

# 掺铒光纤放大器自动增益控制的理论研究

常志武 宁继平 纪国勤 姚建铨

(天津大学精密仪器与光电子工程学院国家教委光电子信息工程开放实验室 天津 300072)

**提要** 采用环形激光器法,建立了 LD 抽运的掺铒光纤放大器(EDFA)自动增益控制数学模型,从理论上系统地讨论了该自动增益控制 EDFA 的原理,并用计算机模拟计算和分析了其各种特性。

**关键词** 掺铒光纤放大器,自动增益控制,环形激光器法,噪声指数

掺铒光纤放大器(EDFA)作为一种新型全光中继器,在光纤传输与网络系统中的应用前景为世人所瞩目。现在的信息界人士已有共识:波分复用器(WDM)+EDFA 将是充分挖掘光纤带宽潜力、实现高速通信的最佳途径。

EDFA 应用于 WDM 系统或放大低速调制的饱和光信号时,信道的开通和关闭使 EDFA 的输入功率发生变化,导致其稳态增益变化,输出功率将随之发生波动;而且,由于 EDFA 的增益瞬态饱和效应,将导致信道间的交叉串扰,使信号失真。这两点在 EDFA 级联放大应用中表现得更加突出,因此,稳定 EDFA 的增益尤为重要。

目前主要采用的解决方案有两种,即动态增益控制和自动增益控制(AGC)<sup>[1~4]</sup>。方案一是通过对 EDFA 输出进行取样并反馈来调节 LD 抽运电流,使 EDFA 的输入在很大范围内变化时维持增益恒定,该方案不但需要许多附加器件,而且有较大的电延迟<sup>[1,2]</sup>;方案二是采用光学元件如光纤光栅或光纤等,形成线形或环形激光器,在 EDFA 中建立稳定的激射,从而控制增益变化<sup>[3,4]</sup>。我们认为采用环形激光器法结构简单,易于实现,本文将系统讨论其原理及性能。

## 1 AGCEDFA 的结构与原理(数学模型)

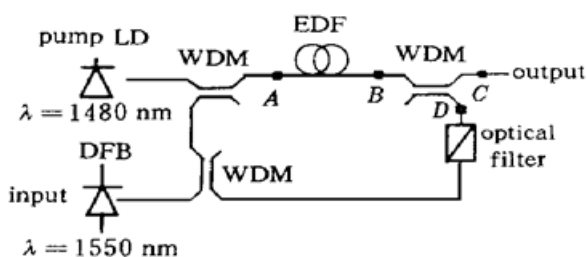


图 1 AGCEDFA 的结构

Fig. 1 Configuration of AGCEDFA

AGCEDFA 的结构如图 1 所示,EDFA 的输出经 WDM 耦合出一部分,由光滤波器选出放大的自发辐射(ASE)的其中一个波长后,经光纤反馈回 EDFA 输入端,将形成一个环形激光器,满足一定激射条件时,可在被选波长上建立起稳定的激光谐振。常温下掺铒光纤(EDF)是均匀加宽为主的增益介质<sup>[5]</sup>,EDFA 的粒子数反转程度受谐振光的牵制而处于某一稳定状态,从而决定了整个 EDFA 增益带宽内所有

光波长的增益。在波分复用系统中,复用波长数目变化时,即 EDFA 输入功率变化时,只要环

形腔的稳定激射不被破坏,所有信道的增益将保持不变。具体原理如下:设系统有  $N$  个复用信道,在稳态条件下,EDFA 中第  $K$  个信道的光波传输方程为<sup>[5]</sup>

$$\frac{\partial P_K}{\partial Z} = -P_K \left[ \alpha_K + \frac{h\nu_K}{P_K^{\text{sat}}} \sum_{j=1}^{N+1} \frac{1}{h\nu_j} \frac{\partial P_j}{\partial Z} \right] \quad K = 1, 2, \dots, N+1 \quad (1)$$

式中  $P_K$ ,  $\alpha_K$ ,  $P_K^{\text{sat}}$ ,  $\nu_K$  分别为第  $K$  个信道的光功率、吸收系数、固有饱和光功率及频率,该式也适用于抽运光,因此  $K = 1, 2, \dots, N+1$ 。对(1)在整个 EDFA 长度  $L$  积分得到

$$P_K^{\text{out}} = P_K^{\text{in}} \exp \left[ -\alpha_K L + \frac{h\nu_K}{P_K^{\text{sat}}} \sum_{j=1}^{N+1} \frac{1}{h\nu_j} (P_j^{\text{in}} - P_j^{\text{out}}) \right] \quad (2)$$

