于 1560 nm 附近峰值的增长, 直至前者远大于后者至 7~8 dB, 抽运功率继续增加, 在 1532 nm 处出现不稳定激光。光纤长度增加, 则使 1531 nm 附近峰值超过 1560 nm 附近峰值需要更大的抽运功率。这源于重吸收效应, 它依赖于吸收截面和荧光截面的交叠部分。功率大到一定程度时, 重吸收效应消失, 这源于较高程度的粒子数反转。由文献[2]理论可知, 激光发射波长在 1532 nm 和 1553 nm 之间有一“禁带”, 满足阈值条件时, 如果粒子数反转程度较低, 则增益波形在 1553 nm 附近有最大值, 而 EDF 的粒子数反转程度较高时, 最大值移向

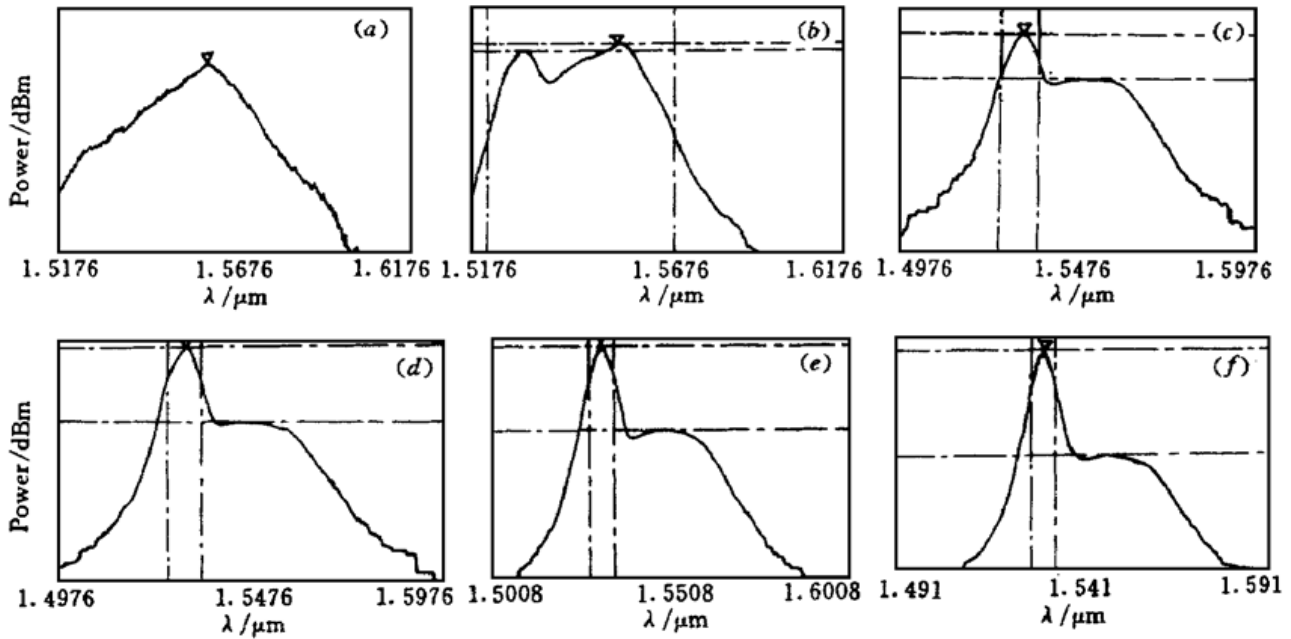


图 3 3 m 长铒光纤在不同功率下的 ASE 谱

Fig. 3 The ASE of 3 m Er-doped fiber pumped in different power

(a)  $P_{\text{pump}} = 3.0 \text{ mW}$ ; (b)  $P_{\text{pump}} = 6.8 \text{ mW}$ ; (c)  $P_{\text{pump}} = 14.4 \text{ mW}$ ;(d)  $P_{\text{pump}} = 18.2 \text{ mW}$ ; (e)  $P_{\text{pump}} = 22.0 \text{ mW}$ ; (f)  $P_{\text{pump}} = 25.8 \text{ mW}$ 

