

# 长周期光纤光栅光谱控制及其在 EDFA 增益平坦中的应用\*

姜莉 张东生 袁树忠 董孝义

(南开大学现代光学研究所,天津 300071)

**摘要** 从理论上分析了长周期光纤光栅光谱的控制方法,并且进行了实验研究.结果表明,选择合适周期的振幅模板,通过控制曝光量和光栅长度,可以实现对长周期光纤光栅的中心波长、峰值和带宽的控制.用此技术制作的四个不同中心波长、峰值和带宽的长周期光纤光栅级联,实现了 EDFA 在 35.6 nm 范围内增益波动小于 ±0.6 dB.

**关键词** 长周期光纤光栅;谐振波长;带宽;增益平坦

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A

## 0 引言

实现 EDFA 的增益平坦基本有两种方法<sup>[1]</sup>:一种是改进掺铒光纤的材料特性;另一种就是设计出光谱特性与 EDFA 的增益谱相反的滤波器.长周期光纤光栅周期达几百微米,可以实现前向传输的纤芯模与同向传输的各阶次包层模之间的耦合,是一种理想的波长选择带阻滤波器,在光纤通信和光纤传感等领域有着广泛的应用前景<sup>[2~4]</sup>.长周期光纤光栅具有制作简单、成本低、插入损耗小、无后向反射、与偏振无关等优点,因而长周期光纤光栅是实现 EDFA 增益平坦的理想器件<sup>[5~7]</sup>.由于 EDFA 的增益谱的谱形复杂,实现增益平坦常常需要几个长周期光栅的级联,这几个长周期光栅一般具有不同的中心波长,损耗峰值和带宽.长周期光栅的这些特性参数可以通过选用不同周期的振幅模板、控制曝光量和光栅长度来改变.

本文从理论上分析了长周期光纤光栅谐振波长和带宽与模板周期、曝光量和光栅长度的变化关系,并进行了实验研究.在此基础上进行了 EDFA 增益平坦化实验,根据数值模拟把 EDFA 增益谱分解为四个高斯函数.通过选择模板周期,恰当控制曝光量和光栅长度,得到的四个长周期光纤光栅的透射谱分别与上述四个高斯函数吻合.这样四个长周期光纤光栅级联后,得到的总透射谱与 EDFA 增益谱均衡.实验中,我们实现了 EDFA 在 35.6 nm 范围内的增益平坦,平坦度小于 ±0.6 dB.

## 1 理论分析

长周期光纤光栅的谐振波长不仅与模板周期有

关,而且还和曝光量有关.根据色心模型<sup>[8]</sup>和 Kramers-Kronig 原理,得到长周期光纤光栅的谐振波长与曝光量的变化关系为<sup>[9]</sup>

$$\lambda = \lambda_c + \frac{\Lambda}{1 + \chi} [\Delta n_{\max} - \Delta n_{\max 1} \exp(-A_1 t) - \Delta n_{\max 2} \exp(-A_2 t)] \quad (1)$$

式中  $\Lambda$  为光栅周期,  $\chi$  为振幅模板的占空比,  $I$  为光强,  $t$  为曝光时间,  $\Delta n_{\max}$ 、 $\Delta n_{\max 1}$ 、 $\Delta n_{\max 2}$ 、 $A_1$  和  $A_2$  为与光纤光敏特性有关的量.  $\lambda_c = (n_{co} - n_{cl})\Lambda$ , 其中  $n_{co}$  和  $n_{cl}$  为芯模和包层模的有效折射率.由式(1)知,长周期光纤光栅的中心谐振波长随曝光量的增加向长波方向移动,并且按多项e负指数之和规律变化.

由耦合模理论可得长周期光栅的带宽(主谐振峰两侧两个损耗零点之间的宽度)表达式为<sup>[10]</sup>

$$\Delta\lambda = \frac{2\lambda\Lambda}{L} \sqrt{1 - \left(\frac{KL}{\pi}\right)^2} \quad (KL < \pi) \quad (2)$$

式中,  $L$  为光栅长度,  $K$  为耦合系数.由式(2)可见,光栅长度越长,即光栅上折射率调制条纹越多,则光栅的带宽越窄.因而通过控制光栅的写入长度可以获得不同带宽的长周期光栅.

