

文章编号: 0253-2239(2005)08-1019-6

级联长周期光栅光谱特性^{*}

崔丽萍 吴亚明

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感技术国家重点实验室, 上海 200050)

摘要: 利用传输矩阵法分析了级联长周期光栅的光谱特性, 讨论了级联处光纤的长度、位置以及包层模损耗系数对级联长周期光栅光谱的影响, 并对级联长周期光栅和相移长周期光栅的光谱进行了比较。结果表明两者光谱在级联光纤长度较小或级联位置靠近光栅两端时具有较强的一致性, 而在级联处光纤较长并且级联位置在中间时, 两者表现出截然不同的光谱特性; 在不考虑其他损耗的情况下, 如果只改变级联处光纤长度, 级联长周期光栅总量守恒; 此外, 当级联长周期光栅在级联处光纤包层模损耗系数较大时, 级联长周期光栅的光谱等效于两个长周期光栅光谱的非相干叠加, 从而为长周期光栅增益均衡器的优化设计和制作提供了一个简便有效的方法。

关键词: 导波光学; 级联长周期光栅; 非相干叠加; 传输矩阵; 损耗系数

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Spectral Characteristics of the Cascaded Long-Period Gratings

Cui Liping Wu Yaming

(State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

Abstract: The transmission spectra of cascaded long-period grating (LPG) are analyzed using transfer matrix method. The effects of the length, position and loss coefficient of the fiber that connects the LPGs on the cascaded LPG spectral characteristics are discussed. Through numerical analysis, it is shown that the spectra of cascaded LPG and phase shifted LPG have great consistency when the length of the cascading fiber is small or the cascading position is near the end of the cascaded LPG. If other losses are not considered, the amount of transmission loss keeps constant no matter how the length of the cascading fiber changes. The calculation and analysis results also show that if the loss coefficient of the cascading fiber's cladding mode is large enough, the spectra of cascaded LPG can be dealt as incoherent cascading of two LPG spectra, which provides an efficient way to the optimization and design of LPG gain equalizer.

Key words: guided wave optics; cascaded long-period grating; incoherent cascading; transfer matrix; loss coefficient

1 引 言

长周期光栅 (Long-period grating, LPG) 是一种前向传输的光纤光栅。与布拉格光栅相比, 它具有制作容易、结构简单、后向反射小、插入损耗低、成本低廉等优点, 因而被广泛应用于掺铒光纤放大器 (EDFA) 的增益均衡器^[1]、模式转换器^[2]、滤波器^[3]、以及光纤传感器^[4]等。

均匀长周期光栅的传输光谱在一定波段内对应于一个包层模只有一个传输损耗峰, 只能通过改变

光栅的耦合强度及光栅长度等参量来调整损耗峰的中心波长、强度和带宽^[5,6], 光谱设计缺乏灵活性。掺铒光纤放大器增益均衡器作为长周期光栅的主要应用, 需要长周期光栅产生特殊的光谱分布, 级联的长周期光栅^[7~9]和相移长周期光栅^[10~12]因其光谱设计具有较强的灵活性而备受关注。通过合理设计, 级联长周期光栅可以使放大器增益在 40 nm 范围内的变化小于 1 dB^[9]。此外级联光栅在一定条件下其传输谱会呈现出一系列间隔均匀、线宽窄、高

^{*} 国家 863 计划 (2002AA312261) 和上海市科委光科技专项项目 (B-27) 资助课题。

作者简介: 崔丽萍 (1981~), 女, 山东淄博人, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所硕士研究生, 主要从事光电子学方面的研究。E-mail: clp@mail.sim.ac.cn

收稿日期: 2004-09-23; 收到修改稿日期: 2004-12-20

精细度的阻带,常被用作多通道窄带滤波器^[13,14]。为了使级联长周期光栅的设计满足各种滤波的要求,充分了解其光谱特性是非常必要的。

本文利用传输矩阵法^[15]对由两段均匀长周期光栅构成的级联长周期光栅进行了分析,讨论了两光栅中间光纤的长度、位置及包层模损耗系数对其光谱的影响。包层模损耗系数对级联长周期光栅的光谱有很大影响:当损耗系数较大时,级联长周期光栅的光谱可看作两长周期光栅光谱的非相干叠加,即两长周期光栅非相干级联。非相干级联为长周期光栅增益均衡器的优化和设计提供了很大的便利。

