

文章编号 : 0253-2239(2002)03-0303-05

# 光纤放大器增益饱和对有源光纤环形腔 滤波特性的影响

钱景仁<sup>1)</sup> 罗家童<sup>1)</sup> 俞本立<sup>2)</sup>

(1), 中国科技大学电子工程与信息科学系, 合肥 230026)  
(2), 安徽大学物理系, 合肥 230039)

摘要: 从理论和实验两个方面研究了有源光纤环形腔滤波器输入光功率对光纤放大器增益的影响及由此引起的对有源光纤环形腔滤波特性的影响。在考虑上述影响的情况下, 对有源光纤环形腔滤波器参数的优化作了讨论。

关键词: 掺铒光纤放大器; 有源光纤环形腔滤波器; 光纤放大器增益饱和

中图分类号: TN25 文献标识码: A

## 1 引 言

光纤环形腔<sup>[1]</sup>由于其有类似于法布里-珀罗腔的特性, 结构简单, 制作方便, 可以获得较高的分辨率, 被广泛应用于光纤激光器<sup>[2]</sup>和光谱测量<sup>[3]</sup>。已有的分析表明, 环形腔的精细度主要由腔内的损耗决定, 因此在光纤环形腔中加入掺铒光纤放大器(EDFA)就能够补偿腔内光学元件的插损和环形腔本身的损耗<sup>[4]</sup>, 通过调节掺铒光纤放大器的增益, 使腔工作在接近产生激光的阈值点处, 光纤环形腔就可获得很高的精细度。

有源光纤环形腔的一个重要的应用是利用它的滤波特性实现单频窄线宽的光输出, 其原理是利用分布反馈式半导体激光器(DFB)所具有的稳定的中心频率, 将分布反馈式半导体激光器的光注入腔中, 通过掺铒光纤放大器的增益作用使环形腔工作在高精细度状态, 这时输入光将被滤波, 从而得到比分布反馈式半导体激光更窄的光输出, 同时可以避免光纤环形腔激光器容易跳模的缺点, 有望实现小范围的频率控制<sup>[5]</sup>。

然而实际上, 环形腔滤波器内的掺铒光纤放大器在对信号光进行放大的同时会产生自发辐射光, 先达到寄生振荡的条件, 有源光纤环形腔滤波器转化成了光纤环形腔激光器, 因此通常都要在环形腔内加入一个窄带滤波器以避免产生寄生振荡。通常有一种误解认为在给定抽运功率情况下环形腔内的掺铒光纤放大器的增益保持不变, 但是实际上在大的

信号光功率注入环形腔时会使腔内的掺铒光纤放大器产生饱和, 从而对输出频谱产生严重的影响。这是因为在掺铒光纤放大器中, 当注入抽运光功率后, 输入信号光将得到放大, 同时也将产生部分自发辐射光, 这两种光都消耗上能级的铒离子, 在抽运光功率足够大而信号光与自发辐射光很弱时, 上下能级的粒子数反转度很高, 并可认为沿着掺铒光纤长度方向上能级粒子数保持不变, 随着信号光功率的增大, 放大器的增益维持不变, 这是我們所需要的情況, 当在给定输入抽运光功率时, 随着输入信号光功率以及自发辐射光的增大, 上能级铒离子数逐渐减少, 增益将不能维持初始不变, 并逐渐下降, 这时放大器进入饱和和工作状态, 增益产生饱和。在环形腔中掺铒光纤放大器这一饱和现象由于环形腔的谐振现象而更为突出, 这一点往往被人忽视。

本文首先在实验上研究了较低抽运功率注入条件下大的光功率注入和小的光功率注入时有源光纤环形腔滤波器的输出频谱。大的光功率注入使环形腔滤波器内的光纤放大器产生增益饱和, 环形腔的精细度明显降低, 环形腔的滤波特性不是很明显, 这和较低抽运功率注入时的效果是一样的。其次, 通过引入掺铒光纤放大系统的原子速率方程结合多光束相干理论, 得到了环形腔滤波器的输出频谱密度函数, 进而考虑在放大器的增益饱和时研究如何对环形腔参数进行优化, 以得到良好的滤波特性。

