

相移对级联长周期光纤光栅传输特性的影响

杨颖^{1,2}

(1. 临沂大学信息学院, 山东 临沂 276005; 2. 上海理工大学光电功能薄膜传感器实验室, 上海 200093)

摘要:基于耦合模理论,采用传输矩阵法分析了相移对级联长周期光纤光栅传输特性的影响。研究表明,当级联光栅间相移量从 0 至 π 变化时,传输谱主阻带左边会出现一个小的阻带,且相移量越大,小阻带的幅值越大。当相移量增大到 π 时,小阻带幅值增大到与原阻带相当;当相移量从 π 增至 2π 时,传输谱主阻带右边会出现一个小的阻带,且相移量越大,小阻带的幅值越小。随相移量的增大,主阻带最大损耗峰对应的谐振波长向长波长方向偏移。调节相移量可灵活地改变主阻带最大损耗峰对应的谐振波长,为新型光纤光栅器件的开发提供新的视角和理论依据。

关键词:长周期光纤光栅;耦合模理论;传输矩阵法;相移;级联

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.10.017

Influence of phase shift on transmission characteristic of cascaded long-period fiber gratings

YANG Ying^{1,2}

(1. School of Electronic Information, Linyi University, Linyi 276005, China; 2. Laboratory of Photo-electric Functional Film Sensors, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Effect of phase shift on transmission characteristics of cascaded long-period fiber gratings is analyzed using transfer matrix methods based on coupled-mode theory. When the phase shift changed from 0 to π , a little stop band appeared on the left of the main stop band. The greater the amount of phase shift, the bigger the amplitude of the small stop band. When phase shift increases to π , amplitude of small stop band is equal to that of the original stop band. When the phase shift changes from π to 2π , a little stop band appeared on the right of the main stop band. The greater the amount of phase shift, the smaller the amplitude of the small stop band. With the increase of the phase shift, the peak of the resonance wavelength of the main stop band shifts to the long wavelength direction. The resonant wavelength can be flexibly changed by adjusting phase shift. The research provides theoretical foundation for the development of new fiber grating devices.

Key words: long-period fiber grating; coupled-mode theory; transmission matrix method; phase-shift; cascaded

1 引言

长周期光纤光栅(LPFG)是一种新型光纤无源器件, T. Erdogan 从模式耦合的角度深入研究了 LPFG 的光谱特性, 奠定了 LPFG 的理论基础^[1]。目前, 周期为几十至几百微米的 LPFG, 由于其在光纤通信和光纤传感领域中存在重要的应用价值, 已成为一个新的研究热点^[2-3]。但由于均匀长周期光栅

带宽较宽, 并且其传输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和光栅长度等参量来调整损耗峰的中心波

作者简介: 杨颖(1970-), 女, 副教授, 博士研究生, 主要从事光电子技术、光纤传感理论及应用方面的研究。E-mail: lysyyy168@126.com

收稿日期: 2011-04-19

长、强度和带宽,光谱设计缺乏灵活性。近年来,级联 LPFG 由于其光谱调节的灵活性,引起了人们极大关注。E M Dianov 等人设计了 LPFG 的 Mach-Zender 干涉仪结构^[4],此后基于级联 LPFG 的无源器件不断出现。本文采用传输矩阵法,对级联 LPFG 兼有相移时的光谱特性进行分析,得到相移对其透射谱影响的规律。由于兼有相移的级联光纤光栅具有灵活的光谱调节功能,可广泛应用于窄带滤波器、波分复用系统、全光调制系统和光纤光栅传感器等领域^[5],所以研究相移对级联光纤光栅的光谱特性的影响对于新型光纤光栅器件的开发具有重要意义。

2 级联长周期光纤光栅的理论

图 1 为 LPFG 的结构示意图,光纤纤芯外有一内包层,周围环境看作厚度无限大的外包层。

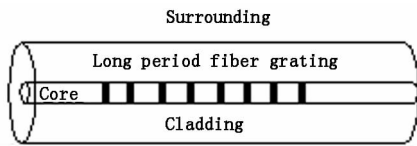


图 1 长周期光纤光栅结构模型

级联 LPFG 是由若干个(两个以上)均匀 LPFG 用光纤联结而成的一种光纤光栅结构,如图 2 所示。其工作原理为:当光波通过 LPFG1 时,其中一部分能量被耦合到包层中,由于级联光纤的长度有限,包层部分的光能量衰减有限,所以光波在通过 LPFG2 时,包层部分的光能量还会被耦合到光纤中来,并且与原来光纤内的光相互作用,从而使其具有与均匀 LPFG 完全不同的传输特性^[6]。