2 级联长周期光栅理论

长周期光栅通过选择适当的光栅周期,使纤芯中传输的导模与同向传输满足耦合条件的包层模发生耦合,从而在光谱中特定波长处产生损耗峰。损耗峰的位置由相位匹配条件决定:

$$\lambda^{(m)} = (n_{01}^{co} - n_{0m}^{cl}) \cdot \Lambda, \quad (1)$$

其中 $\lambda^{(m)}$ 为第 m 阶包层模与芯区基模耦合所得损耗峰的中心波长, n_{01}^{co} 为芯区基模的有效折射率, n_{0m}^{cl} 为第 m 阶包层模的有效折射率, Λ 为长周期光栅的周期。

目前发展的多种长周期光栅主要有均匀长周期光栅、相移长周期光栅以及级联长周期光栅等。图1为三种长周期光栅的示意图。级联长周期光栅可以看作两段长周期光栅(LPG₁和LPG₂)被长度为 d 的级联光纤和大小为 φ 的初始相移分开的一种长周期光栅组合。LPG₁和LPG₂的结构参量可以是相同的,也可以不同。如果LPG₁和LPG₂的结构参量相同,则当 $d=0, \varphi=0$ 时可以看作为均匀长周期光栅[图1(a)];当 $d=0, \varphi \neq 0$ 时,就成了相移长周期光栅[图1(b)]。因此,均匀长周期光栅和相

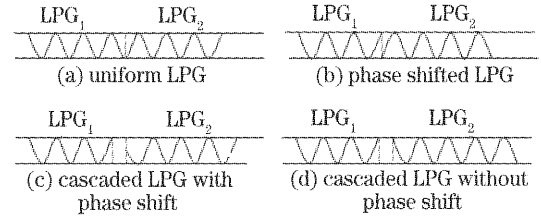


图1 不同类型的长周期光栅示意图

Fig. 1 The schematic of different types of LPG

移长周期光栅都可以看作级联长周期光栅的特例。长度为 d 的级联光纤也会引入相移,在一定条件下级联长周期光栅等效于相移长周期光栅。文中将此级联光纤与光栅的初始相移 φ 区别开来,在传输矩阵中用不同的矩阵表示。

本文研究的级联光栅由两段均匀长周期光栅构成,分别为LPG₁和LPG₂,如图1(c)、图1(d)所示。均匀长周期光栅LPG_j($j=1,2$)的基模传输振幅和其包层模LP_{0m}的传输振幅分别用 t_j 和 r_j 表示。由耦合方程可得

$$t_j = \cos(\sqrt{k_m^2 + \delta_m^2} \cdot L_j) + \frac{i \cdot \delta_m \sin(\sqrt{k_m^2 + \delta_m^2} \cdot L_j)}{\sqrt{k_m^2 + \delta_m^2}}, \quad (2)$$

$$r_j = \frac{i \cdot k_m \cdot \sin(\sqrt{k_m^2 + \delta_m^2} \cdot L_j)}{\sqrt{k_m^2 + \delta_m^2}}, \quad (3)$$

其中 k_m 为LP_{0m}模与LP₀₁模的耦合系数, $k_m L_j$ 为第 j 段光栅的耦合强度, L_j 为第 j 段光栅的长度。 δ_m 为自耦合系数,其定义为

$$\delta_m = \frac{1}{2} \left(\beta_{01}^{co} - \beta_m^{cl} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right), \quad (4)$$

(4)式中的 β_{01}^{co} 和 β_m^{cl} 分别是芯区基模LP₀₁和包层模LP_{0m}的传播常量。当LPG₁和LPG₂为结构相同的长周期光栅时,级联长周期光栅的基模传输振幅 t 和包层模的传输振幅 r 可以由下式求得^[11]

$$\begin{bmatrix} t \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_2 & r_2 \\ r_2 & t_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp[i\pi(n_{01}^{co} - n_{0m}^{cl})d/\lambda] & 0 \\ 0 & \exp[-i\pi(n_{01}^{co} - n_{0m}^{cl})d/\lambda] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(i\varphi/2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\varphi/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 & r_1 \\ r_1 & t_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 n_{01}^{co} 和 n_{0m}^{cl} 分别代表芯区基模LP₀₁和包层模LP_{0m}的有效折射率, t_1^* 和 t_2^* 分别为两段长周期光栅基模传输振幅的共轭复数。在一定的波段内,波长对芯模和包层模的有效折射率的影响是可以忽略的,在以下的讨论中均假设芯模和包层模的有效折射率为常数,实验证明这种假设是可行的^[10~12]。