## 2 实 验

有源光纤环形腔滤波器的实验结构如图 1 所

示。抽运光为 980 nm 半导体激光器输出,输入光源线宽约 5.6 MHz、中心波长 1534 nm 的分布反馈式半导体激光器;偏振控制器用来控制腔内偏振状态;WDM 为 980 nm/1534 nm 的波分复用器; $C_1$  和  $C_2$  分别是输入、输出耦合器, $C_3$  和  $C_4$  均为 3 dB 耦合器。整个环形腔的腔长约为 16 m,其中掺铒光纤的长度为 9 m。为防止温度等环境因素的干扰,整个实验装置放置在泡沫塑料盒中。在实验中光谱测量用 HP71451B 光谱分析仪,输入输出光线宽的测量采用零差拍频法<sup>[6]</sup>,其中光纤延时线的长度为 12 km,光电接收器的频宽为 50 MHz,频谱分析仪为 HP8591B。

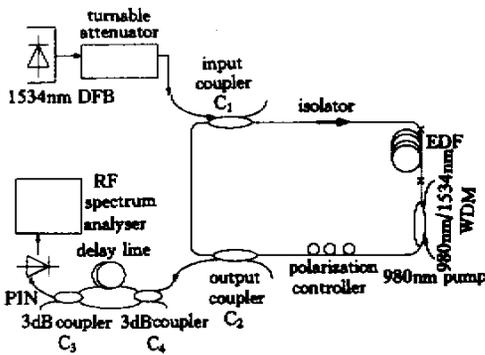


Fig. 1 Experimental setup of active fiber ring resonator filter

对于图 1 中的有源光纤环形腔滤波器来说,在获得更窄线宽的同时往往还要求有较大功率的输出,这就需要在腔内加入窄带滤波器并对环形腔参数进行优化<sup>[7]</sup>。通常产生一种误解,即认为,在环形腔参数和注入抽运功率不变的情况下,提高输入信号光功率,就可以提高腔输出功率,而环形腔精细度不变(即光放大器增益不变)。但是实验中我们发现,当提高输入信号光功率到一定值后,环形腔的精细度反而下降,这说明腔内光放大器的增益下降了。本实验为了更加突出输入信号功率导致环形腔内掺铒光纤放大器的增益饱和现象对输出频谱的影响,腔内并没有加入窄带滤波器,这时认为腔内的自发辐射光功率不变,掺铒光纤放大器增益的变化均由输入功率的变化引起,在实验中仔细调整抽运功率使环形腔工作在阈值以下,否则在有寄生激光的情况下,当注入信号光时,就会产生注入锁定问题,所测量的环形腔输出线宽就不准确。

实验中当不加入信号光时,有源光纤环形腔产生激光的阈值抽运电流为 18.7 mA(即抽运功率为 4.68 mW)。调整抽运驱动电流在阈值以下,为 18.5 mA(此时抽运功率为 4.56 mW),输入信号光

功率为 800  $\mu$ W,调节环形腔前的衰减器改变注入信号光功率,在小信号光功率和大信号光功率注入时所测得的环形腔输出频谱分别如图 2、图 3 所示。图中主峰是采用零差拍频法测量时产生的零频分量,并测得输出线宽分别为 750 kHz,1.1 MHz。

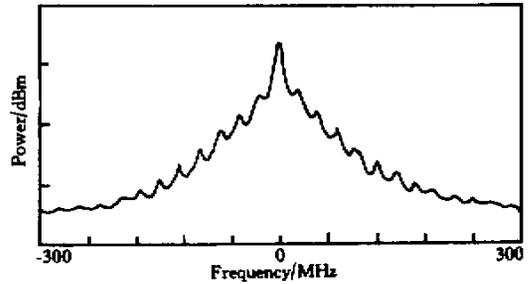


Fig. 2 Output spectrum (low power input signal, injected pumped current :18.5 mA)

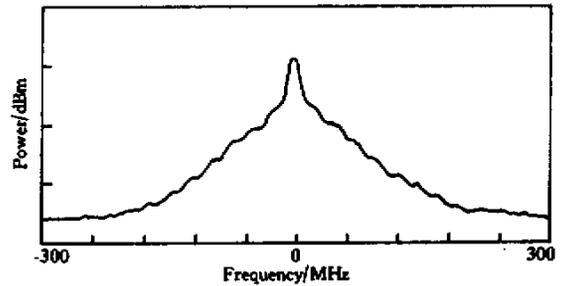


Fig. 3 Output spectrum (high power input signal, injected pump current :18.5 mA)

