

文章编号: 0258-7025(2004)07-0829-04

# L 波段掺铒光纤放大器的增益 平坦滤波器设计

黄力群<sup>1</sup>, 王 里<sup>1</sup>, 王 智<sup>1</sup>, 黄卫平<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044; <sup>2</sup> Electrical and Computer Engineering Dept. McMaster Univ. CA)

**摘要** EDFA 的增益平坦化是 WDM 系统中的重要问题, 用成本低、插损小的光纤光栅实现该功能是一项有吸引力的方案, 采用剥层法设计了基于啁啾光栅的增益平坦滤波器。基于时间因果律的剥层算法将光纤光栅看成一个分离的模型, 由一系列长度为  $\Delta$  的复反射器所组成, 每个反射器的后端耦合系数都可由它的前端耦合系数递归地求出, 从而能快速、精确地反演出光栅的耦合系数函数。啁啾光栅的目标反射谱由理想的增益平坦滤波器透射谱获得, 利用与反射谱群时延有关的常数  $\alpha$  可控制光栅的长度,  $\alpha$  取值为  $0.0024 \text{ cm}^2$  时, 对应的光栅长度为  $3.5 \text{ cm}$ 。用剥层法反演出耦合系数函数后, 又通过解 Riccati 方程模拟了合成光栅的透射谱。数值模拟结果显示理想透射谱与合成光栅透射谱之间的峰峰值误差小于  $0.1 \text{ dB}$ , 并且在工作带宽范围内, 透射谱群时延的变化量小于  $0.6 \text{ ps}$ , 表明该滤波器对系统没有额外的色散影响。

**关键词** 激光技术; 增益平坦; 误差函数; 剥层法; L 波段掺铒光纤放大器

**中图分类号** TN 929.11 **文献标识码** A

## Design on Gain-Flattening Filters of L-Band EDFAs

HUANG Li-qun<sup>1</sup>, WANG Li<sup>1</sup>, WANG Zhi<sup>1</sup>, HUANG Wei-ping<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> *Institution of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)  
(<sup>2</sup> *Electrical and Computer Engineering Dept. McMaster Univ. CA*)

**Abstract** Gain flattening of EDFA (erbium-doped fiber amplifier) is a critical issue for WDM (wavelength-division-multiplex) system, and cost efficiency and insertion loss make in-fiber gratings very attractive candidates for this application. A chirp fiber grating to flatten the gain spectrum of L-EDFAs by using layer-peeling method is designed. This algorithm, based on the law of causality, considers fiber Bragg gratings as a discrete model, which divides the entire grating into a series of discrete, complex reflectors with a distance  $\Delta$  between the adjacent reflectors, the coupling coefficient at the back of a reflector can be derived from one at the front of this reflector recursively, so coupling coefficient function can be extracted rapidly and accurately. The target reflection spectrum of chirp gratings is derived from the ideal transmission spectrum of gain-flattening filters. A constant,  $\alpha$ , is utilized to control the length of chirp gratings, which is relative with group time delay of reflection spectrums. When  $\alpha$  is equal to  $0.0024 \text{ cm}^2$ , the grating has a short length of  $3.5 \text{ cm}$ . After extracting coupling coefficients of the chirp grating using layer-peeling algorithm, transmission spectrum of the synthesized grating by solving Riccati equation is simulated, numerical analysis indicates that peak-to-peak error function is below  $0.1 \text{ dB}$  between ideal and realistic transmission spectrums. The variation of group time delay in transmission spectrum is less than  $0.6 \text{ ps}$  over entire operation bandwidth; therefore, the grating has no impact of additional chromatic dispersion on system performance.

**Key words** laser technique; gain-flattening filter; error function; layer-peeling method; L-band erbium-doped fiber amplifiers

收稿日期: 2003-01-15; 收到修改稿日期: 2003-02-27

作者简介: 黄力群(1970—), 男, 北京交通大学博士研究生, 主要从事光纤光栅和光放大器方面的研究工作。E-mail: persistent\_hlq@sina.com