利用长周期光栅的平行传输率公式 $T = |t|^2$,可得级联长周期光栅的平行传输率 T 为

$$T = |\exp\{i[2\pi(n_{01}^{co} - n_{0m}^{cl})d/\lambda + \varphi]\} t_1 t_2 + r_1 r_2|^2, \quad (6)$$

由(6)式可以看出,如图 1(d)所示的无相移的级联长周期光栅($d \neq 0, \varphi = 0$)的平行传输率 T_c 和如图 1(b)的相移长周期光栅($d = 0, \varphi \neq 0$)平行传输率 T_{ph} 分别为

$$T_c = |\exp[i2\pi(n_{01}^{\infty} - n_{0m}^{\infty})d/\lambda]t_1t_2 + r_1r_2|^2, \quad (7)$$

$$T_{ph} = |\exp(i\varphi)t_1t_2 + r_1r_2|^2, \quad (8)$$

对于 $d = 0, \varphi = 0$ 时,即回归到均匀长周期光栅的情况,如图 1(a)所示。下面依据(7)式、(8)式分析讨论其光谱特性。

3 级联长周期光栅的光谱特性分析

构成级联长周期光栅的两段均匀光栅的长度分别为 L_1 和 L_2 , L 为 LPG_1 和 LPG_2 的长度之和,取 $L = 30 \text{ mm}$ 。参量 q 为衡量相移或级联光纤位置的参量,定义 $q = L_1/L - 0.5$ 。当 $q = \pm 0.5$ 时,相移或级联光纤的位置在两侧;而当 $q = 0$ 时,其位置在中间。

分析讨论级联光纤长度、位置和包层模损耗系

数对级联长周期光栅光谱产生的影响,其中级联光栅暂不考虑带相移的情况,即 $\phi = 0$ 。

3.1 级联光纤长度 d 对级联光栅光谱的影响

以 LPG_1 和 LPG_2 的光栅周期为 $475 \mu\text{m}$, 中心波长为 1557 nm 的级联长周期光栅为例,分析级联光纤长度对光栅特性的影响。图 2 为级联光纤长度变化时的级联长周期光栅数值模拟结果及其与相移长周期光栅的比较。由图 2 可知,对于级联长周期光栅,当 LPG_1 和 LPG_2 间的级联光纤长度较小时(d 与光栅周期 Λ 相当),级联长周期光栅的光谱与相移大小为 $2\pi(d/\Lambda)$ 的相移长周期光栅的光谱相一致。而当 d 逐渐增大时,级联长周期光栅的光谱与对应的相移长周期光栅光谱的偏差逐渐增大,直至呈现完全不同的光谱特性:级联长周期光栅会出现间隔均匀、线宽窄的多个损耗峰,而相移光栅光谱则随相移改变做周期性变化,相移周期为 2π 。