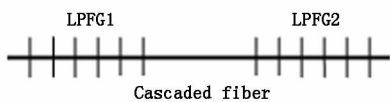


图 2 级联长周期光纤光栅示意图

长周期光纤光栅的耦合模方程为:

$$\begin{bmatrix} r \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_2 & s_2 \\ s_2 & r_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(i\varphi/2) & 0 \\ 0 & \exp(i\varphi/2) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp[i\pi(n_{co} - n_{cl}^{\nu})d/\lambda] & 0 \\ 0 & \exp[-i\pi(n_{co} - n_{cl}^{\nu})d/\lambda] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r_1 & s_1 \\ s_1 & r_1^* \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, r_1 和 s_1 , r_2 和 s_2 分别表示 LPFG1 和 LPFG2 的 ν 次包层模和纤芯模的振幅,可根据式(4)和式(5)求出; d 表示两级联光栅之间的距离; φ 表示两段均匀 LPFG 之间的相移。利用 LPFG 的平行传输率公式 $T = |r|^2$, 可得级联 LPFG 的传输率 T 为:

$$T = |\exp\{i[2\pi(n_{co} - n_{cl}^{\nu})d/\lambda + \varphi]\}r_1r_2 + s_1s_2|^2 \quad (7)$$

3 级联长周期光纤光栅的传输谱分析及数值模拟

3.1 无相移时级联长周期光纤光栅传输谱特性

两段均匀长周期光纤光栅 LPFG1 和 LPFG2 计算所采用的光纤参数为:纤芯半径 $a_1 = 2.625 \mu\text{m}$,

$$\frac{dR}{dz} = i\hat{\sigma}R(z) + i\kappa S(z) \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dz} = -i\hat{\sigma}S(z) + i\kappa^* R(z) \quad (2)$$

其中, R, S 分别为纤芯模和包层模的传输振幅; $\hat{\sigma} = \delta_{1\nu-11}^{cl-co} + \frac{\kappa_{11-11}^{cl-cl} + \kappa_{11-11}^{co-co}}{2}$ 是直流自耦合系数,其中 $\delta_{1\nu-11}^{cl-co}$ 是纤芯模与一阶 ν 次包层模间的解调参量:

$$\delta_{1\nu-11}^{cl-co} = \frac{1}{2}(\beta_{11}^{co} - \beta_{1\nu}^{cl} - \frac{2\pi}{\Lambda}) = \frac{1}{2}[\frac{2\pi}{\lambda}(n_{co} - n_{cl}^{\nu}) - \frac{2\pi}{\Lambda}] \quad (3)$$

其中, $\beta_{11}^{co}, \beta_{1\nu}^{cl}$ 分别为纤芯模与 ν 阶包层模的传输常数; n_{co}, n_{cl}^{ν} 分别为芯模与 ν 阶包层模的有效折射率; Λ 为光栅周期; $\kappa_{11-11}^{co-co}, \kappa_{11-11}^{cl-cl}$ 分别为纤芯和包层模的自耦合系数; $\kappa = \frac{1}{2}\kappa_{1\nu-11}^{cl-co} = \frac{1}{2}\kappa_{1\nu-11}^{cl-co*}, \kappa_{1\nu-11}^{cl-co}$ 为纤芯模与一阶 ν 次包层模之间的互耦合常数;对于均匀光栅, $\hat{\sigma}$ 和 κ 均为常数。

对一段长为 L 的均匀 LPFG, 设其分布在 $0 - L$, 在其起始端 $z = 0$ 处, 由于芯层模在此处并未与包层模发生耦合, 所以有 $R(0) = 1, S(0) = 0$ 。根据边界条件, 一阶线性方程组(1)、(2)的特解, 即均匀 LPFG 的纤芯模传输振幅和包层模传输振幅, 分别用 r 和 s 表示, 表达式为:

$$r = \cos(\sqrt{\hat{\sigma}^2 + \kappa^2}L) + \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 + \kappa^2}}\sin(\sqrt{\hat{\sigma}^2 + \kappa^2}L) \quad (4)$$

$$s = \frac{\kappa}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 + \kappa^2}}\sin(\sqrt{\hat{\sigma}^2 + \kappa^2}L) \quad (5)$$

将 LPFG1 和 LPFG2 级联后, 某特定阶次(ν 次)包层模的传输振幅 r 和纤芯模的传输振幅 s 可由下式求得:

