

相移长周期光栅及其在增益谱平坦化中的应用

钱景仁 陈后飞

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系光纤实验室, 合肥 230027)

摘 要 用耦合模方法和传输矩阵法相结合对长周期光栅的传输光谱特性进行了研究, 提出了用相移长周期光栅使双峰的增益谱线平坦化。理论证明, 实现这样的平坦化是可行的。

关键词 长周期光栅, 传输光谱, 增益平坦化。

1 引 言

近年来随着通信事业的高速发展, 对传输带宽的需求也有着前所未有的增加。通信系统的传输带宽是受系统中各个分立元件的带宽影响的。对光通信系统中被广泛使用的掺铒光纤放大器(EDFA), 其增益谱线沿波长有一定的不均匀性。在含有多个掺铒光纤放大器的多通道频分复用系统中, 这种不均匀性的积累会对输出端造成很大的影响而大大减小掺铒光纤放大器的可用带宽, 即限制了频分复用系统的可用通道数。通过对掺铒光纤放大器增益谱线的平坦化, 可以大大增加其可用带宽。

可采取两种方法来平坦增益谱线。一种是用双掺杂光纤, 即掺铒外, 同时掺入新的掺杂物, 如铝; 或是采用新的光纤基质材料^[1], 例如采用氟化物光纤。另一种方法是采用增益平坦滤波器^[2], 通过级联一个带阻滤波器来平坦增益谱线中的驼峰。目前已开发的几种实现增益平坦滤波器的技术包括马赫-曾德尔滤波器^[3], 倾斜布拉格光栅^[4], 以及长周期光栅^[5]。马赫-曾德尔滤波器由于难度大, 目前的应用仍只局限于实验室。由倾斜布拉格光栅组成的滤波器可以在某种程度上平坦增益谱线, 但这种光栅的周期较短, 倾斜角也不易控制, 至今还没有一种固定的成熟工艺来生产这种光栅。除此之外, 布拉格光栅是一种反射型光栅, 是利用正向基模与反向模的耦合, 而增益平坦滤波器要求的背向反射很小(特别是在大功率激光系统中), 所以这种布拉格光栅结构的滤波器不宜用于增益平坦。相反, 长周期光栅与对应的短周期光栅相比, 由于它的光栅周期比光的波长大得多, 通常都在 200~ 400 μm 的量级, 因而制造容差大, 适合于批量生产, 成本也相对较低。长周期光栅的工作原理是通过选择一定的光栅周期, 使得基模与一个前向传播的包层模满足相位匹配条件 $\Delta = 2\pi/(\beta_1 - \beta_2)$, 从而发生耦合, 使光在包层中因吸收和散射而损耗掉。由于耦合发生在前向模之间, 长周期光栅是一种传输型光栅, 没有背向反射。除此之外, 长周期光栅的插入损耗低, 带宽较宽, 在实际

应用中还具有便于批量生产、封装紧凑、可靠等优点。长周期光栅较好地弥补了上述几种器件的缺点，是作为增益平坦滤波器的较佳方案。

均匀长周期光栅的传输光谱中只有一个波谷，类似于一个带阻滤波器，通过改变光栅的参数可以调整波谷的幅度和带宽，但还是只能用来平坦增益谱线中的一个驼峰。如果想同时对增益谱线中的几个驼峰进行平坦化，目前经常使用的一种方法是将几个均匀光栅串联，每个光栅分别平坦一个驼峰。这种方法设计思路简单，只需对每个光栅分别进行设计，而不同光栅之间由于中心波长不同几乎没有相互影响。但这种串联必将引入一定的插入损耗，而且在生产中也不便于封装。因此如何采用一个器件产生双峰的传输光谱，来对增益谱线进行平坦化是目前比较关心的一个问题。通过对长周期光栅传输特性的理论研究，我们发现如果在均匀长周期光栅中间加入一个相移，其传输谱线将由一个波谷变为两个，并且随着相移大小的改变，这两个波谷的位置和大小也随之作规律性的变化。因此通过选择不同的相移，可以得到不同形状的传输谱线，从而用一个器件来平坦双峰的增益谱线。