图 2 和图 3 相比较可以明显地看出小信号注入时有很多小边峰,并且小边峰的距离为环形腔自由谱宽(FSR)(如图 4)。若定义:压缩比=输入线宽/输出线宽,则显然压缩比和环形腔精细度有近似的正比关系,此时小信号和大信号输入时的压缩比分别为 7.5、5.1,可见小信号输入时环形腔频率滤波效应比较明显。当降低抽运驱动电流为 17.9 mA(此时抽运光功率为 4.18 mW)时,保持环形腔输入小信号光功率,测得的输出频谱如图 5,输出线宽为

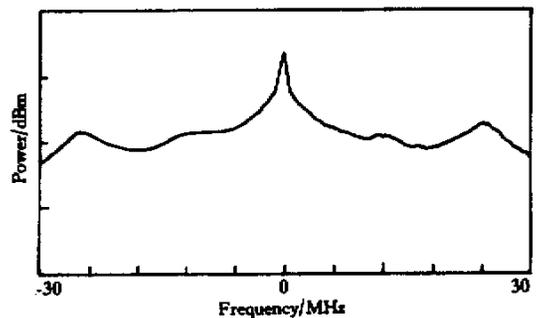


Fig. 4 Output spectrum.(low power input signal, injected pump current :18.5 mA)

1.6 MHz, 即压缩比为 3.5。由于降低了抽运功率, 掺铒光纤放大器增益饱和值比较低, 故和图 2 相比, 图 5 滤波效应不明显。因此大信号光功率注入和较低的抽运功率注入效果是一样的, 都是降低了环形腔的精细度。

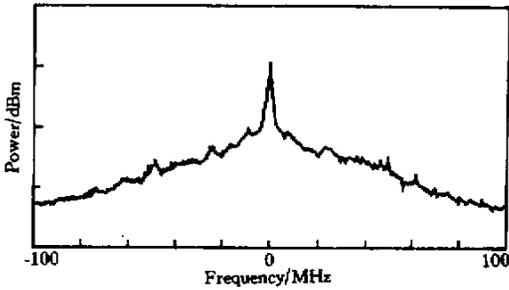


Fig. 5 Output spectrum. (high power input signal, injected pump current :17.9 mA)

### 3 分 析

已经有很多模型对掺铒光纤放大系统机理进行分析。为简单起见, 本文采用二能级结构的速率方程对掺铒光纤放大器的增益饱和现象进行分析<sup>[8]</sup>, 在分析中不考虑自发辐射光对放大器饱和的影响, 这在实际中由于在腔内加入了滤波器, 因此认为是合理的, 并不会影响到计算结果的正确性。

相应的速率方程为

$$\frac{dN_2}{dt} = (R_{12} + W_{12})N_1 - (R_{21} + W_{21})N_2 - N_2/\tau, \quad (1a)$$

$$N_1 + N_2 = N_t, \quad (1b)$$

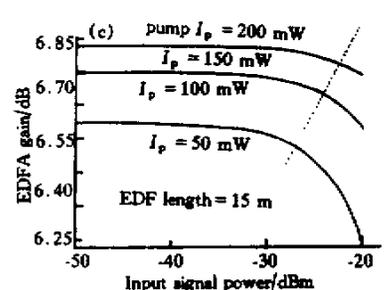
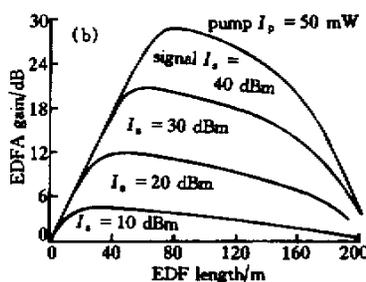
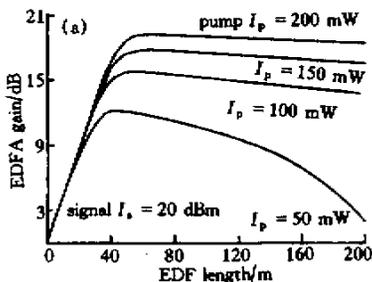