包层半径 $a_2 = 62.4 \mu\text{m}$, 纤芯折射率 $n_1 = 1.458$, 包层折射率 $n_2 = 1.45$, 环境折射率 $n_3 = 1$, 光栅长度 $L_1 = L_2 = 0.9 \text{ cm}$, 纤芯平均折射率的改变量 $\sigma = 0.0004$, 光栅中心周期 $\Lambda = 520 \mu\text{m}$ 。

无相移时, 连接 LPFG1 和 LPFG2 的光纤长度对级联 LPFG 的传输谱有较大影响。图 3 为无相移时级联 LPFG 的传输谱。可以看出, 当级联光纤长度 d 为 0 或 Λ 时, 传输谱中只出现一个损耗峰; 当 d 逐渐增大到 0.2Λ 或 1.2Λ 时, 传输谱主阻带左侧出现了一个小的阻带, 同时损耗峰对应的谐振波长向

右发生了 12.2 nm 的偏移;当 d 继续增大到 0.5Λ 时,传输谱中的损耗峰分裂成两个对称的损耗峰,如图 3(a) 所示;当 d 逐渐增大到 0.8Λ 时,传输谱主阻带右侧出现了一个小的阻带,同时损耗峰对应的谐振波长向左发生 12.2 nm 的偏移。即当级联光纤长度较小时(与光栅周期 Λ 相比),若 d 为光栅周期 Λ 的整数倍时,传输谱中只出现一个损耗峰;若 d 为光栅半周期 Λ 的整数倍时,损耗峰分裂成两个均匀对称的损耗峰,如图 3(b) 所示;当级联光纤长度较大时(几十个周期 Λ),级联 LPFG 的传输谱中会出现间隔均匀、线宽窄的多个损耗峰,如图 3(c)、图 3(d) 所示。

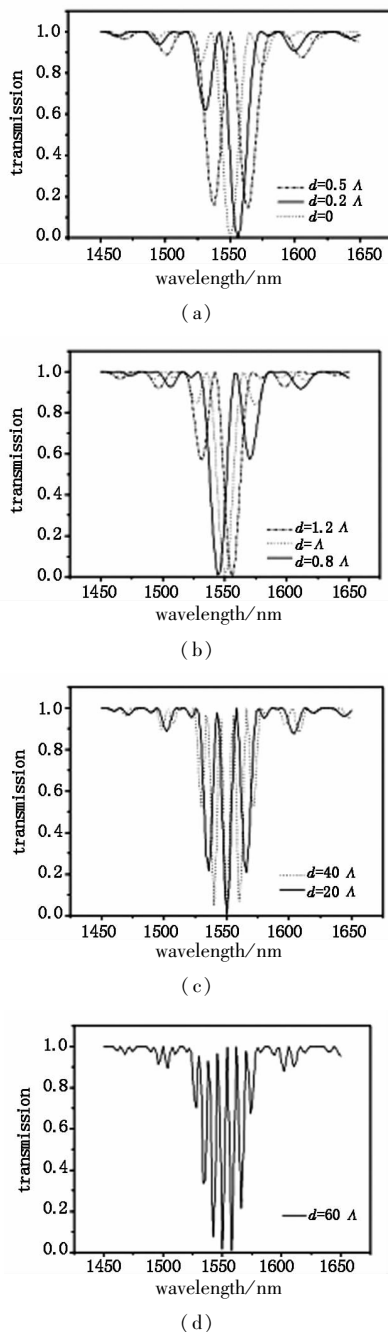


图 3 无相移时级联 LPFG 的传输谱

3.2 相移对级联长周期光纤光栅透射谱的影响

实际制作过程中,第二段光纤光栅相对于第一段很有可能会有一定的初始位相,即相移量,对透射谱会产生一定的影响。图 4 模拟了 $d = 2 \Lambda$ 时级联光纤长度为 2 个光栅周期且相移量从 0 开始每次递增 $\pi/4$ 至 2π 时的传输谱。可以看出,当相移量在 $0 \sim \pi$ 范围内时,传输谱主阻带左侧出现了一个小的阻带,且相移量越大,小阻带的幅值越大,如图 4(a)、图 4(b) 所示。当相移量继续增大到 π 时,小阻带幅值增大到与原阻带相当,这时传输谱分裂成