式中  $P_K^{\text{in}}$ ,  $P_K^{\text{out}}$  分别为 EDFA 第  $K$  个信道或抽运光输入输出光功率,当抽运光在 1480 nm 波段时,  $h\nu_j \approx h\nu_K$ , 式(2)可简化为<sup>[6]</sup>

$$P_K^{\text{out}} = P_K^{\text{in}} \exp \left[ -\alpha_K L + \frac{1}{P_K^{\text{sat}}} \sum_{j=1}^{N+1} (P_j^{\text{in}} - P_j^{\text{out}}) \right] \quad (3)$$

设  $K = f$  表示被选 ASE 波长,  $\beta$  表示环形腔损耗(图 1 中从  $B$  到  $A$ ),包括耦合器损耗,输出损耗等。则该波长存在如下关系

$$P_f^{\text{out}} = \beta P_f^{\text{in}} \quad (4)$$

当该波长上的增益  $G \geq \beta$  时,形成环形激光谐振,将(4)式代入(3)式并用增益表示

$$G = 10 \log \exp \left[ -\alpha_K L + \frac{P_f^{\text{sat}}}{P_K^{\text{sat}}} (\ln \beta + \alpha_f L) \right] \quad (5)$$

式中  $P_f^{\text{sat}}$ ,  $\alpha_f$  分别为谐振波长的固有饱和功率及吸收系数。除  $\beta$  外各参数都为常数,即所有信道的增益只是  $\beta$  的函数,与信号光输入无关。

## 2 AGCEDFA 特性的模拟计算与分析

下面根据式(4), (5)及噪声指数 ( $NF$ )

$$NF = 10 \log \frac{P_{\text{ASE}}}{h\nu\Delta\nu G} \quad (6)$$

计算与分析 AGCEDFA 的各种特性。上式中,  $\Delta\nu$  为滤波器带宽,  $P_{\text{ASE}}$  为自发辐射噪声功率。计算时所用信号光波长为  $\lambda_s = 1.550$  nm, 抽运光功率为 50 mW, 抽运波长为 1480 nm, EDF 最佳长度为 18.1 m, 其他参数如表 1 所示。

表 1 不同波长下铒离子的吸收与辐射截面参数

Table 1 Absorption and emission cross-sections at different wavelengths

Wavelength/nm	1480	1537	1545	1550	1556
$\sigma_a / 10^{-25} \text{ m}^2$	2.119	3.315	2.691	2.418	4.238
$\sigma_e / 10^{-25} \text{ m}^2$	0.832	4.524	4.316	4.277	2.210

### 2.1 不同谐振波长及损耗下 $G$ , $NF$ 与输入信号功率的关系

图 2 是将滤波器调谐在 1537 nm 形成闭环且在该波长损耗  $\beta$  为 20 dB 和 25 dB 时, AGCEDFA 增益和噪声指数随输入信号光变化的曲线。为比较开环与闭环,图中保留了开环特性曲线,上面三条是增益曲线,下面三条为噪声指数曲线。由图知,在增益受控范围内,  $G$  和  $NF$  曲线平坦,  $G$  的变化小于 0.2 dB, 即  $G$ ,  $NF$  与输入信号无关。与开环相比, 2.1 dB 饱和输入功

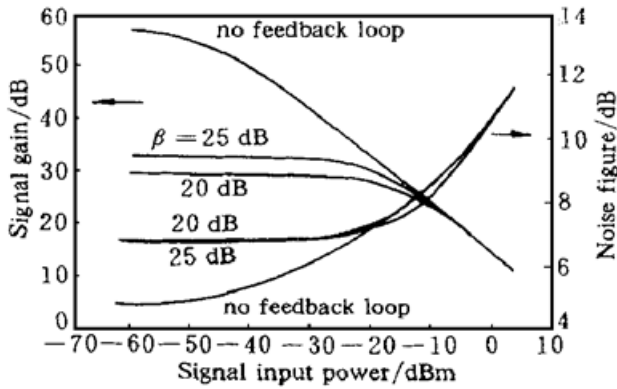


图 2  $\lambda_r = 1537 \text{ nm}$  时闭环 AGCEDFA 的特性

Fig. 2 The characteristics of AGCEDFA with a feedback loop at  $\lambda_r = 1537 \text{ nm}$