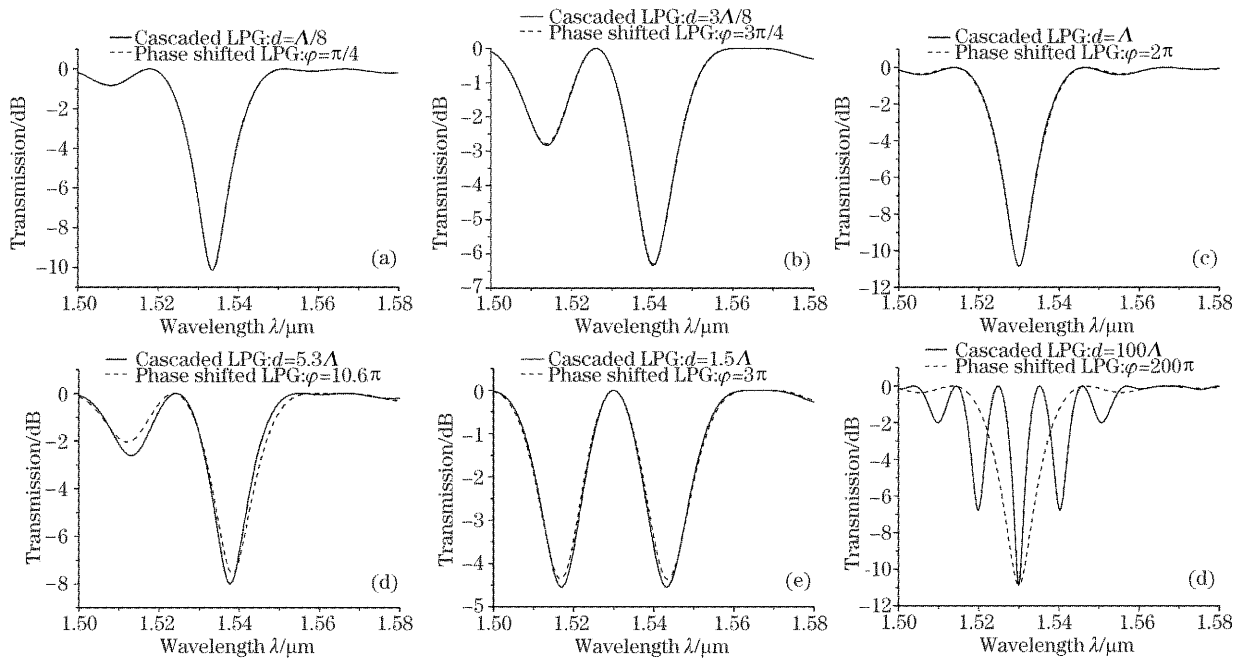


图 2 不同光纤长度对应的级联长周期光栅光谱及与相应相移长周期光栅光谱

Fig. 2 Calculated transmission spectra of cascaded LPG with different fiber length between the two LPGs and of the corresponding phase shifted LPG

下面讨论出现这种现象的原因。将相位匹配条件(1)式代入(7)式,可以得到

$$T_c = |\exp[2\pi(d/\Lambda)\lambda/\lambda^{(m)}t_1t_2 + r_1r_2]|^2, \quad (10)$$

参量 Δ 为级联长周期光栅和相移长周期光栅的相位差,定义 $\Delta = |2\pi(d/\Lambda)\lambda/\lambda^{(m)} - 2\pi(d/\Lambda)|$,化简后可得: $\Delta = 2\pi(d/\Lambda)|1 - \lambda/\lambda^{(m)}|$ 。

由于通信用的波段一般在 $1500 \sim 1600 \text{ nm}$ 附近,

即 λ 和 $\lambda^{(m)}$ 在此范围内取值,所以 $\lambda/\lambda^{(m)}$ 在 $15/16 \sim 16/15$ 之间,近似于 1。当 d 的取值较小时, Δ 可以近似为 0。于是式(10)可以改写为

$$T_c = |\exp(2\pi(d/\Lambda)t_1t_2 + r_1r_2)|^2. \quad (11)$$

比较式(11)与式(8)式,可以看出级联光纤长度为 d 的级联长周期光栅等效于相移大小为 $2\pi(d/\Lambda)$ 的相移长周期光栅。

当 $d \gg \Delta$ 时, Δ 不能近似于 0, $\lambda/\lambda^{(m)}$ 因子的影响不可以忽略, 从而两者的一致性不再成立。级联光栅出现多个传输损耗峰。多个传输峰的出现使其可用于多通道窄带滤波器。

另外, 在只改变级联处光纤长度的情况下, 将损耗在传输波段内对波长做积分, 发现积分的结果为定值。也就是说, 如果不考虑其它损耗, 级联处光纤长度的改变不会导致传输损耗总量改变。从能量守恒的角度来看, 由于级联长周期光栅的损耗峰主要是两个被级联的光栅将基模耦合到包层模所导致的, 而级联两光栅的光纤不会造成基模的损耗, 因此无论其长度如何改变, 级联长周期光栅的损耗总量是不变的。这一结论可以很好地从图 2 中得到定性的反映: 对于单峰的情况, 损耗峰值往往较小, 损耗峰的宽度也较大如图 2(a)、图 2(c) 所示; 而对于多峰的情况, 要么损耗峰值较大, 如图 2(b)、图 2(d)、图 2(e) 所示, 要么带宽较小, 如图 2(f) 所示。