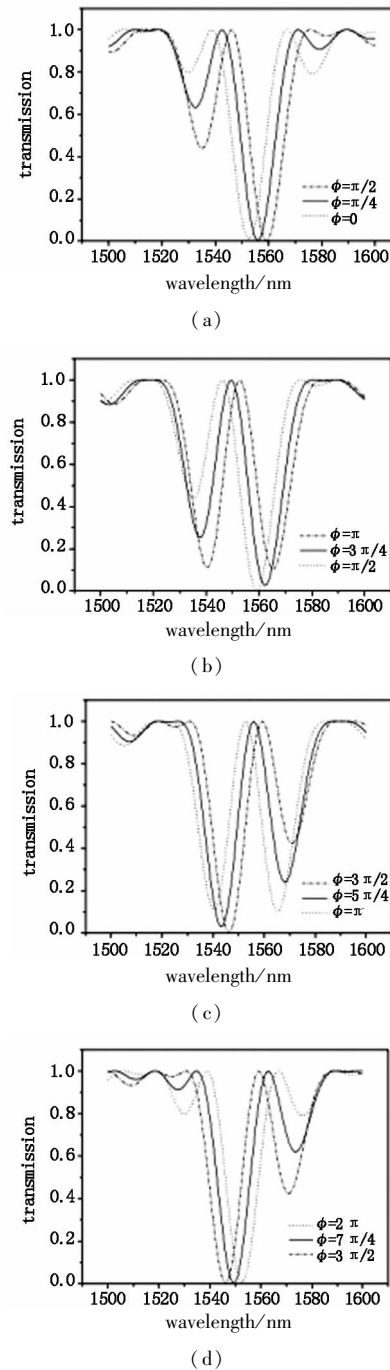


图 4 相移量不同时级联 LPFG 的传输谱

两个完全相同的对称的阻带;当相移量继续增大 2π 时,小阻带又移到了主阻带右侧,且相移量越大,小阻带的幅值越大,当相移量继续增大到 2π 时,小阻带幅值再次与原阻带相当,传输谱再次呈现出对称结构,此时的传输谱与相移量为 0 的传输谱重合,并与均匀光栅的传输谱完全一致,如图 4(c)、图 4(d)所示。在相移量变化的同时,透射谱中最大损耗峰对应的谐振波长也作相应的偏移。

4 结论

用传输矩阵法分析了相移对级联 LPFG 的传输谱特性的影响,当两级联光栅间无相移时,级联光纤长度对传输谱有较大影响。当级联光纤长度较小时(小于几个光栅周期 Λ),传输谱中损耗峰的位置、损耗峰的数目会随光纤长度发生周期性变化;级联光纤长度较大时(几十个光栅周期 Λ),传输谱中会出现间隔均匀、线宽窄的多个损耗峰。当级联光栅间有相移时,传输谱会随相移量发生周期性变化。当级联光栅间相移量从 0 至 π 变化时,传输谱主阻带左边会出现一个小的阻带,且相移量越大,小阻带的幅值越大。当相移量增大到 π 时,小阻带幅值增大到与原阻带相当;当相移量从 π 至 2π 变化时,传输谱主阻带右边会出现一个小的阻带,且相移量越大,小阻带的幅值越小。同时随相移量的增大,主阻带最大损耗峰对应的谐振波长向长波长方向偏移。在实际应用中,可以通过调节级联光纤的长度和级联光栅的相移量灵活地改变光纤光栅的光谱特

性。该研究为长周期光纤光栅在光纤通信和光纤传感领域中新器件的开发提供了理论依据。

参考文献:

- [1] T Erdogan. Fiber grating spectra [J]. J. Lightwave Technol., 1997, 15(8): 1277 - 1294.
- [2] M Hernaez, C R Zamarreo, I Del Villar, et al. Optical fiber humidity sensor based on lossy mode resonances [J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2009, 10(4): 653 - 660.
- [3] Diana Viegas, Javier Goicoechea, José Luís Santos. Sensitivity improvement of a humidity sensor based on silica nanospheres on a long-period fiber grating [J]. Sensors, 2009, 9: 519 - 527.
- [4] Dianov E M, Vasiliev S A, Kurkev A S, et al. In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on a pair of long-period gratings [C] // Proc. ECOC'96, 1996, 1: 65 - 68.
- [5] Zhong Qiyuan, Huang Xianxiang, Tan Lilong, et al. Effect of laser noise on the precision of fiber Bragg grating demodulation [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(9): 956 - 960. (in Chinese)
仲启媛, 黄先祥, 谭立龙, 等. 光源噪声对光纤光栅解调精度的影响 [J]. 激光与红外, 2009, 39(9): 956 - 960.
- [6] B H Lee, Y J Kim, Y Chung, et al. Analytic solution for cascaded long-period fiber gratings, Ieice Trans. Commun, 2001, E84-B(5): 1247 - 1254.