光减弱, EDFA 饱和程度减弱导致增益提高, 信号光输入有较大的增加后, 反馈光进一步减弱以至不能形成激光振荡, 所以可控范围减小。

同样, EDFA 开环时小信号增益很大,  $NF$  较小, 随信号光增强,  $P_{ASE}$  下降, 而 EDFA 饱和增益  $G$  下降幅度更快, 导致  $NF$  增大。EDFA 闭环时, 增益受控范围内, 整个 ASE 谱不随信号光的变化而变化,  $P_{ASE}$  与  $G$  恒定, 因与开环相比  $G$  压缩较大,  $NF$  在小信号时比开环时稍大且保持恒定。

图 3 和图 4 是分别将滤波器调谐在  $\lambda_r = 1545 \text{ nm}$  及  $\lambda_r = 1556 \text{ nm}$  时 AGCEDFA 的特性曲线, 各曲线的基本趋势与图 2 相同, 但相同损耗  $\beta$  下, 谐振波长不同, 信号光的增益压缩不同, 受控范围也不同。在 EDFA 增益带宽内, 对同样的  $\beta$ , 随谐振波长增长, 与该波长对应的铒离子受激辐射截面减小(如表 1), 从而信号光  $G$  压缩增大, EDFA 的 3 dB 饱和信号输入功率增大, 因此可控范围也增大。如图 2~4 所示,  $\beta = 20 \text{ dB}$  时, 可控范围逐渐变大, 最大输入信号功率分别为  $-23 \text{ dBm}$ ,  $-16 \text{ dBm}$ ,  $-7 \text{ dBm}$ 。从式(5)分析可得同样结果, 随谐振波长增加, EDFA 对该波长的吸收系数减小, 固有饱和功率增大, 信号光增益逐渐减小; 另外在三种谐振波长上, 增益受控期间  $NF$  基本相同, 这是因谐振光使 EDFA 深度饱和, ASE 谱受到谐振光控制的缘故。

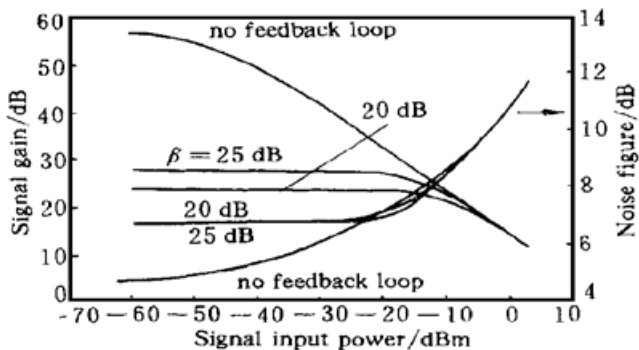


图 3  $\lambda_r = 1545 \text{ nm}$  时闭环 AGCEDFA 的特性

Fig. 3 The characteristics of AGCEDFA with a feedback loop at  $\lambda_r = 1545 \text{ nm}$

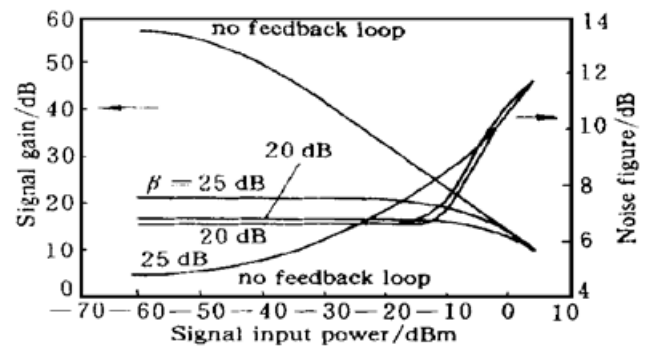


图 4  $\lambda_r = 1556 \text{ nm}$  时闭环 AGCEDFA 的特性

Fig. 4 The characteristics of AGCEDFA with a feedback loop at  $\lambda_r = 1556 \text{ nm}$