Fig. 6 EDFA gain characteristics

有源光纤环形腔滤波器的结构如图 7 所示, 主要由输入耦合器、输出耦合器和掺铒光纤放大器三部分组成。

设入射光为一单纵模激光, 即是振幅稳定, 有随机相位扰动的准单色电磁场:

$$E_{in}(t) = E_0 \exp\{-j[\omega_0 t + \varphi(t)]\}, \quad (4)$$

式中  $N_2$ 、 $N_1$  为上、下能级的粒子数,  $N_t$  为粒子总数,  $\tau$  为荧光寿命,  $R_{12}$ 、 $R_{21}$  分别为抽运的受激吸收与受激辐射率,  $W_{12}$ 、 $W_{21}$  分别为信号的受激吸收与受激辐射率。

由(1)式可以得到后向抽运方案中单抽运单波长信号放大情形下, 放大器增益与输入功率、抽运功率和掺铒光纤长度的关系式:

$$\ln G_s = -\alpha_s L + p_s^{\text{in}}(1 - G_s) +$$

$$\frac{p_p^{\text{in}}}{D} [1 - \exp(D \ln G_s + D \alpha_s L - \alpha_p L)] \quad (2)$$

上式中如果输入信号光功率很小, 对其进行简化, 可以得到小信号增益的关系式:

$$\ln G_s = -\alpha_s L +$$

$$\frac{p_p^{\text{in}}}{D} [1 - \exp(D \ln G_s + D \alpha_s L - \alpha_p L)] \quad (3)$$

其中  $G_s$  表示信号增益,  $L$  表示掺铒光纤长度,  $\alpha_s$ 、 $\alpha_p$  分别表示信号光和抽运光的铒掺杂吸收系数,  $p_s^{\text{in}}$ 、 $p_p^{\text{in}}$  分别表示归一化的输入信号光、输入抽运光功率,  $D = (1 + \eta_p) \alpha_p / [(1 + \eta_s) \alpha_s]$ ,  $\eta_s$ 、 $\eta_p$  为波长  $\lambda_s$ 、 $\lambda_p$  的唯像截面比。

根据(2)式计算的不同抽运功率下光放大器增益与输入信号光功率、掺铒光纤长度的关系以及在不同信号功率下放大器增益和掺铒光纤长度的关系分别如图 6(a) 图 6(b) 和图 6(c) 所示。从图 6(c) 虚线中可以看到随着抽运功率的增大, 保持小信号增益的输入信号功率也随着增大。因此我们可以在确定保持小信号增益的输入信号功率后, 从(2)式得到一个最佳的掺铒光纤长度。

式中  $E_0$  为振幅,  $\omega_0$  为该准单色电磁场的平均角频率,  $\varphi(t)$  为相位的随机波动, 由此可确定该激光的谱分布和线宽。由环形腔多光束干涉理论得到环形腔输出的光波场和腔内掺铒光纤放大器前的光功率分别为<sup>[9]</sup>

$$E_2(t) = [k_1 k_2 (1 - \gamma_1)(1 - \gamma_2)]^{1/2} E_0 \exp(-j\omega_0 t) G_s^{1/2}(p_s^{\text{in}}) \times \sum_{n=0}^{\infty} [A G_s^{1/2}(p_s^{\text{in}}) \exp(j\omega_0 \tau_0)]^n \exp[-j\varphi(t - n\tau_0)], \quad (5)$$

$$p_s^{\text{in}} = \frac{1 - A^2 \delta^2 G_s(p_s^{\text{in}})}{1 + A^2 \delta^2 G_s(p_s^{\text{in}}) - 2A\delta G_s^{1/2}(p_s^{\text{in}}) \cos(\omega_0 \tau_0)} |E_0|, \quad (6)$$

式中

$A = [(1 - \gamma_1)(1 - \gamma_2)(1 - k_1) \exp(-2\alpha l)]^{1/2}$  称为环形腔损耗因子,

$\delta = \exp\{-[\varphi(t) - \varphi(t - \tau_0)]\} = \exp(-\gamma\tau_0)$  为输入光源线宽对腔功率的影响<sup>[9]</sup>,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  分别表示输入输出耦合器的耦合比和插入损耗,  $\alpha$  为光纤的衰减系数,  $l$  为光纤环形腔的腔长,  $\tau_0 = 1/\text{FSR} = nl/c$  为环形腔的延时时间,  $G_s$  为腔内的掺铒光纤放大器增益, 与环形腔内掺铒光纤放大器前的光功率  $p_s^{\text{in}}$  有关, 可联合(2)式和(6)式解得, 并且通过(6)式可确定掺铒光纤放大器保持小信号增益时的最大输入信号功率。