本文首先应用耦合模方法和传输矩阵法相结合对相移长周期光栅的传输特性进行了理论分析，得出其传输光谱，对传输光谱随光栅参数的变化规律作了分析，并将此规律应用于具体的光栅设计中，从理论上设计了一个相移长周期光栅来平坦一个双峰的宽带荧光光源的输出光谱。

2 理论分析

本文中采用的方法其原理是：对于结构较复杂的不均匀光栅，可以将之分为多个周期，对每个周期用耦合模方法计算出其传输矩阵，然后将这些传输矩阵级联则得到整个光栅的传输矩阵。这种方法实际上是耦合模方法与传输矩阵法的结合，它的通用性较强，可以用来分析各种折射率变化分布不均匀的光栅，而且计算误差很小。对于长周期光栅这种方法尤为可行，因为光栅的周期长，整个光栅内的周期数不多，因此计算量不大。如果是短周期光栅，则由于周期数太多的原因而不得不考虑计算量的问题，在这种情况下一般是将一段不均匀光栅粗分成几段均匀光栅进行分析，然后再级联起来。

一个光栅周期如图1所示，其中 n_1 是未受扰区的纤芯折射率， $n_1 + dn$ 是受扰区的纤芯折射率。同向波 A_1 、 A_2 在经过受扰区时发生耦合，由于在整个受扰区 dn 保持不变，因此耦合系数 C 不变，属于常耦合，其耦合模方程为：

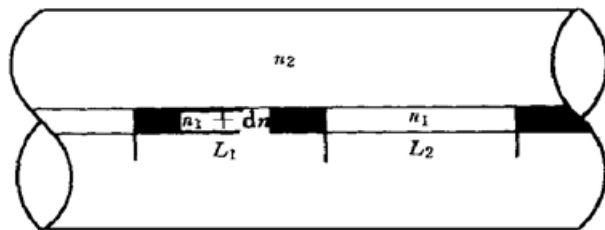


Fig. 1 One pitch of a fiber grating

$$\left. \begin{aligned} \frac{dA_1}{dz} &= -j\beta_1 A_1 + jCA_2 \\ \frac{dA_2}{dz} &= jCA_1 - j\beta_2 A_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$C = k \int_{A_{co}} \psi_1(r, \phi) \psi_2(r, \phi) dn dA / \int_{A_{co}} |\psi_1|^2 dA$ ，为 A_1 和 A_2 间的耦合系数^[7]，其中 ψ_1 、 ψ_2 为 A_1 、 A_2 的横向场分量。

解耦合模方程(1)可以得到受扰区的传输矩阵为：

$$T_p = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix}$$

$$f_{11} = \frac{1}{2}[1 - (1 + Q^2)^{-1/2}] \exp(-jh_1L_1) + \frac{1}{2}[1 + (1 + Q^2)^{-1/2}] \exp(-jh_2L_1)$$

$$f_{21} = \frac{1}{2}(1 + Q^{-2})^{-1/2}[\exp(-jh_1L_1) - \exp(-jh_2L_1)]$$

$$f_{12} = \frac{1}{2}(1 + Q^{-2})^{-1/2}[\exp(-jh_1L_1) - \exp(-jh_2L_1)]$$

$$f_{22} = \frac{1}{2}[1 + (1 + Q^2)^{-1/2}] \exp(-jh_1L_1) + \frac{1}{2}[1 - (1 + Q^2)^{-1/2}] \exp(-jh_2L_1)$$

其中 $Q = \frac{2C}{\beta_1 - \beta_2}$, $h_1 = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} - C \sqrt{1 + 1/Q^2}$, $h_2 = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} + C \sqrt{1 + 1/Q^2}$ 。同向波 A_1 、 A_2 在经过未受扰区时不发生耦合, 只是相位上的变化, 因此未受扰区的传输矩阵为:

$$\mathbf{T}_u = \begin{bmatrix} \exp(-j\beta_1L_2) & 0 \\ 0 & \exp(-j\beta_2L_2) \end{bmatrix}$$

β_1 、 β_2 为 A_1 、 A_2 的传播常数, L_2 为未受扰区的长度。由此可得一个光栅周期的传输矩阵为 $\mathbf{T}_n = \mathbf{T}_u\mathbf{T}_p$ 。

由于整个数值计算过程是用计算机进行的, 因此无须对上面的矩阵进行合并。将每个光栅周期的传输矩阵级联得到整个光栅的传输矩阵

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_n\mathbf{T}_{n-1}\cdots\mathbf{T}_1,$$