## 2.2 信号光、谐振光及 AGCEDFA 的输出功率随信号光输入的变化关系

图 5 是 AGCEDFA 谐振光、信号光输出功率随输入信号光功率的变化关系。由图知, 增益受控范围内, 谐振光自动补偿信号光的变化以维持信号光增益恒定, 信号光输入与输出呈线性

率提高很大, 但小信号增益有较大的压缩, 因形成激光谐振后, 谐振光占有绝对优势, 消耗了绝大多数粒子数, 这将在下面的分析中得到证明。当信号光功率继续增大到破坏激光振荡时,  $\beta$  对  $G$  失去控制作用, 信号光立即饱和 EDFA, 导致增益迅速下降, 此时闭环与开环 EDFA 相同, 因此, 闭环曲线与开环曲线后半段重合。不同损耗  $\beta$  决定不同的增益  $G$ , 并且  $\beta$  对  $G$  的控制范围也不同,  $\beta$  越小,  $G$  越小, 可控范围越大, 这与(5)式相符, 因形成激光振荡后, 谐振光使 EDFA 深度饱和, 环路损耗  $\beta$  增大时, 反馈回 EDFA 输入端的谐振

光减弱, EDFA 饱和程度减弱导致增益提高, 信号光输入有较大的增加后, 反馈光进一步减弱以至不能形成激光振荡, 所以可控范围减小。

同样, EDFA 开环时小信号增益很大,  $NF$  较小, 随信号光增强,  $P_{ASE}$  下降, 而 EDFA 饱和增益  $G$  下降幅度更快, 导致  $NF$  增大。EDFA 闭环时, 增益受控范围内, 整个 ASE 谱不随信号光的变化而变化,  $P_{ASE}$  与  $G$  恒定, 因与开环相比  $G$  压缩较大,  $NF$  在小信号时比开环时稍大且保持恒定。

图 3 和图 4 是分别将滤波器调谐在  $\lambda_r = 1545 \text{ nm}$  及  $\lambda_r = 1556 \text{ nm}$  时 AGCEDFA 的特性曲线, 各曲线的基本趋势与图 2 相同, 但相同损耗  $\beta$  下, 谐振波长不同, 信号光的增益压缩不同, 受控范围也不同。在 EDFA 增益带宽内, 对同样的  $\beta$ , 随谐振波长增长, 与该波长对应的铒离子受激辐射截面减小(如表 1), 从而信号光  $G$  压缩增大, EDFA 的 3 dB 饱和信号输入功率增大, 因此可控范围也增大。如图 2~4 所示,  $\beta = 20 \text{ dB}$  时, 可控范围逐渐变大, 最大输入信号功率分别为  $-23 \text{ dBm}$ ,  $-16 \text{ dBm}$ ,  $-7 \text{ dBm}$ 。从式(5)分析可得同样结果, 随谐振波长增加, EDFA 对该波长的吸收系数减小, 固有饱和功率增大, 信号光增益逐渐减小; 另外在三种谐振波长上, 增益受控期间  $NF$  基本相同, 这是因谐振光使 EDFA 深度饱和, ASE 谱受到谐振光控制的缘故。

关系充分说明了这一点;但信号光继续增大到破坏谐振时,信号输出将基本不随输入变化。图 6 是谐振光与信号光在 EDFA 总输出中所占的比例关系。增益受控时,谐振光在 AGCEDFA 总输出中占 90% 以上,远远大于信号光所占比例,信号光对谐振光的影响就如在谐振光上加一个微扰信号;并且谐振光波长越长所占比例越大。我们认为这是在谐振光波长上形成稳定谐振的必要条件。