## 1 引 言

$L$  波段掺铒光纤放大器(EDFA)能有效扩展光纤通信系统的信道带宽,所以近几年来得到了广泛的研究<sup>[1~5]</sup>。掺铒光纤放大器的增益谱形状与它的平均粒子反转度以及所用掺铒光纤的参数有关<sup>[6]</sup>,用普通掺铒光纤制作的  $L$  波段掺铒光纤放大器可通过优化设计得到平坦的增益谱<sup>[7]</sup>,但普通掺铒光纤有小的纤芯面积和大的包层与纤芯折射率差,而  $L$  波段掺铒光纤放大器所需的掺铒光纤长度是  $C$  波段掺铒光纤放大器所需长度的数倍,对于大饱和输出功率的  $L$  波段掺铒光纤放大器来说,所需掺铒光纤通常大于 100 m,因而可以产生不可忽视的非线性效应,实验中已在  $L$  波段掺铒光纤放大器中观察到了交叉相位调制和四波混频<sup>[8]</sup>。为了避免这些非线性效应和增加量子转换效率,新的适于制作  $L$  波段掺铒光纤放大器的掺铒光纤已经研制成功,它具有较高的铒离子浓度和较大的有效芯径,用这种掺铒光纤制作  $L$  波段掺铒光纤放大器时,在同等条件下,所需铒光纤长度约可减小一半,并可有效抑制非线性效应,因而被许多生产商所采用。但由该铒光纤构成的  $L$  波段掺铒光纤放大器经过优化设计后,增益谱仍然是不平坦的<sup>[9]</sup>,所以常需要在放大器中加入一个增益平坦滤波器。

采用薄膜滤波器或长周期光栅型滤波器都可以实现增益谱的平坦化<sup>[10]</sup>,但薄膜滤波器有较大的插入损耗,并且误差函数(Peak to Peak Error Function)也较大。而长周期光栅的尺寸很大,不利于封装,并且波长的温度漂移也较大。近年来,人们已开始研究用啁啾光纤光栅来制作增益平坦滤波器,并且已取得较好的效果。

本文采用精确的剥层法<sup>[11]</sup>来设计基于啁啾光栅的增益平坦滤波器,并取得很好的结果。用此方法可以快速、准确地计算出啁啾光纤光栅的耦合系数分布函数,并可通过传统的矩阵法或求解 Riccati 方程的方法进行验证。

## 2 剥层法的原理

为了便于理解,文献<sup>[11]</sup>中的剥层法推导过程可以简化。光纤光栅可以被认为是一个离散的模型,由  $N$  个长度为  $\Delta$  的复反射器构成,而且单个反射器的耦合系数是一个常数,它的传输特性可用  $T_S$  和  $T_P$  两个矩阵之积来近似表示

$$T_S = \begin{bmatrix} \cosh(|q|\Delta) & \frac{q}{|q|} \sinh(|q|\Delta) \\ \frac{q^*}{|q|} \sinh(|q|\Delta) & \cosh(|q|\Delta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_P = \begin{bmatrix} \exp(i\delta\Delta) & 0 \\ 0 & \exp(-i\delta\Delta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $\delta = \beta - \beta_0$ ,为相对于布拉格波数  $\beta_0$  的波数失谐; $q(z)$  为光纤光栅的耦合系数分布函数; $\gamma^2 = |q|^2 - \delta^2$ 。整个光栅的谱响应由这些单个矩阵的乘积和光栅的边界条件所决定。现在考虑一个离散化的问题,假设两个相同的光纤光栅分别在  $z_1$  和  $z_2$  两点被截断,其中  $z_1 = N\Delta$ ,  $z_2 = (N+1)\Delta$ ,截断后的光栅分别称为光栅 1 和光栅 2。相同的光脉冲分别从两个光栅的起始点  $z = 0$  处入射,并在  $\tau = 2(N+1)\Delta/c$  时刻观察两个光栅的时域响应,它们之间的差值用  $\Delta h(\tau)$  表示。可以看出,这个差值仅与在  $z_2 = (N+1)\Delta$  处经历一次反射的光场有关,这部分光场所对应的频率响应可由公式(1)和(2)计算,然后通过离散的傅里叶变换可求出  $\Delta h(\tau)$

$$\Delta h(\tau) = -\frac{q[(N+1)\Delta]}{|q[(N+1)\Delta]|} \cdot \frac{\tanh\{|q[(N+1)\Delta]|\Delta\}}{\prod_{m=0}^N \cosh^2[|q(m\Delta)|]} \quad (3)$$

基于因果律的限制,在  $\tau = 2(N+1)\Delta$  时刻,截断前的整个光栅的脉冲响应和光栅 2 的脉冲响应相等,这是因为整个光栅的后部对该时刻的脉冲响应并无影响。换句话说,在  $\tau$  时刻,整个光栅的脉冲响应与光栅 1 的脉冲响应之间的差值也等于  $\Delta h(\tau)$ 。如果整个光栅的目标脉冲响应已知,联立公式(1),(2)和(3),就可计算出对应的光栅耦合系数。

