

线性啁啾长周期光纤光栅 用作 EDFA 增益平坦滤波器的理论研究*

徐新华, 王青

(南京理工大学 电子工程与光电子技术学院, 南京 210094)

摘 要: 提出用具有特定折射率调制包络的线性啁啾长周期光纤光栅作为掺铒光纤放大器 (EDFA) 的增益平坦滤波器. 采用龙格库塔迭代法数值求解该类型光栅耦合模方程, 就特定的掺铒光纤放大器增益谱, 用 Nelder-Mead 优化算法对光栅结构参量 (光栅长度、周期、线性啁啾系数、折射率调制包络的形状等) 进行优化, 设计出能在 C 波段 35 nm 带宽范围内对掺铒光纤放大器进行平坦化 (增益起伏在 ± 0.5 dB 之内) 的平坦滤波器.

关键词: 长周期光纤光栅; 掺铒光纤放大器; 啁啾;

中图分类号: TN253; TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)08-2063-3

0 引言

掺铒光纤放大器 (Erbium-doped Fiber Amplifier) 的商用化使得光信号的中继传输距离显著增加. 但是 EDFA 增益谱是波长的函数, 不同波长处其增益量是不同的. 这使得在多通道的波分复用通信系统中, 由于传输系统中 EDFA 增益谱不平坦, 使得各通道的增益有所不同, 在长距离多级放大的情况下增益累积造成的信道间功率不均衡会导致严重误码率. 另一方面, EDFA 增益谱不平坦性极大地限制了可用的增益带宽, EDFA 提供高达 45 nm 的增益范围.

近年来对各种 EDFA 的增益平坦化技术的研究受到了国内外光纤和光电子研究领域的普遍关注, 迄今为止已经有多种方法用来可实现各种 EDFA 的增益平坦化. 有两种基本的方法可实现 EDFA 的增益平坦^[1]: 一种是设法改进掺铒光纤的材料特性; 另外就是设计光谱特性与 EDFA 的增益谱几乎相反的平坦滤波器.

长周期光纤光栅作为一种性能优良的波长选择性损耗元件, 它具有结构简单、附加损耗小、无背向反射、成本低廉等优点. 有关长周期光纤光栅用作 EDFA 增益平坦滤波器的设计方案多种多样, 例如级联长周期光纤光栅^[2-3]、相移长周期光纤光栅^[4]、微弯长周期光纤光栅^[5]、高频 CO₂ 激光脉冲写入的长周期光纤光栅^[6-7] 等等. 本文则尝试用具有特殊折射率调制包络的线性啁啾长周期光纤光栅来做 EDFA 的增益平坦滤波器, 其步骤是: 首先, 根据具

体的 EDFA 的增益谱, 计算出平坦滤波器的目标光谱; 采用 Nelder-Mead 算法对具有特殊切趾包络的线性啁啾长周期光纤光栅的结构参量 (包括光栅长度、起始周期、线性啁啾系数、折射率调制包络的形状等等) 进行优化, 使其光谱最大程度地与目标光谱一致.

1 理论分析

具有切趾包络的线性啁啾光纤光栅的纤芯折射率调制可表示为

$$\delta n_{\text{co}}(z) = f(z) \cdot \delta n \cdot \left[1 + v \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + c \frac{z^2}{L^2} + \varphi \right) \right] \quad (1)$$

式中 δn 为曝光后产生的平均折射率的改变量, v 为折射率调制的对比度, Λ 为光栅的周期, c 为线性啁啾系数, L 为光栅的长度, φ 为曝光的初相位, $f(z)$ 为切趾包络函数, 常用的切趾包络函数如下:

1) 高斯形

$$f(z) = \exp \left[\frac{-4 \cdot \ln 2 \cdot \left(z - \frac{L}{2} \right)^2}{\text{FWHM}^2} \right] \quad (0 \leq z \leq L) \quad (2)$$

式(2)中, FWHM 是高斯包络的半宽全高, 一般选择 $L \sim 3\text{FWHM}$.

2) 升正弦形

$$f(z) = \sin \left(\frac{\pi \cdot z}{L} \right) \quad (0 \leq z \leq L) \quad (3)$$

3) 正弦形

$$f(z) = \sin \left(\frac{\pi \cdot z}{L} \right) \quad (0 \leq z \leq L) \quad (4)$$

4) sinc 形

$$f(z) = \frac{\sin(x)}{x}, x = \frac{2\pi \cdot \left(z - \frac{L}{2} \right)}{L} \quad (0 \leq z \leq L) \quad (5)$$

5) 双曲正切形

* 南京理工大学科研发展基金 (AB96234) 资助

Tel: 025-84315433

Email: xxhfwx@163.com

收稿日期: 2008-09-18

修回日期: 2008-12-16

$$f(z) = \begin{cases} \tanh\left[\frac{2az}{L}\right] & (0 \leq z \leq \frac{L}{2}) \\ \tanh\left[\frac{2a(L-z)}{L}\right] & (\frac{L}{2} \leq z \leq L) \end{cases} \quad (6)$$