## 2 实验

长周期光纤光栅的写入装置如图1所示.光敏光纤安装在一个由步进电机控制的光纤座上,振幅模板与光纤座固定,模板与光纤座可由步进电机控制一起左右移动.由 KrF 准分子激光器发出的 248 nm 紫外光经柱面镜聚焦后,通过狭缝对去掉涂敷层的裸光纤进行曝光,每次曝光后,步进电机将光纤座移动一个狭缝的距离,通过步进电机的移动次数来控制光栅的长度.宽带光源(BBS)采用掺铒光纤放大器的自发辐射谱,带宽为 100 nm;写入过程中,光栅的生长情况由光谱仪(OSA)进行实时监控.实验中,紫外光脉冲能量设定为 70 mJ,重复频率为 25 Hz,

\*天津市重点基金项目(编号:013800411)

Tel:022-23509849 Email:jiangliyea@eyou.com

收稿日期:2003-06-30

且所用的长周期模板均为我们自行设计加工.

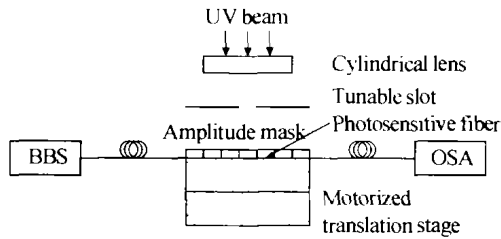


图 1 实验装置  
Fig. 1 Experimental setup

### 2.1 长周期光纤光栅谐振波长的控制

图 2(a)是用周期为 0.272 mm、占空比为 1:1 的振幅模板,狭缝宽度为 1.8 mm,在光敏光纤同一位置分别曝光 400 和 500 个脉冲后得到的长周期光纤光栅的透射谱. 图中显示出曝光从 400 个脉冲增加到 500 的脉冲后,光谱向长波方向移动 3.4 nm,同时峰值增长 0.55 dB;图 2(b)给出了实验测得的谐振波长随曝光量的变化关系曲线,与理论结果相符. 所以要想同时控制谐振波长和峰值,就要对模板周期和曝光量进行匹配选择. 因此,只有通过选择合适周期的模板和恰当的控制曝光,才可以达到同时控制中心波长和透射谱峰值的目的.

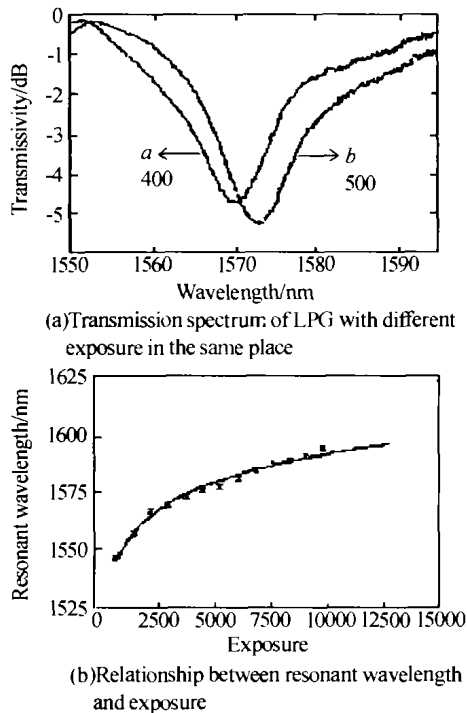
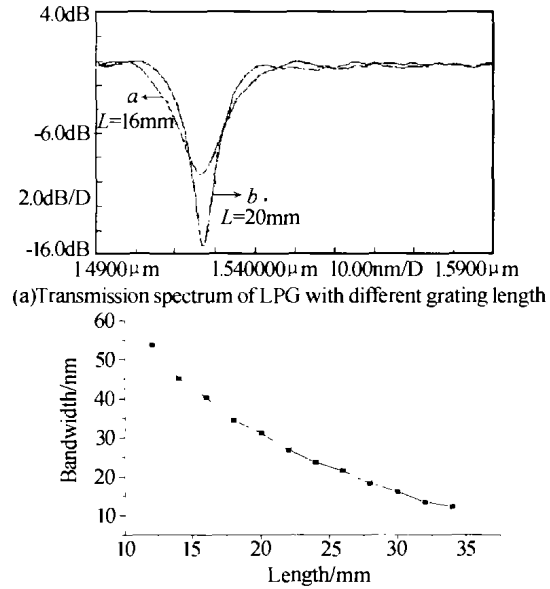