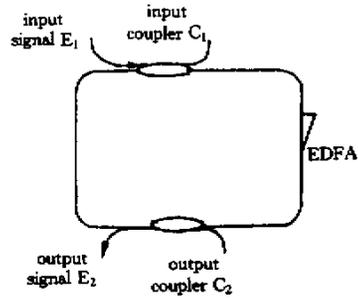


Fig. 7 Schematic setup of active fiber ring resonator

根据维格纳-辛钦公式, 对(5)式的自相关函数进行傅里叶变换可得输出光场谱密度函数为<sup>[6,10]</sup>:

$$S_0(\omega) = [k_1 k_2 (1 - \gamma_1)(1 - \gamma_2)] |E_0|^2 G_s(p_s^{\text{in}}) \times \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} [A \exp(-j\omega\tau_0) G_s^{1/2}(p_s^{\text{in}})]^m [A \exp(j\omega\tau_0) G_s^{1/2}(p_s^{\text{in}})]^n S_1(\omega) = \frac{k_1 k_2 (1 - \gamma_1)(1 - \gamma_2) G_s(p_s^{\text{in}}) |E_0|^2}{1 + A^2 G_s(p_s^{\text{in}}) - 2A G_s^{1/2}(p_s^{\text{in}}) \cos(\omega\tau_0)} S_1(\omega), \quad (7)$$

式中,  $S_1(\omega)$  为输入信号光谱密度函数。

上式表示了输出光谱和输入光谱以及环形腔的谐振特性的关系, 它表明环形腔具有频率滤波特性。根据(7)式计算得到的大的注入信号光功率引起掺铒光纤放大器增益饱和时的环形腔输出频谱, 和没有饱和现象的小信号增益(即  $G_s$  保持不变与注

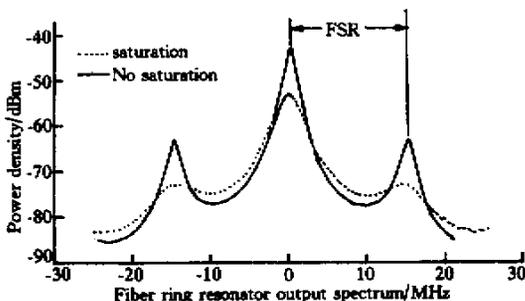


Fig. 8 Output spectrum of active fiber ring resonator. Input signal linewidth: 3 MHz; EDF length: 15 m; input pump power 2 mW

入信号光功率无关)情况下的输出频谱, 如图 8 所示, 从图中可计算出这两种情况下环形腔滤波器的压缩比分别为 1.71、13.6。因此在掺铒光纤放大器产生增益饱和时, 环形腔精细度明显降低, 环形腔滤波器滤波效应减弱。

## 4 讨 论

为了获得更窄线宽的同时有较大功率的光输出, 有必要对有源光纤环形腔滤波器进行优化。环形腔优化的关键是选择掺铒光纤放大器的参数, 由于掺铒光纤放大器增益与掺铒光纤的长度、铒离子掺杂浓度和抽运功率有关, 还和环形腔的工作状态有关, 因此实际优化时在腔内加入窄带滤波器以减少自发辐射光后, 还要考虑输入光源线宽和功率等因素的影响, 确定掺铒光纤放大器能保持小信号增益的最大注入信号光功率, 才能确定掺铒光纤放大器的参数和输入输出耦合器耦合比。

从(7)式中,我们知道要得到更窄线宽的环形腔输出光,可以通过提高光放大器的增益来补偿环形腔的损耗,或者在给定放大器增益的情况下,改变输入输出耦合器耦合比,使环形腔损耗因子 $A$ 与光放大器增益 $G_s$ 的乘积接近1;为了提高腔输出功率,可以提高输入功率 $|E_0|^2$ 和输入输出耦合器耦合比 $k_1, k_2$ ,并使环形腔工作在谐振状态下。另外,提高输入输出耦合比,就要增大抽运功率,从图6(c)我们知道,这也增大了保持小信号增益的最大输入信号光功率,即降低了增益饱和的影响。当考虑到掺铒光纤放大器的饱和增益时,从(6)式可知,提高了输入功率 $|E_0|^2$ 和输入耦合器耦合比 $k_1$ 并且环形腔工作在谐振状态时,也使掺铒光纤放大器输入光功率增大,更容易使掺铒光纤放大器产生增益饱和,但从(6)式也可以看到当输入信号线宽比较宽时,通过 $\delta$ 因子,环形腔的谐振特性对功率的影响减少。