由于本文要求的光栅的传输谱是要与 EDFA 的增益谱几乎相反,而采用上述规则切趾包络的光栅传输谱则很难做到这一点,因此我们所设计的光栅的包络是不规则的,但在做优化时可用这些常用的切趾函数的线性组合来进行拟合。

2 数值模拟与分析

图 1 是 EDFA 的原始增益谱,由图可知,EDFA 的增益谱在 C 波段起伏较大,为了达到对其平坦化的目的,需设计出传输谱与 EDFA 增益谱几乎相反的长周期光纤光栅.图 2 示出在 C 波段 35 nm 范围内平坦滤波器所需目标光谱。

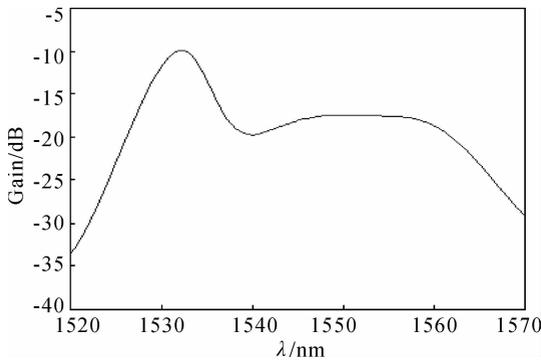


图 1 EDFA 原始增益谱
Fig. 1 The original gain spectrum of EDFA

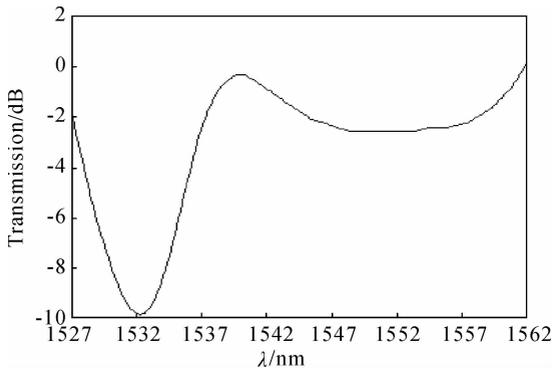


图 2 EDFA 增益平坦器目标光谱
Fig. 2 The objective spectrum of EDFA flattening filter

数值模拟用到的光纤参量为:纤芯半径 $a_1 = 2.5 \mu\text{m}$,包层半径 $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$,纤芯折射率 $n_1 = 1.45077$,包层折射率 $n_2 = 1.444$,外围层为空气,其折射率为 $n_3 = 1.0$,选择 1 阶 7 次包层模,因计算得出其与纤芯基模的耦合最强.采用龙格库塔迭代法数值求解耦合模方程,并用 Nelder-Mead 算法对具有特殊切趾包络的线性啁啾长周期光纤光栅的结构参量进行优化,优化后的光栅参量为:起始周期为 $655 \mu\text{m}$ 、长度 13.1 cm 、线性啁啾系数 $c = 10.3$ 。

图 3 是经过优化后的具有特殊折射率调制包络的线性啁啾长周期光纤光栅的折射率分布示意图,该包络是由 10 个系数不同的高斯形包络叠加而成。

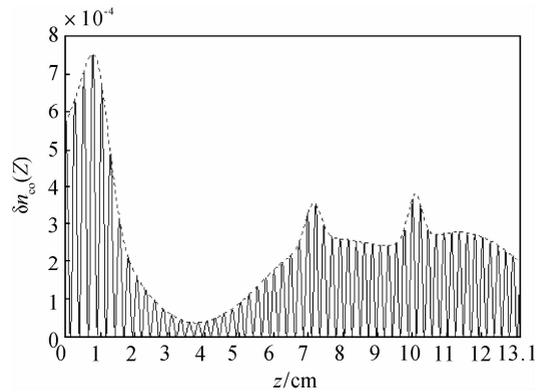


图 3 用作 EDFA 增益平坦滤波器的线性啁啾长周期光纤光栅的纤芯折射率调制
Fig. 3 Modulation of core refractive index of the linearly chirped long period grating used for EDFA gain flattening

图 4 是该光栅的传输谱与 EDFA 目标光谱的对比。

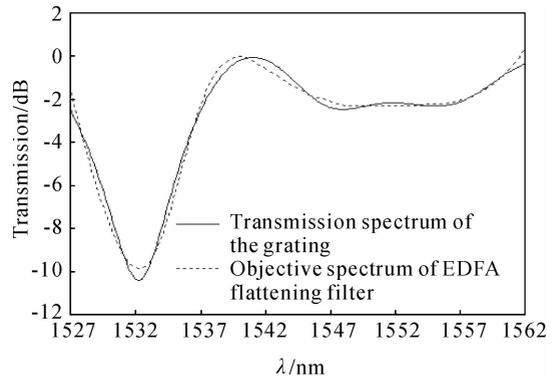


图 4 光栅传输谱与目标光谱
Fig. 4 The transmission spectrum of the grating and the objective spectrum