图 2 长周期光栅谐振波长控制  
Fig. 2 Resonant wavelength controlling of LPG

### 2.2 长周期光纤光栅的带宽控制

我们用周期为 0.23 mm、占空比为 1:1 的振幅模板,进行了长周期光纤光栅带宽的控制实验. 实验中,狭缝宽度取为 2 mm,用来控制曝光的长度;由步进电机控制的光纤和模板沿光纤方向移动,每次移动 2 mm,每移动 2 mm 曝光 2000 个脉冲,由此可以得到不同长度的长周期光纤光栅. 图 3(a) 给出

了光栅长度分别为 16 mm 和 20 mm 时,光纤光栅的透射谱;图 3(b) 给出了实验测得的带宽与光栅长度关系曲线. 可见光栅越长,带宽越窄,而中心波长不变. 同时,在一定的曝光范围内,光栅越长,光栅透射谱峰值越大.



(a)Transmission spectrum of LPG with different grating length

(b)Relationship between bandwidth and grating length

图 3 长周期光栅带宽控制  
Fig. 3 Bandwidth controlling of LPGs

### 3 EDFA 增益平坦器件的设计与研制

我们自行制作的 EDFA 的增益谱如图 4 所示. 经过数值模拟,把 EDFA 的增益谱分解为四个高斯函数,如图 5 所示. 由此得出要实现该增益谱的平坦化,需要连接 4 个不同的长周期光栅(这里 4 个长周期光栅的级联为非关联级联). 它们的峰值损耗分别为 6.68 dB、6.93 dB、2.935 dB 和 1.364 dB,峰值波长为 1528.95 nm、1532.00 nm、1543.32 nm 和 1554.39 nm,带宽为 24 nm、24 nm、35 nm、和 26 nm. 根据这些特性参数,我们选择的模板周期分别为 0.319 mm、0.319 mm、0.362 mm 和 0.272 mm,控制合适的曝光量和适当的光栅长度,最后得到了 4 个长周期光栅,它们的峰值损耗分别为 6.70 dB、7.00 dB、2.9 dB 和 1.3 dB,峰值波长为 1528.8 nm、1532 nm、1543.4 nm 和 1554.4 nm,带宽为 24 nm、22.8 nm、32 nm 和 25 nm. 透射谱如图 6(a-d),其中  $\lambda_c$ 、 $P_K$ 、 $\Delta\lambda$  分别为峰值波长、峰值损耗、带宽. 我们把这四个光栅级联,得到的总透射谱与 EDFA 增益谱达到均衡,获得了从 1525.2 nm 到 1560.8 nm,总共 35.6 nm 范围内的增益平坦,平坦度达到  $\pm 0.6$  dB. 图 7 为这四个光栅级联后的透射谱. 图 8 是经过平坦后的 EDFA 增益谱. 由于所写光栅均已经过退火处理,因而具有较好的稳定性.