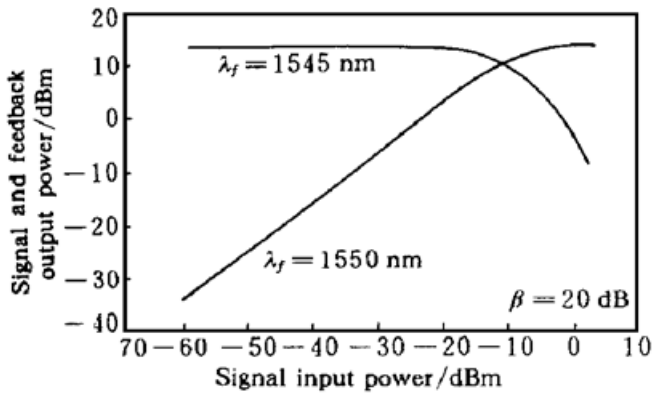


图 5 闭环 EDFA 的谐振光与信号光输出随输入信号功率的变化关系

Fig. 5 Feedback and signal output power of AGCEDFA

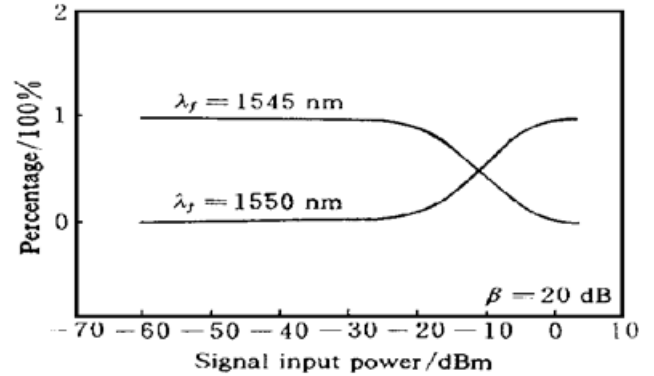


图 6 闭环 EDFA 的谐振光与信号光输出在总输出中的比例关系

Fig. 6 Percentage of feedback and signal in the AGCEDFA's total output

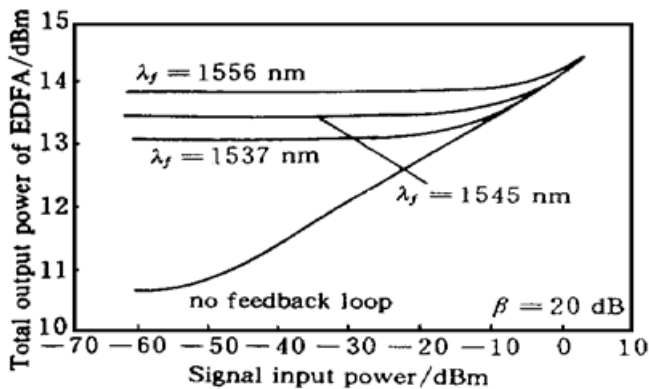


图 7 开环与闭环 EDFA 的总输出随输入信号变化关系

Fig. 7 Total output power of AGCEDFA with or without a feedback loop

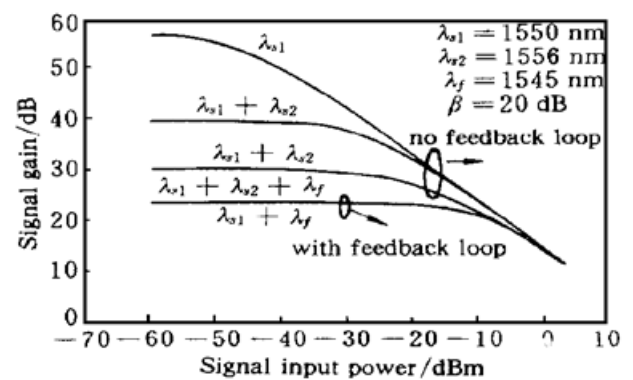


图 8 两个长波长信号输入开环与闭环 EDFA 时信号增益的相互影响

Fig. 8 Two signal input with and without a feedback loop

图 7 是 EDFA 在开环和闭环时总输出随信号光输入的变化关系。开环总输出随输入信号增加而增加;增益受控时,EDFA 的总输出不随信号光而变,信号光增大到破坏谐振时,EDFA 开环与闭环输出相同,因此图中曲线后半段重合。

### 2.3 多波长信号输入时增益与信号光输入功率的变化关系

图 8 是两个不同波长信号光输入开环和闭环 EDFA 的情况。目的是模拟 WDM 系统中一个信道的开关对其他信道增益的影响(开关频率小于 1 kHz),信号波长为  $\lambda_{s1} = 1550 \text{ nm}$  和  $\lambda_{s2} = 1556 \text{ nm}$ ,反馈光信号波长为  $\lambda_f = 1545 \text{ nm}$ ,  $\beta = 20 \text{ dB}$ 。图中上边的三条曲线是开环情况,第一条只有  $\lambda_{s1}$  输入,其初始输入功率为  $-60 \text{ dBm}$ ;第二,第三条为  $\lambda_{s1}$  与  $\lambda_{s2}$  同时输入,但  $\lambda_{s2}$  的功率不同,分别为  $-30 \text{ dBm}$  和  $-20 \text{ dBm}$  且保持不变,这两条曲线虽然都有一段平坦即  $\lambda_{s1}$  增益不变的部分,但不重合,这说明了,的增益随,功率变化而变化。而闭环时的两条曲线在平