3.2 级联长周期光纤光栅相对位置对其光谱的影响 相移长周期光栅中相移位置的改变会对光栅光

谱产生很大影响^[11]。通过模拟计算, 发现级联长周期光栅中级联光纤位置的变化对其光谱的影响也非常大。以中心波长为 $1.53 \mu\text{m}$, 光栅周期为 $478 \mu\text{m}$, 中间级联光纤长度为 99.5 个光栅周期的级联长周期光栅为例, 分析这一光谱特性。如图 3 所示: 当级联光纤位置在中间(即 $q=0$) 时, 其光谱除了表现出相应的相移长周期光栅的特性, 即两个对称的传输损耗峰外, 其两侧还出现较小的损耗峰; 当级联光纤向两边移动一定的位置后, 如图 3(b)、图 3(c) 所示, 级联长周期光栅传输谱线两侧的小损耗峰会逐渐减小直至消失, 但对称的两个传输损耗峰仍然存在。级联光纤继续向两侧移动, 即 q 继续增加, 如图 3(d)、图 3(e) 所示, 两个峰会过渡为一个峰, 逐渐失去相移为 π 的相移长周期光栅的光谱特性, 相应的相移长周期光栅也逐渐变为一个峰; 当级联光纤移到光栅两侧时, 级联长周期光栅光谱和相应相移长周期光栅的光谱完全变为单光栅的光谱, 并且重合在一起, 如图 3(f) 所示。

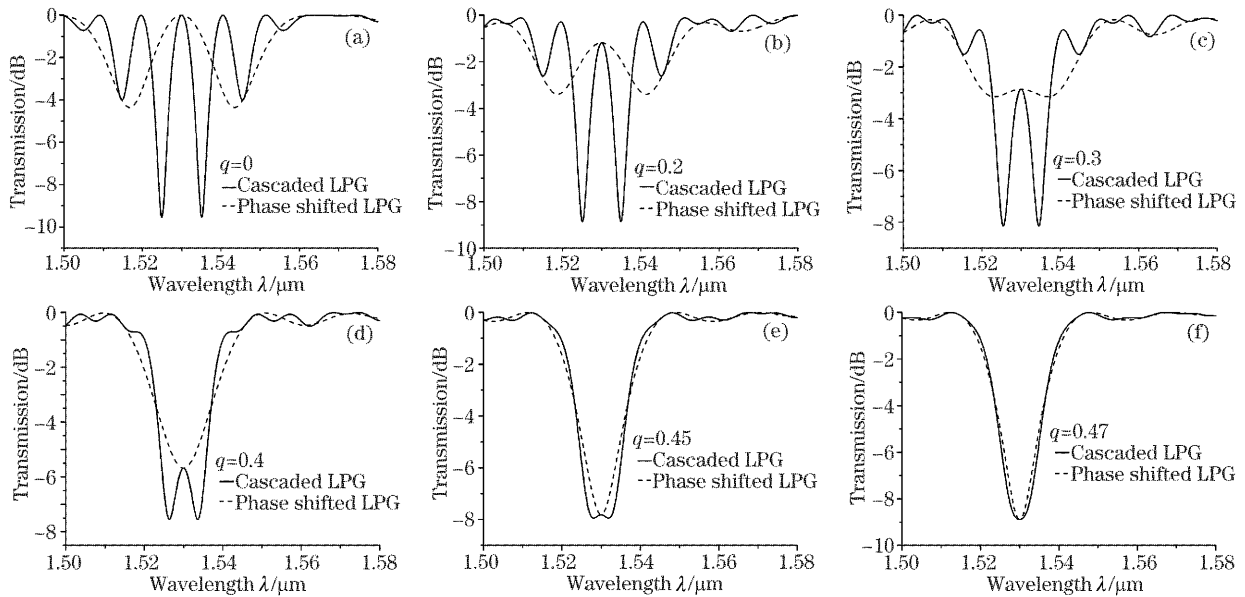


图 3 不同级联位置下的级联长周期光栅光谱及相应的相移长周期光栅光谱

Fig. 3 Calculated transmission spectra of cascaded LPG with different cascading positions and of the corresponding phase shifted LPG

