

文章编号: 0258-7025(2005)03-0427-04

长周期莫尔光栅的理论研究

高 侃, 周赢武, 瞿荣辉, 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 长周期光纤光栅作为一种损耗型的带阻滤波器, 在光纤通信和光纤传感器领域有着广泛的应用。结合长周期光纤光栅的传输特性, 利用传输矩阵法对多种长周期莫尔光栅的透射谱进行了理论模拟。分析结果表明, 莫尔光栅技术在制作高性能的相移长周期光栅和变迹长周期光栅上有着很好的应用前景。

关键词 集成光学; 长周期光纤光栅; 莫尔光栅效应; 相移光栅; 变迹光栅

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Theoretical Analysis of Long-Period Moiré Gratings

GAO Kan, ZHOU Ying-wu, QU Rong-hui, FANG Zhu-jie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract As a kind of band-rejected loss filter, long-period fibre gratings have wide applications in the field of fibre communication and fibre sensing. Combined with the transmission characteristics of long-period fibre gratings, the transmission spectrums of various long-period moiré gratings were simulated by the method of transfer Matrix. The results of analysis indicate that the moiré gratings technology can be well applied in fabricating the high-performance phase-shifted and apodised long-period fibre gratings.

Key words integrated optics; long-period fiber gratings; Moiré gratings effect; phase-shifted gratings; apodised gratings

1 引 言

莫尔光纤光栅 (Moiré fiber grating) 是利用光学中的莫尔光栅效应, 在写入光纤光栅的过程中, 对一段光纤进行两次不同周期的曝光, 在光纤的轴向形成具有缓变包络的快变折射率调制。很多文献报道了光纤莫尔光栅的原理和制作方法^[1~5]。为了获得窄线宽的带通滤波器, 人们将莫尔光栅技术应用于布拉格光栅。利用折射率调制在缓变包络的零点处发生的 π 相移, 制作出具有微米量级的窄线宽相移光栅^[2]。同时文献^[4]报道了利用莫尔光栅效应来实现布拉格光栅的变迹, 减小反射峰的旁瓣, 提高光栅的性能。

长周期光纤光栅作为一种损耗型的带阻滤波器, 由于其带宽大, 背向反射小, 对温度、应力、弯曲、折射率等因素变化反应灵敏, 制作方便等特点在光纤通信和光纤传感领域有着广泛的应用。本文将莫尔光栅技术应用于长周期光纤光栅的制作, 结合长

周期光纤光栅的传输特性, 利用传输矩阵法对多种长周期莫尔光栅的透射谱进行了理论模拟。模拟结果表明将莫尔光栅技术应用于长周期光纤光栅可以得到一些类似于布拉格莫尔光栅的效应。同时由于耦合机理的不同, 长周期莫尔光栅又将呈现出一些新的特点。

2 莫尔光栅的形成机理

长周期光纤光栅的折射率分布可用下式近似^[6]

$$n(z) = n_{\infty} + \delta n \left[1 + m \cos \left(\frac{2\pi}{\Lambda} \cdot z + \varphi \right) \right], \quad (1)$$

式中 n_{∞} 为未曝光前光纤芯部的折射率, δn 为曝光后产生的平均折射率的改变量, m 为折射率调制的对比度, φ 为曝光的初相位, Λ 为光栅的周期。利用两块周期分别为 Λ_1 和 Λ_2 的振幅掩模板在同一段光纤上两次曝光, 则光纤芯部的折射率变化为

收稿日期: 2003-11-11; 收到修改稿日期: 2004-03-30

作者简介: 高 侃 (1975—), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事光纤光栅在光通信和光传感领域的应用研究。E-mail: gaokan@mail.siom.ac.cn

$$n(z) = n_{co} + \delta n_1 \left[1 + m_1 \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_1} \cdot z + \varphi_1\right) \right] + \delta n_2 \left[1 + m_2 \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_2} \cdot z + \varphi_2\right) \right], \quad (2)$$

令 $\delta n_1 = \delta n_2 = \delta n$, $m_1 = m_2 = 1$, 则(1)式可化简为

$$n(z) = n_{co} + 2 \cdot \delta n + 2 \cdot \delta n \cdot \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda_c} + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda_s} + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right), \quad (3)$$

式中 $\Lambda_c = \frac{2\Lambda_1\Lambda_2}{\Lambda_1 + \Lambda_2}$, $\Lambda_s = \frac{2\Lambda_1\Lambda_2}{\Lambda_2 - \Lambda_1}$ 。从(2)式可以看出,两次写入光栅的结果相当于有如下的折射率调制(不包含折射率本底的增量)

$$\delta n(z) = 2\delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda_c} + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \times \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda_s} + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right), \quad (4)$$