坦部分重合充分说明了  $\lambda_{s2}$  功率变化对  $\lambda_{s1}$  的增益无影响, 这一特性可消除信道间的交叉饱和和串扰。

## 2.4 抽运光功率对信号增益的影响

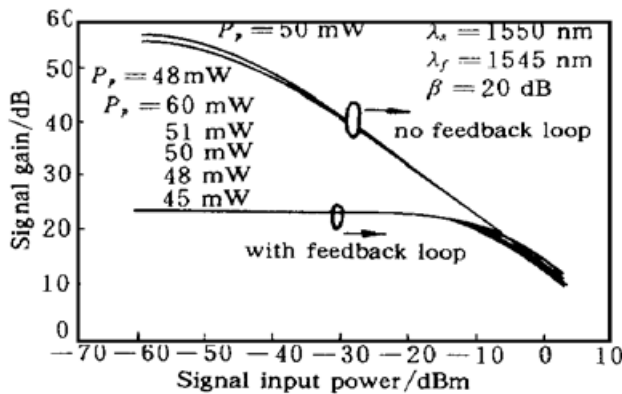


图9 不同抽运功率时开环与闭环 EDFA 的特性

Fig.9 Gain of EDFA with and without a feedback loop under different pump power

在上面的讨论中, 假定抽运功率不变, 但在实际应用中, 由于环境温度的影响或 LD 自身随时间的老化效应, 抽运功率将发生波动, 从而影响 EDFA 的增益。图 9 是不同抽运功率 ( $P_p$ ) 对开环和闭环 EDFA 增益的影响情况, 图中最上面的两条曲线分别对应开环时  $P_p = 50 \text{ mW}$ ,  $48 \text{ mW}$ , 可看出  $P_p$  不同信号光的  $G$  不同。下面五条曲线是闭环且  $P_p = 60 \text{ mW}$ ,  $51 \text{ mW}$ ,  $50 \text{ mW}$ ,  $48 \text{ mW}$ ,  $45 \text{ mW}$

时信号的增益, 各曲线在平坦部分重合, 说明相同的  $\beta$  下, 形成稳定谐振时, 铒离子反转程度受谐振光控制。由于 EDF 长度是  $P_p = 50 \text{ mW}$  时的最佳长度, 加大抽运功率对环路谐振几乎没有贡献; 抽运光稍有减小, 只要稳定激射存在, 只是增益受控范围有所减小, 但对信号光增益的影响可忽略不计。这一特性对 EDFA 远程监控方案之一的抽运源调制技术有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 K. Aida, K. Nakagawa. Pulsed lightwave frequency synthesizer system using an EDFA and AOD in fiber loop. *IEICE Trans. Commun.*, 1995, **E78-B**(5): 664~ 673
- 2 A. D. Ellis, R. M. Percival, A. Lord *et al.*. Automatic gain control in cascaded erbium doped fibre amplifier system. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(3): 193~ 195
- 3 J. F. Massicott, S. D. Willson, R. Wyatt *et al.*. 1480 nm pumped erbium doped fibre amplifier with all optical automatic gain control. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(12): 962~ 964
- 4 M. Zirngibl. Gain control in erbium doped fibre amplifier by an all-optical feedback loop. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(7): 560~ 561
- 5 A. Saleh, R. M. JoPson, J. D. Evankow *et al.*. Modeling of in erbium-doped fiber amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(10): 714~ 717
- 6 C. Randy Giles, E. Desurvire. Modeling of erbium-doped fiber amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2): 271~ 283

## Theoretic Analysis of Automatic Gain Control of Erbium Doped Fiber Amplifier

Chang Zhiwu Ning Jiping Ji Guoqin Yao Jianquan

(Tianjin University, Collage of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering,

Open Laboratory of Opto-electronics Information Engineering, National Education Committee, Tianjin 300072)

**Abstract** In this paper, a mathametical model of automatic gain control EDFA pumped by LD is set up using a ring-laser method. The principle and the characteristics of AGCEDFA are analysed and simulated.

**Key words** EDFA, automatic gain control, ring-laser method, noise figure