出现上述现象的原因可解释如下: 当级联光纤位置趋近于光栅两侧时, 即 $q \rightarrow \pm 0.5$ 时, 由(9)式可知, 必有 L_1 或 $L_2 \rightarrow 0$ 。由于 L_1, L_2 的情况相似, 下面仅讨论 $L_1 \rightarrow 0$ 时情况。将 $L_1 \rightarrow 0$ 代入(3)式、(4)式, 可以得到 $t_1 \rightarrow 1, r_1 \rightarrow 0$ 。再将 $t_1 \rightarrow 1, r_1 \rightarrow 0$ 这一条件代入到(7)式、(8)式, 得到的结果如下:

$$T_c \approx |\exp[i2\pi(n_{01}^{\infty} - n_{0m}^{\text{cl}})d/\lambda]t_2|^2 = |t_2|^2, \quad (12)$$

$$T_{\text{ph}} \approx |\exp(i\varphi)t_2|^2 = |t_2|^2. \quad (13)$$

可以看出, 此时两者都趋近于均匀长周期光栅的光谱, 所以出现了很高的一致性。因此即使在级联光纤长度较长时, 如果级联光纤位置比较偏向于两侧, 也可以用对应的相移长周期光栅来等效。而

如果要得到多通道窄带的光谱,级联光纤位置应该在中间。

3.3 级联光纤包层模损耗系数对级联光栅光谱的影响

普通光纤对光的损耗主要是由材料的吸收损耗

和散射损耗引起的。另外为了特定的目的可以人为地加入损耗。假设级联光纤芯区基模的衰减因子为 α_1 ,包层模的衰减因子为 α_2 ,则级联光栅的传输矩阵应写为下面的形式:

$$\begin{bmatrix} t \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_2 & r_2 \\ r_2 & t_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp[i\pi(n_{01}^{\infty} - n_{0m}^{\text{cl}})/\lambda - \alpha_1] & 0 \\ 0 & \exp[-i\pi(n_{01}^{\infty} - n_{0m}^{\text{cl}})/\lambda - \alpha_2] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_1 \\ r_1 & t_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

一般情况下, α_1 很小,可将其忽略,化简(14)式可得,级联光纤加入损耗后的级联长周期光栅的平行传输率 T_c 为

$$T_c = |\exp[i2\pi(n_{01}^{\infty} - n_{0m}^{\text{cl}})d/\lambda]t_1t_2 + r_1r_2\exp(-\alpha_2d)|^2. \quad (15)$$

为了使讨论的结果更明显,以周期不同的两个长周期光栅为例进行分析。级联的两个长周期光栅的周期分别取 $420 \mu\text{m}$ 和 $430 \mu\text{m}$,假设两光栅中均为基模与 HE_{15} 模耦合,其传输损耗峰的中心波长分别为 1574 nm 和 1593 nm ,级联光纤长度为 2 mm 。改变包层模衰减因子 α_2 ,其光谱的变化如图 4 所示。定义 $\gamma = \exp(-\alpha_2 d)$ 为损耗系数。图 4 中用 $\text{LPG}_1 + \text{LPG}_2$ 来表示两个光谱的非相干叠加, cascaded LPG 表示级联长周期光栅的光谱, LPG_1 和 LPG_2 分别表示组成级联长周期光栅的两光栅本身的光谱。由图 4 可以看出,当损耗系数大于 $1/e^2$ 时,两光栅光谱的非相干叠加与级联长周期光栅光谱有较大差异;当损耗系数继续减小时,级联长周期光栅的光谱基本上和两光栅非相干叠加的光谱重合。

出现这一现象的原因主要在于:如果入射光通

过 LPG_1 后产生的包层模 LP_{0m} 在级联光纤中的损耗特别大,以至于在 LPG_2 的入口处包层模 LP_{0m} 近似为 0,那么就可以认为进入 LPG_2 的只有基模。由(15)式可以看出,这样的级联光栅可以看作两个光栅光谱的非相干叠加;当损耗不太大时, LPG_1 产生的包层模 LP_{0m} 不可以忽略,因此第二级光栅 LPG_2 的输入光中既有基模又有包层模,其输出光谱不是两个光栅光谱的非相干叠加。