## 3 数值模拟结果和讨论

$L$  波段掺铒光纤放大器的增益谱形状除和它的

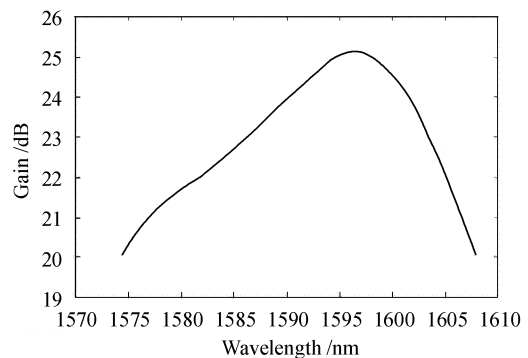


图 1  $L$  波段掺铒光纤放大器的增益谱

Fig. 1 Gain spectrum of  $L$ -band EDFA

饱和程度有关外,还与所用掺铒光纤的两个参量密切相关,它们分别是吸收系数谱和增益系数谱,图 1 是由光功率计测得的某 L 波段掺铒光纤放大器的增益谱,在有效带宽内约有 5 dB 的增益差值。

使用基于啁啾光栅的宽带滤波器就可使放大器

的增益谱变得均衡,该光栅的透射谱必须与放大器增益谱精确匹配,以取得最小的误差函数。为消除光栅反射谱对光放大器所造成的影响,在它们之间必须加入光隔离器。光纤光栅的目标反射谱可由下式求得

$$H(\delta) = \begin{cases} 0 & \lambda < 1575 \text{ nm} \quad \text{或} \quad \lambda > 1608 \text{ nm} \\ \sqrt{\exp\{[G(\delta) - \min(G)]/10\}} \cdot \exp(j\alpha\delta^2) & 1575 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1608 \text{ nm} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $G(\delta)$  为 L 波段掺铒光纤放大器的增益谱; $\alpha$  为一个与反射谱群时延有关的量,为了使设计的滤波器具有小的尺寸,选取的值为  $0.0024 \text{ cm}^2$ ;  $\min(G)$  为增益谱在有效带宽内的最小值。根据公式(4),能够运用剥层法精确地设计出所需的光纤光栅滤波器。

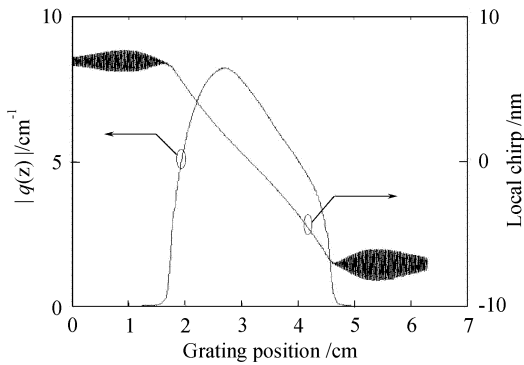


图 2 折射率调制强度的分布函数和光栅周期的局部啁啾曲线

Fig. 2 Plots of magnitude of the coupling coefficient and relative chirp of the grating period

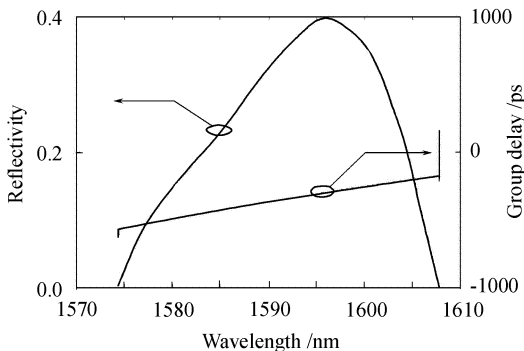


图 3 光栅的反射谱和反射谱群时延曲线  
Fig. 3 Reflectivity and group delay of the reconstructed gain-flattening grating