而 LP₀₁ 模的传输系数 $t = |T_{11}|^2$ 。

本文中设计的相移光栅是指在普通的均匀长周期光栅的正中间插入一段未受扰的光纤, 从相位匹配条件 $\Lambda = 2\pi/(\beta_1 - \beta_2)$ 可以看出, 对于波长为中心波长的模式, 插入一段长度 L 等于光栅周期 T 的未受扰区, 相当于给基模和与之发生耦合的包层模之间加入了一个 2π 的相移, 同理, 插入一段长度为 $T/2$ 的未受扰区, 相当于加入了一个 π 的相移, 以此类推。至于相移光栅的传输矩阵也很容易得到, 只需在上面的均匀光栅的矩阵级联中加入一个插入区域的传输矩阵 $\mathbf{T}_{ps} = \begin{bmatrix} \exp(-j\beta_1L) & 0 \\ 0 & \exp(-j\beta_2L) \end{bmatrix}$, 其中 L 为插入区域的长度。最后得到的相移光栅传输矩阵为: $\mathbf{T} = \mathbf{T}_n\cdots\mathbf{T}_{n/2}\mathbf{T}_{ps}\mathbf{T}_{n/2-1}\cdots\mathbf{T}_1$ 。

3 数值计算结果及分析

3.1 相移长周期光栅的传输谱线特性

图 2 分别是相移为 0 、 0.5π 、 π 、 1.5π 时的光栅传输谱线, 其余各参数分别为: 折射率变化 $dn = 0.001$, 光栅周期 $T = 695 \mu\text{m}$, 光栅长度 $L = 38.531 \text{ mm}$ 。

当相移为 π 时, 传输曲线是对称的两个波谷, 原来中心波长处的波谷, 现在变成了波峰。这是因为在 LP₀₁ 模向 LP₀₂ 模耦合的过程中加入了一个 π 的相移, 没有相移时应当是 LP₀₁ 模继续向 LP₀₂ 模耦合直到能量全部转换, 现在由于加入了 π 的相移(即反相)而开始由 LP₀₂ 模向 LP₀₁ 模耦合。由于相移是加在光栅的中间, LP₀₂ 模的能量又恰好全部耦合回 LP₀₁ 模了, 从而形成了图 2(c) 中心波长处的波峰。当改变相移大小时, 两个波谷的位置和相对大小随之变化, 具体的变化规律是: 当相移小于 π 时, 长波长一边的波谷幅度较大, 当相移大于 π 时, 长波长一边的波谷幅度较小。当相移由 0 到 2π 逐渐增大时, 长波长一边的波谷逐渐远离中心波