为了级联光栅光谱的设计方便,希望级联光栅的光谱是各个光栅光谱的非相干叠加。这样可以分别调节每个光栅的参量,而不会对其他光栅光谱产生影响。基于以上对损耗系数的讨论,只要增大级联光纤包层模的损耗系数就可以实现各个长周期光栅光谱的非相干叠加。实际上由于光纤包层表面在制造时总会存在缺陷,当级联光纤长度超过 1 cm

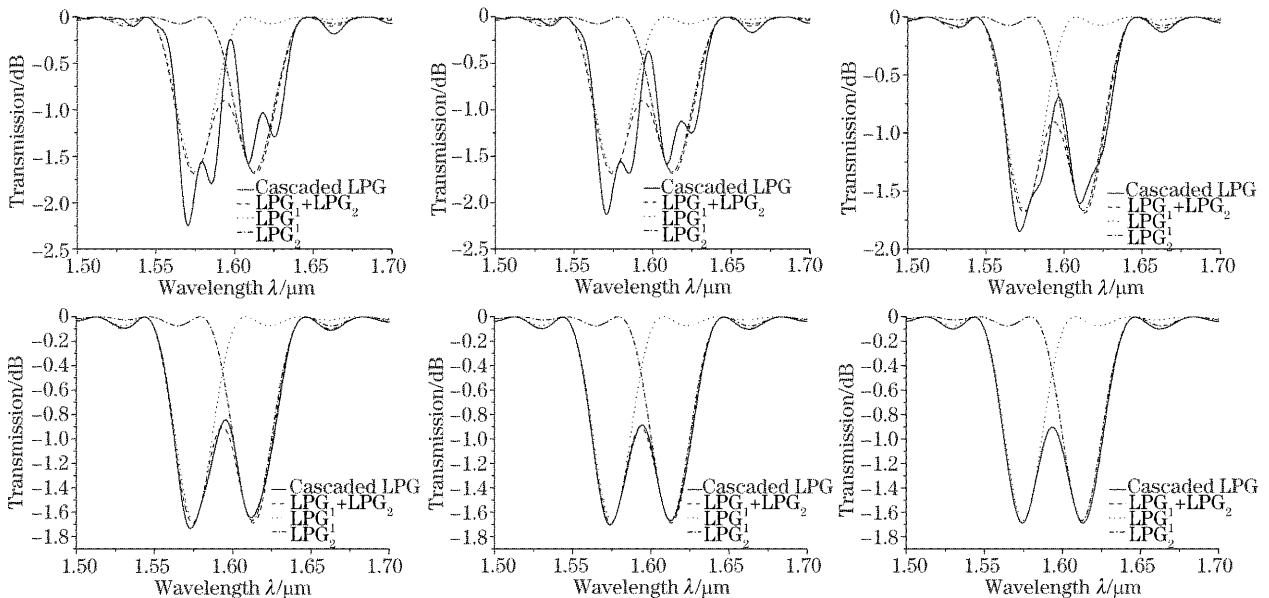


图 4 级联处光纤不同损耗系数对应的级联长周期光栅光谱

Fig. 4 Calculated transmission spectra of cascaded LPG with different loss coefficient

时,包层模就会有大的衰减^[16]。

级联长周期光栅类似于一个以两侧长周期光栅为耦合器,中间光纤的纤芯和包层为两臂的马赫-曾德尔干涉仪^[16~19]。当然,长周期光栅是一种比较特殊的耦合器,对其级联光谱特性的分析仅用马赫-曾德尔干涉仪是不够的,尤其是当光栅情况比较复杂,比如非均匀光栅的情况下,还是需要传输矩阵法和耦合模理论进行分析。

4 结 论

利用传输矩阵法分析了级联处的光纤长度、位置以及包层模损耗系数对级联长周期光栅的光谱的影响。当级联长周期光栅中的级联光纤长度与光栅周期相当时,其透射光谱等效于相移大小为 $2\pi d/\Lambda$ 的相移光栅的透射光谱;级联光纤长度较长时透射光谱中具有多个线宽窄、高精细度的透射峰。但无论其透射峰的形状如何改变,中间光纤长度的改变并不会导致透射峰总能量的改变。当级联光纤位置从中间向两侧移动,级联长周期光栅的光谱出现很强的规律性:损耗峰数逐渐减少,直到变为单峰的均匀光栅光谱。级联光纤的包层模损耗系数对级联长周期光栅光谱也有很大的影响:当损耗系数逐渐变大时,级联光谱逐渐变为两个光栅光谱的非相干叠加,从而为长周期光栅增益均衡器的光谱优化设计和制作提供了方便。