图 2 是计算后得到的光纤光栅制作参数,箭头指向左侧的曲线是折射率调制强度的分布函数,箭头指向右侧的曲线表征了光栅周期在局部的啁啾情

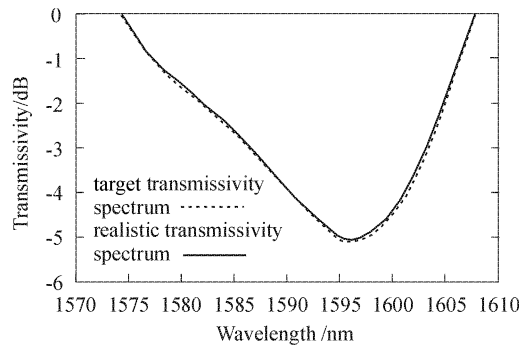


图 4 滤波器实际透射谱与目标透射谱之间的比较  
Fig. 4 Transmissivity spectrum of the grating

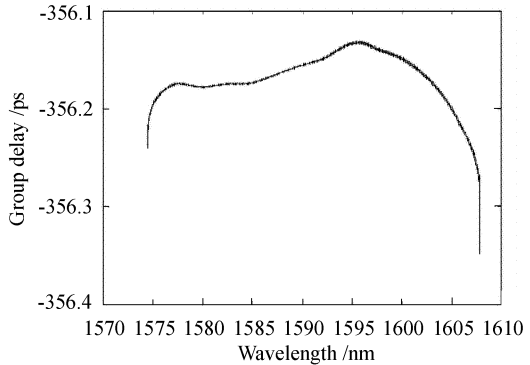


图 5 滤波器透射谱的群时延与波长之间的关系  
Fig. 5 Group time delay of transmission spectrum

况。根据以上所得到的光栅结构参数,就可以求解 Riccati 方程,从而得到光纤光栅的谱响应。图 3 给出了光栅的反射谱和群时延曲线,箭头指向左侧的曲线为光栅的反射谱,箭头指向右侧的曲线为群时延曲线。为了验证该剥层算法的准确性,还计算了它的透射谱。图 4 中的虚线表示由增益谱直接反演得到的目标透射谱,实线则为该光栅的真实透射谱,可以看出两者的数值非常接近,最大的差值小于 0.1 dB,这说明使用剥层法设计增益平坦滤波器是非常可靠的,该算法有着良好的求解精度。

从啁啾光纤光栅的工作原理来看,它的透射谱不会有很大时延差值。为了进一步验证,计算了

该光栅的透射时延曲线。如图 5 所示,在整个放大器的工作带宽内,最大的群时延差值小于 0.6 ps,这也表明该滤波器不会带来额外的色散影响。

## 4 结 论

运用剥层法设计 L 波段掺铒光纤放大器的增益平坦滤波器,得到了很好的结果,它的误差函数在整个工作带宽内小于 0.1 dB。光放大器经该光栅滤波后,将会有个很平坦的增益谱,这非常有利于多个光放大器的级联工作。相对于长周期光栅滤波器来说,用啁啾光栅制作增益平坦滤波器可获得较小的尺寸,长度仅有 3.5 cm,所以很容易进行温度补偿封装。同时,生产厂家都追求光放大器的小型化,设计的结构变得非常紧凑,显然小尺寸的增益平坦滤波器有利于装配。

### 参 考 文 献

- 1 J. F. Massicott, R. Wyatt, B. J. Ainslie. Low noise operation of  $\text{Er}^{3+}$  doped silica fiber amplifier around 1.6  $\mu\text{m}$  [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(20):1924~1925
- 2 H. S. Chung, M. S. Lee, D. Lee *et al.*. Low noise, high efficiency L-band EDFA with 980 nm pumping [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(13):1099~1100
- 3 S. Yamashita, M. Nishihara. L-band erbium-doped fiber amplifier incorporating an inline fiber grating laser [J]. *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 2001, **7**(1):44~48
- 4 Meng Hongyun, Yang Shiquan, Yuan Shuzhong *et al.*. L-band  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber amplifier based on backward ASE [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):905~907  
蒙红云,杨石泉,袁树忠等. 基于后向 ASE 抽运的 L-波段掺铒光纤放大器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10):905~907
- 5 Liu Bin, Sun Junqiang. Gain enhancement of two-stage L-band EDFA pumped by C-band and 980 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10):917~920  
刘彬,孙军强. C波段和 980 nm 抽运的两段级联 L 波段掺铒光纤放大器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10):917~920
- 6 Y. Sun, J. L. Zyskind, A. K. Srivastava. Average inversion level, modeling, and physics of erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 1997, **3**(4):991~1007
- 7 J. M. Oh, H. B. Choi, D. Lee *et al.*. Demonstration of highly efficient flat-gain L-band erbium-doped fiber amplifiers by incorporating a fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(9):1258~1260
- 8 Kai Song, M. Premaratne. Effects of SPM, XPM, and four-wave-mixing in L-band EDFAs on fiber-optic signal transmission [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(12):1630~1633
- 9 J. Yu, P. Jeppesen, B. Palsdottir, S. N. Knudsen. Reducing pulsewidth broadening in L-band EDFAs by use of a new L-band EDF [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(7):654~656
- 10 A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins *et al.*. Long-period fiber-grating-based gain equalizers [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(4):336~338
- 11 R. Feced, M. N. Zervas, M. A. Muriel. An efficient inverse scattering algorithm for the design of nonuniform fiber Bragg gratings [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(8):1105~1115