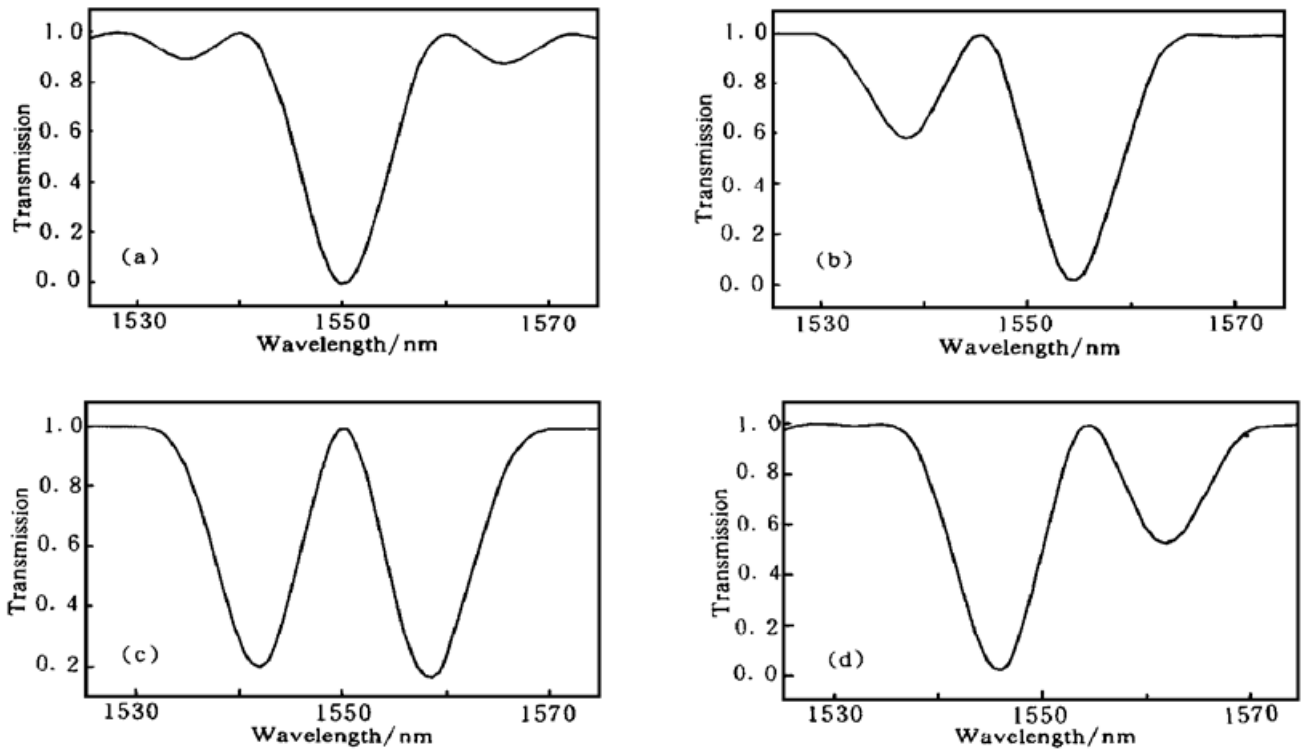


Fig. 2 Transmission spectra of a phase-shifted long-period grating with shift phase (a) 0, (b) 0.5π , (c) π , (d) 1.5π

长, 并且幅度逐渐减小, 而短波长一边的波谷逐渐接近中心波长, 并且幅度逐渐增大。

3.2 增益谱曲线的平坦化

图 3 中的实线是一个宽带荧光光源的输出光谱^[7]。在输出光谱中有两个驼峰, 一般情况下是分别设计两根光栅对这两个峰进行平坦化, 然后将这两根光栅级联。这种方法的好处是设计思路简单, 可以用两根均匀长周期光栅实现。其不足之处是两个器件级联会引入插入损耗, 而且不便于封装。我们在这里使用的是相移长周期光栅, 利用其传输谱线中固有的两个波谷对输出光谱中的双峰进行平坦化。

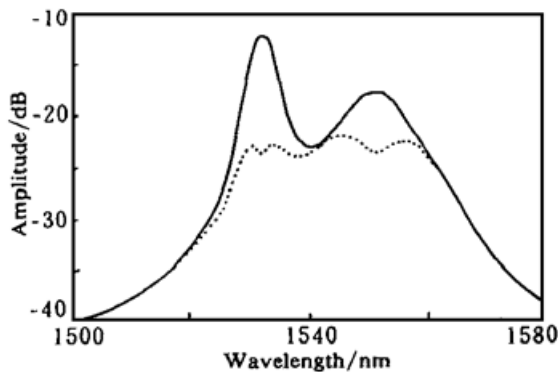


Fig. 3 Unflattened and flattened spectra of a Er-doped fiber superfluorescent source

根据前面对相移长周期光栅的分析, 适当地调整相移以及光栅的其他参数, 可以使传输谱线的两个波谷的位置和大小与增益谱线的驼峰基本吻合, 从而同时对两个峰进行平坦化。在光栅设计中, 将中心波长的位置确定在增益谱线的两个驼峰之间的最低点。这样得到中心波长为 1540 nm, 由相位匹配条件求出光栅的周期为 $T = 684 \mu\text{m}$ 。其次是确定传输谱线波谷的带宽。由于增益谱线中较高的驼峰是主要需要平坦的, 因此让传输谱线中较深的波谷的带宽和它一致。带宽是由光栅的周期数决定的, 在光栅周期已经确定的情况下适当改变光栅的长度就可以得到满意的带宽, 最后确定的光栅总长度为 $L = 32.3 \text{ mm}$ 。再确定传输谱线的两个波谷的大小, 使之对增益谱线的两个驼峰都有较好的平坦效果。根据前面的分析, 改变相移可以改变两个波谷的相对幅度, 而改变折射率变化 dn 可以改变两个波谷的绝对幅度。同时对这两个参数进行调整可以得到满意的波谷大小。最后确定的相移和折射率变化分别为: 1.22π 和 0.0013 。这样得到的传输谱线已经能基本上平坦增益谱线了, 只是中心波长尚有很小的偏移, 这时可以把第一步中所确