因此实际中的有源光纤环形腔滤波器,为了减少掺铒光纤放大器增益饱和的影响和提高输入信号功率域值,应该使用小耦合比的输入耦合器,大耦合比的输出耦合器,以在获得窄线宽输出光的同时提高输出功率。并通过锁定电路使环形腔工作在谐振状态上,使环形腔输出信噪比最大。不考虑掺铒光纤放大器工作状态的变化而对环形腔滤波器的优化<sup>[11]</sup>仅仅当输入信号很弱时才是正确的。

**结论** 大功率输入光注入有源环形腔滤波器时会使环形腔内的掺铒光纤放大器产生增益饱和现象,从而严重影响滤波器输出光频谱。因此在对环形腔滤波器进行优化时,要考虑到输入光功率对环形腔内掺铒光纤放大器增益的影响后,选择合适的参数,才

能在得到更窄线宽的同时也有较大功率的光输出。

## 参 考 文 献

- [1] Stokes L F, Chodorow M, Shaw H J. All-single-mode fiber resonator. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(6):288~290
- [2] Iwatsuki K, Okamuro H, Saruwatari M. Wavelength-tunable single-frequency and single-polarization Er-doped fibre ring laser with 1.4 kHz linewidth. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(24):2033~2034
- [3] Kalli K, Jackson D A. Ring resonator optical spectrum analyzer with 20 kHz resolution. *Opt. Lett.*, 1992, **11**(15):1090~1092
- [4] Okamura H, Iwatsuki K. A finesse-enhanced Er-doped-fiber ring resonator. *IEEE J. Lightwave Technology*, 1991, **9**(11):1554~1560
- [5] Qian Jingren, Chen Ming, Yu Benli. Active optical fiber ring resonator filters. *J. China University of Science and Technology*, 2000, **30**(1):69~72
- [6] Gallion P B, Debarge G. Quantum phase noise and field correlation in single frequency semiconductor laser system. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **QE-20**(4):343~349
- [7] Yu Benli, Qian Jingren, Luo Jiatong *et al.*. Optimization of active optical fiber ring resonator filter. *Chinese J. Quant. Electron.*, 2001, **18**(2):114~117
- [8] Saleh A A M, Jopson R M, Evankow J D *et al.*. Modeling of gain in erbium-doped fiber amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1990, **2**(10):714~717
- [9] Hu Zhongfu, Qian Jingren Shen Huiming. Light source effects on effective finesse of a fiber-optic ring resonator. *J. Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(5):609~613
- [10] Guttner A, Welling H, Gericke K H *et al.*. Fine structure of the field autocorrelation function of a laser in the threshold region. *Phys. Rev. Lett.*, 1978, **(A18)**:1157~1168
- [11] Chew Y H, Tjhung T T, Mendis F V C. An optical filter of adjustable finesse using an amplified ring resonator. *IEEE J. Lightwave Technology*, 1997, **15**(2):364~370

## The Effect of EDFA Saturation on the Frequency Filtering Characteristic of Active Fiber Ring Resonator

Qian Jingren<sup>1)</sup> Luo Jiatong<sup>1)</sup> Yu Benli<sup>2)</sup>

(1), Department of EEIS, University of Science and Technology of China, Hefei 230026 )  
(2), Department of Physics, Anhui University, Hefei 230039 )

(Received 12 March 2001; revised 18 May 2001)

**Abstract:** The effect of Er-doped fiber amplifier (EDFA) saturation on the frequency filtering characteristic of active fiber ring resonator is studied theoretically and experimentally, when a high input power signal is injected and EDFA saturation is induced. The optimization of active fiber ring resonator is discussed considering the effect of EDFA saturation.

**Key words:** Er-doped fiber amplifier; active fiber ring resonator filter; optical fiber amplifier saturation