参 考 文 献

- 1 A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins *et al.*. Long period fiber grating based gain equalizers[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(5): 336~338
- 2 B. Malo, K. A. Vineberg, K. O. Hill *et al.*. Efficient mode conversion in telecommunication fiber using externally written grating[J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(16): 1270~1272
- 3 A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 58~64
- 4 F. Bilodeau, K. O. Hill *et al.*. Efficient narrowband LP₀₁~LP₀₂ mode convertors fabricated in photosensitive fibre: Spectral response[J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(8): 682~684
- 5 Huang Nairong, Wang Qian, He Sailing. A study on the relation between the characteristics and the structural parameters for a long-period fiber grating[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2001, **8**(12): 831~835 (in Chinese)
- 6 黄耐容,王 谦,何赛灵. 长周期光纤光栅光谱响应与结构参量关系的研究[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(8): 831~835
- 6 Chen Genxiang, Liu Chunling, Li Tangjun *et al.*. Study on long-period fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **5**(20): 624~628 (in Chinese)
- 7 陈根祥,刘春宁,李唐军 等. 长周期光纤光栅的研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(5): 624~628
- 7 I. Riant, L. Gasca, L. Gasca *et al.*. Gain equalization with optimized slanted Bragg grating on adapted fiber for multichannel long-haul submarine transmission[C]. *OFC'99*, 1999, THJ6-1: 147~149
- 8 Kristin Lewotsky. Long-period gratings flatten fiber-amplifier gain[J]. *Laser Focus World*, 1996, **32**(4): 34~37
- 9 Paul F. Wysocki, Justin B. Judkind, Rolando P. Espindola *et al.*. Broad-band erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period grating filter[J]. *IEEE, Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(10): 1343~1345
- 10 J. R. Qian, H. F. Chen. Gain flattening fiber filters using phase-shifted long period fibre gratings [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(11): 1132~1133
- 11 H. Ke, K. S. Chiang, J. H. Peng. Analysis of phase-shifted long-period fiber gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(11): 1596~1598
- 12 L. R. Chen. Design of flat-top bandpass filters based on symmetric multiple phase-shifted long-period fiber gratings[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **205**: 271~276
- 13 L. Tallone, L. Boschis, L. Gognolato *et al.*. Narrow-band rejection filters through fabrication of in-series long-period gratings[C]. *Opt. Fiber Commun. Conf.*, 1997. 175
- 14 Byeong Ha Lee, J. Nishii. Notch filters based on cascaded multiple long-period fibre gratings[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(19): 1872~1873
- 15 Y. Liu, J. A. R. Williams, L. Zhang *et al.*. Phase shifted and cascaded long-period fiber gratings[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **164**: 27~31
- 16 O. Duhem, J. F. Henninot, M. Douay *et al.*. Study of in fiber Mach-Zehnder interferometer based on two spaced 3-dB long period gratings surrounded by a refractive index higher than that of silica[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **180**: 255~262
- 17 E. M. Dianov, S. A. Vasiliev, A. S. Kurkev *et al.*. In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on a pair of long-period gratings[C]. *Proc. ECOC '96*, 1996, **1**: 65~68
- 18 Xiao Yueyu, He Sailing. The design of cascaded Mach-Zehnder interferometer filter based on digital filter technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 346~350 (in Chinese)
- 19 肖悦悦,何赛灵. 一种级联马赫-曾德尔滤波器设计的新方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 346~350
- 19 Cai Haiwen, Huang Rui, Qu Ronghui *et al.*. All fiber interleaved filter using Mach-Zehnder-based sampled fiber gratings[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(3): 243~246 (in Chinese)
- 蔡海文,黄 锐,瞿荣辉 等. 基于马赫-曾德尔干涉仪和取样光纤光栅的全光纤梳状滤波器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(3): 243~246