定在增益谱线的两个驼峰之间的最低点。这样得到中心波长为 1540 nm, 由相位匹配条件求出光栅的周期为 $T = 684 \mu\text{m}$ 。其次是确定传输谱线波谷的带宽。由于增益谱线中较高的驼峰是主要需要平坦的, 因此让传输谱线中较深的波谷的带宽和它一致。带宽是由光栅的周期数决定的, 在光栅周期已经确定的情况下适当改变光栅的长度就可以得到满意的带宽, 最后确定的光栅总长度为 $L = 32.3 \text{ mm}$ 。再确定传输谱线的两个波谷的大小, 使之对增益谱线的两个驼峰都有较好的平坦效果。根据前面的分析, 改变相移可以改变两个波谷的相对幅度, 而改变折射率变化 dn 可以改变两个波谷的绝对幅度。同时对这两个参数进行调整可以得到满意的波谷大小。最后确定的相移和折射率变化分别为: 1.22π 和 0.0013 。这样得到的传输谱线已经能基本上平坦增益谱线了, 只是中心波长尚有很小的偏移, 这时可以把第一步中所确

定的中心波长作相应的偏移, 由于偏移量很小, 对后面步骤产生的影响也很小, 只是整个传输谱线沿波长有一位移, 并未影响到两个波谷的带宽和大小。平坦化后的光谱如图 3 中的虚线所示。

结 论 对相移长周期光栅的传输特性进行了理论分析, 其中光栅参数如折射率变化、光栅周期、光栅长度以及周期数的变化会引起传输谱线的规律性变化, 掌握这种规律性对于增益平坦滤波器的设计有一定的指导意义。均匀长周期光栅只适合于用来平坦只有一个驼峰的增益谱线, 面对双峰的增益谱线, 只有通过光栅级联的方法。相移光栅随着相移的变化所产生的传输谱线能较好地平坦双峰的增益谱线, 而且这种方法设计出的增益平坦滤波器只包含一个器件, 具有体积小, 插入损耗小, 便于制造和封装等优点, 在光纤通信中有一定的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Bayart D, Clesca B, Hamon L. Experimental investigation of the gain flatness characteristics for 1.55 μm erbium-doped fluoride fiber. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(5): 613~ 615
- [2] Wilkinson M, Bebbington A, Cassidy S A *et al.*. D-fibre filter for erbium gain spectrum flattening. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(2): 131~ 132
- [3] Inoue K, Kominato T, Toba H. Tunable gain equalization using a Mach Zehnder optical filter in multistage fiber amplifiers. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1991, **3**(8): 718~ 720
- [4] Kashyap R, Wyatt R, Campbell R J. Wideband gain flattened erbium fiber amplifier using a photosensitive fiber blazed grating. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(2): 154~ 156
- [5] Vengsarkar A M, Pedrazzani J R, Judkins J B *et al.*. Long period fiber grating based gain equalizers. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(5): 336~ 338
- [6] Snyder A W, Love J D. *Optical Waveguide Theory*. New York: Chapman and Hall, London, 1983. 661
- [7] Hall D C, Burns W K, Moeller R P. High-stability Er^{3+} -doped superfluorescent fiber sources. *J. Lightwave Technology*, 1995, **13**(7): 1452~ 1460

Phase Shifted Long Period Grating and Its Application in Gain Flattening

Qian Jingren Chen Houfei

(*Optical Fiber Lab., Department of Electronics Engineering and Information Science,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027*)

(Received 6 April 1998; revised 27 July 1998)

Abstract The transmission spectrum of long period grating was analyzed by a combination of coupled mode theory and transfer matrix method. It is suggested that a phase-shifted long period grating can be used to flatten the gain spectrum with two peaks, and the result proved that such gain flattening is plausible.

Key words long period grating, transmission spectrum, gain flattening.