1532 nm 附近, EDF 接近完全粒子数反转时, 其增益谱类似于发射谱。表 1 给出不同长度铒光纤的 ASE 谱变化情况。

表 1 3 m, 5 m, 9 m 光纤 ASE 谱变化趋势的比较

Table 1 The comparison in ASE of different length

Fiber length / m	Pump power / dBm	Maximum power at 1532 nm/ dBm	Maximum power at 1560 nm/ dBm	Difference between 1532 nm and 1560 nm/ dBm
3	3.0	-	- 51.86	
	6.8	- 46.44	- 46.20	- 0.24
	10.6	- 39.54	- 42.48	2.94
	14.4	- 37.30	- 40.85	3.55
	18.2	- 33.60	- 39.70	6.10
	22.0	- 30.90	- 37.95	7.05
5	6.8	- 47.32	- 44.44	- 2.88
	10.6	- 36.62	- 37.38	0.76
	14.4	- 29.94	- 34.56	4.62
9	6.8	- 51.26	- 45.52	- 5.74
	10.6	- 41.42	- 38.84	- 2.58
	14.4	- 31.68	- 33.88	2.20
	18.2	- 25.85	- 30.05	4.20

如表 1 所示, 对 3 m, 5 m, 9 m 的 EDF 而言, 在不同但确定的抽运功率条件下, 1532 nm 附近的峰值随光纤长度增加而升高, 而后降低。这是由于对一定的抽运功率(大于抽运阈值功率)时, 总存在一个最佳长度<sup>[3]</sup>, 超过这个长度后峰值会降低。当抽运功率加大到一定程度,

总会出现激光。文献[4]认为 EDF 端面附近存在缺陷而引起光反射,而导致激光振荡,这种振荡发生在掺铒光纤 ASE 谱的峰值波长处,由于较长掺铒光纤的 ASE 谱近似于其小信号增益,因此也可以认为发生在掺铒光纤放大器的最大增益处,对其增益产生不良影响。

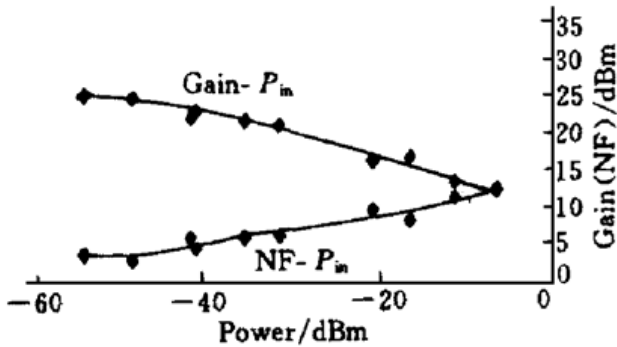


图 4 5 m 铒光纤在 1532 nm 处增益和 NF 与信号的关系

Fig. 4 Gain-signal and NF-signal of 5 m EDF at 1532 nm

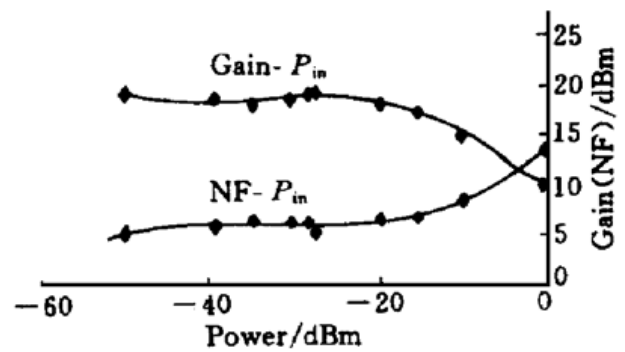


图 5 9 m 铒光纤在 1546 nm 处增益和 NF 与信号的关系

Fig. 5 Gain-signal and NF-signal of 9 m EDF at 1546 nm

图 4、图 5 为 EDFA 的增益-输入功率曲线和噪声系数-输入功率曲线的比较。由图可见,增益和噪声系数有对称形式,与理论很好吻合。

### 参 考 文 献

- 1 Yoshiaki Sato, Yoshaki Yamabayashi, Kazuo Aida. Noise figure monitoring of optical amplifiers via backward amplified spontaneous emission. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(2): 202~ 204
- 2 P. Franco, M. Midrio, A. Tozzato *et al.*. Characterization and optimization criteria for filterless erbium-doped fiber lasers. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(6): 1090~ 1097
- 3 Emmanuel Desurvire, J. R. Simpson. Amplification of spontaneous emission in erbium-doped single-mode fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(5): 835~ 845
- 4 R. J. Mears, S. R. Baker. Erbium fiber amplifiers and laser. *Optical and Quantum Electron.*, 1992, **24**: 517 ~ 538

## Studies on the Spectrum and the Noise of EDFA

Shi Kebin Sheng Qiuqin

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)

Ge Chunfeng Yang Xiufeng Dong Xiaoyi

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

**Abstract** The ASE of erbium-doped fiber pumped by 980 nm laser diode is measured and the noise figure of EDFA pumped by two 980 nm laser diodes is studied. Experimental results are in harmony with theoretical results.

**Key words** erbium-doped fiber amplifier, gain, noise, ASE