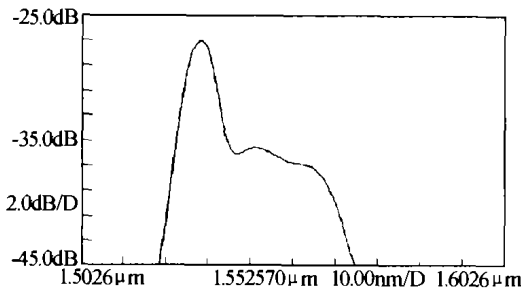


图4 EDFA 的增益谱  
Fig. 4 Gain spectrum for EDFA

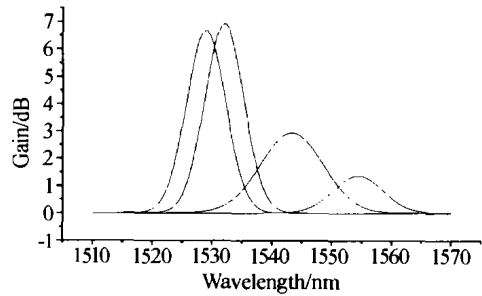


图5 数值模拟所得的4个高斯函数  
Fig. 5 Four Gaussians from numerical simulation

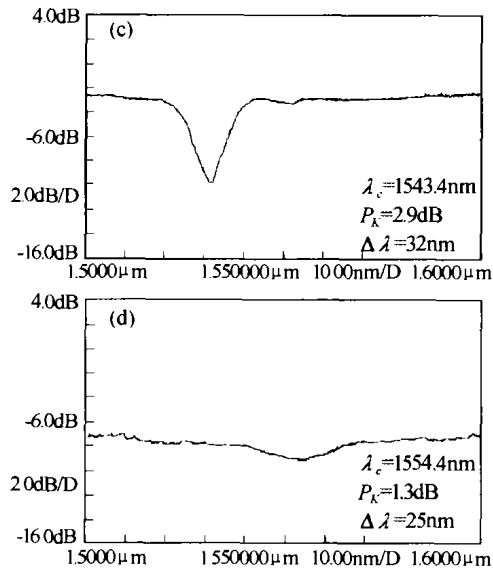
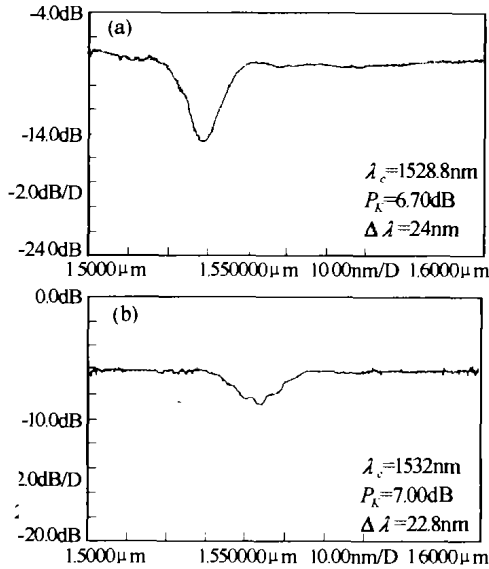


图6 通过控制光谱结构所得的4个长周期光栅的透射谱

Fig. 6 Transmission spectrum of the four LPGs through controlling spectral structure