图 5 是经过我们所设计的具有特定折射率调制包络的线性啁啾长周期光纤光栅平坦后的 EDFA 增益谱,在 C 波段 35 nm 带宽内增益起伏控制在 $\pm 0.5 \text{ dB}$ 之内。

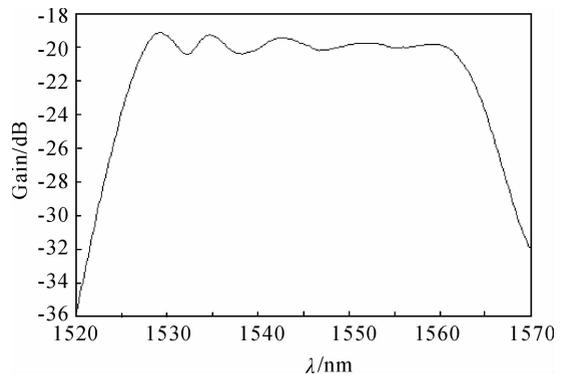


图 5 平坦后的 EDFA 增益谱
Fig. 5 Flattened gain spectrum of EDFA

3 结论

本文提出一种新的 EDFA 增益平坦方案,即用具有特殊折射率调制包络的线性啁啾长周期光纤光栅作为 EDFA 增益平坦滤波器,文中采用龙格库塔迭代法数值求解该类型光栅的耦合模方程,并用 Nelder-Mead 算法对线性啁啾长周期光纤光栅的结构参量进行优化,设计出能使 EDFA 增益谱在 C 波段起伏小于 +0.5 dB 的基于线性啁啾长周期光纤光栅的平坦滤波器。

参考文献

- [1] WILKINSON M, BEBBINGTON A, CASSIDY S A, *et al.* D-fiber filter for erbium gain spectrum flattening[J]. *Electron Lett*, 1992, **28**(2):131-132.
- [2] XIE Zeng-hua, Chen Gen-xiang, LI Tang-jun, *et al.* EDFA gain flattening equalizer based on long period fiber gratings [J]. *Chinese J Lasers*, 2001, **A28**(6):553-555.
谢增华,陈根祥,李唐军,等. 运用长周期光纤光栅实现 EDFA 增益平坦化[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(6):553-555.
- [3] TANG Shu-cheng, XU Kui, WEI Chun-long. Long period fiber gratings used for EDFA gain flattening [J]. *Modern*

Cable Transmission, 2003, (2):8-12.

汤树成,徐奎,韦春龙. EDFA 增益平坦用长周期光纤光栅[J]. *现代有线传输*. 2003, (2):8-12.

- [4] QIAN J R, CHEN H F. Gain flattening fibre filters using phase-shifted long period fibre gratings [J]. *Electron Lett*, 1998, **34**(11):1132-1133.
- [5] LK-BU SOHN, JANG-GI BACK, NAM-KWON LEE, *et al.* Gain flattened and improved EDFA using microbending long-period fibre gratings [J]. *Electron Lett*, 2002, **38**(22):1324-1325.
- [6] RAN Zeng-ling, RAO Yun-jiang, ZHU Tao, *et al.* Er doped Fibre amplifiers based on novel long period gratings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1):72-75.
冉曾令,饶云江,朱涛,等. 基于新型长周期光纤光栅的掺铒光纤放大器[J]. *光子学报*, 2003, **32**(1):72-75.
- [7] RAN Zeng-ling, RAO Yun-jiang, LUO Xiao-dong. Theoretical and experimental investigation erbium-doped fiber amplifiers with long-period fiber grating filters [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4):695-700.
冉曾令,饶云江,罗小东. 基于长周期光纤光栅滤波器的掺铒光纤放大器理论核实验研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(4):695-700.

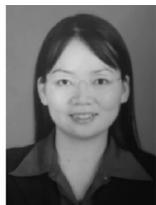
Linearly Chirped Long Period Gratings Used for EDFA Gain Flattening

XU Xin-hua, WANG Qing

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The linearly chirped long period grating with special refractive index for EDFA gain flattening is presented. Runge-Kutta algorithm is used to numerically solve the coupled-mode equations of this type of grating. The grating structure parameters including grating length, period, linear chirp coefficient and the core refractive index profile are optimized by Nelder-Mead arithmetic. A linearly chirped long period grating with appropriate parameters is designed to flatten the gain spectrum of EDFA. The flattened gain spectrum has a bandwidth of 35 nm in C wave band and a fluctuation in ± 0.5 dB.

Key words: Long period grating; EDFA; Chirp



XU Xin-hua received her Ph. D. degree in physicaelectronics, from Electronic Engineering Department of Southeast University in 2003. Now she is a prelector, and her research interests focus on optical fiber gratings, optical communication and photonic crystals.