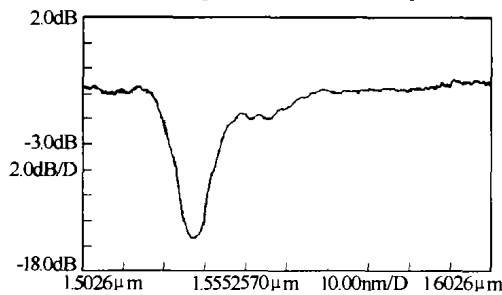


图7 长周期光栅级联后的透射谱  
Fig. 7 Transmission spectrum of cascade LPG

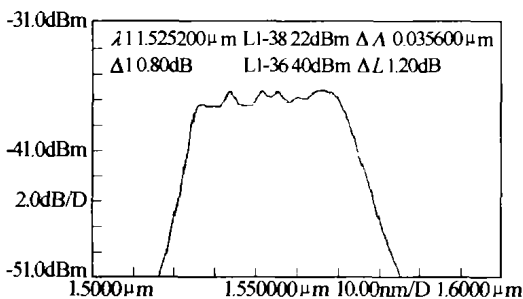


图8 长周期光栅平坦后的EDFA增益谱  
Fig. 8 Flattened spectrum for EDFA

宽随光栅长度的增加而减小. 实验结果与理论分析一致. 在此基础上,通过选择合适的模板周期、曝光量和光栅长度实现了对长周期光栅透射谱的控制. 得到的4个不同的长周期光栅应用于EDFA增益平坦实验,获得了带宽35.6 nm,增益波动±0.6 dB的宽带EDFA.

参考文献

- 1 Qian J R, Chen H F. Gain flattening fibre filters using phase-shifted long period fibre gratings. *Electron Lett*, 1998, **34**(11):1132 ~ 1122
- 2 Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, et al. Long-period fiber gratings as band-rejection filters. *J Lightwave Technol*, 1996, **14**(1):58 ~ 65
- 3 Bhatia V, Vengsarkar A M. Optical fiber long-period grating sensors. *Opt Lett*, 1996, **21**(9):692 ~ 694
- 4 Gu X J. Wavelength-division multiplexing isolation fiber filter and light source using cascaded long-period fiber gratings. *Opt Lett*, 1998, **23**(7):509 ~ 510
- 5 Wysocki P F, Judkins J B, Espindola R P, et al. Broad-band Erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period grating filter. *IEEE Photon Technol Lett*, 1997, **9**(10):1343 ~ 1345
- 6 Vengsarkar A M, Pedrazzani J R, Judkins J B, et al. Long-period fiber-grating-based gain equalizers. *Opt Lett*, 1996, **21**

4 结论

本文从理论上分析了长周期光纤光栅透射谱与模板周期、曝光量和光栅长度的关系,得出长周期光纤光栅的中心谐振波长随曝光量的增加向长波方向移动,并且按多项 e 负指数之和规律变化;光栅的带

- (5);336 ~ 338
- 7 Michiko Harumoto, Masakazu Shigehara, Hiroshi Suganuma. Gain flattening filter using long-period fiber gratings. *J Lightwave Technol*, 2002, **20**(6):1027 ~ 1032
- 8 Hand D P, Russell P St J. Photoinduced refractive-index changes in germanosilicate fibers. *Opt Lett*, 1990, **15**(2):102 ~ 104
- 9 张东生, 姜莉, 张伟刚, 等. 长周期光纤光栅谐振波长与曝光量变化关系的研究. *物理学报*, 2003, **52**(12):3087 ~ 3091
- Zhang D S, Jiang L, Zhang W *et al. Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(12):3087 ~ 3091
- 10 陈根祥, 刘春宁, 李唐军, 等. 长周期光纤光栅的研究. *光学学报*, 2000, **20**(5):624 ~ 628
- Chen G X, Liu C N, Li T J, *et al. Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5):624 ~ 628

## Control of LPG's Spectral Structure and Its Application in EDFA Gain-flattening Equalizer

Jiang Li, Zhang Dongsheng, Yuan Shuzhong, Dong Xiaoyi

*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*

Received date:2003-06-30

**Abstract** The spectral structure of long period gratings (LPGs) and its controlling methods are examined theoretically and experimentally. Through selecting mask with proper period, controlling the UV exposure and changing the length of the grating, the resonant wavelength, transmission peak and bandwidth of the LPG can be controlled. Using this technique, four different LPGs are fabricated and a gain-flattened EDFA with a gain variation of  $\pm 0.6$  dB over a bandwidth of 36.5 nm is achieved.

**Keywords** Long period gratings (LPGs); Resonant wavelength; Bandwidth; Gain flattening



**Jiang Li** was born in 1976, in Jiangsu, China. She received the M. S. degree in physics from Suzhou University, in 1999. She is currently pursuing the Ph. D. degree in Institute of Modern Optics, Nankai University. Her current research interest is in the field of fiber gratings and devices.