从公式(4)可以看到,折射率沿光纤轴向是一个具有慢变包络(周期为 Λ_s)的快变结构(周期为 Λ_c)。

3 传输矩阵法

分析一些不均匀光纤光栅的光谱特性时通常采用传输矩阵法,即将光栅区分作多段来考虑,而每一小段光栅认为是均匀的。算出每一小段光栅的传输矩阵,将这些矩阵相乘就可以得到整个光栅区的传输矩阵,最终得到光栅的传输特性。每小段均匀长周期光栅的传输矩阵可以表示如下

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} t_i & r_i \\ r_i & t_i^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(S_i L_i) + i \frac{\delta_i}{S_i} \sin(S_i L_i) & i \frac{\kappa_i}{S_i} \sin(S_i L_i) \\ i \frac{\kappa_i}{S_i} \sin(S_i L_i) & \cos(S_i L_i) - i \frac{\delta_i}{S_i} \sin(S_i L_i) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 L_i 为每小段光栅的长度, $S_i = \sqrt{\kappa_i^2 + \delta_i^2}$, κ_i 为纤芯模和特定阶次包层模的耦合系数,它与每小段光栅区的折射率调制有关。 $\delta_i = 0.5(\beta_{core} - \beta_{clad}^m - 2\pi/\Lambda_i)$, β 为模式的传播常数, β_{core} 为纤芯模的传播常数, β_{clad} 为包层模的传播常数, Λ_i 为光栅的周期。如果在光栅区中引入相移,那么相移的矩阵可以表示为

$$\mathbf{N}_i = \begin{bmatrix} e^{i\phi/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi/2} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中 ϕ 为相移量。将光栅的输入端的纤芯模能量归一化为 1, 而包层模的能量为 0, 就可以通过将这些矩阵的乘积与入射光矩阵相乘得到整个光栅区的传

输特性

$$\begin{bmatrix} t \\ r \end{bmatrix} = \left(\prod_{i=1}^n \mathbf{M}_i \mathbf{N}_i \right) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

光栅最终的光强透过率为 $T = t \times t^*$ 。

4 莫尔光栅用作相移光栅

长周期的相移光栅已经被很多的学者所研究^[7]。通过控制相移量的大小、相移点的个数及其位置,能够灵活地改变长周期光栅谐振峰的形状以满足特殊谱形(例如掺铒光纤放大器(EDFA)增益反转谱)的要求。制作相移光栅的方法有很多种,常见的有遮挡法^[8]、两次曝光法^[9]。这些方法都具有其各自的优点和不足之处。利用莫尔光栅效应制作相移光栅的方法能够准确地控制其相移量等于 π , 这是其一个突出的优点。

从公式(4)可以看到,由于正负符号的原因,折射率调制会在缓变函数的零点处发生一次 π 相移。通过改变 $\Lambda_1, \Lambda_2, \varphi_1, \varphi_2$ 的大小,就可以调节相移点的个数及其位置,而相移量准确地等于 π 。下面就产生一个相移点的情况作分析和讨论。

为了使在整个光栅区仅出现一个相移点,莫尔光栅的缓变包络的周期 Λ_s 必须不小于光栅长度 L 。假设光栅位于 $z = 0$ 和 L 之间,要使相移点出现在光栅中点,必须有

$$2\pi L/\Lambda_s + (\varphi_1 - \varphi_2)/2 = \pi/2. \quad (8)$$

在光栅的两个端点,两种典型情况是:

1) $(\varphi_1 - \varphi_2)/2 = 0$ 和 $2\pi L/\Lambda_s + (\varphi_1 - \varphi_2)/2 = \pi$ 。此时在端点处莫尔光栅条纹达到极大值:要求 $\Lambda_s = 2L$, 即莫尔光栅条纹的缓变半周期等于光栅长度。同时要求二组光栅的起始相位差为零。图 1 为相应的折射率调制示意图和利用传输矩阵法模拟出的相应的相移光栅的透射谱。模拟计算时光栅的长度选为 4 cm, 光栅的周期 $\Lambda_1 = 400 \mu\text{m}$, 光栅耦合中心波长选为 1550 nm(纤芯基模与第 4 阶 HE 包层模的耦合), 而 $\delta n = 0.4 \times 10^{-4}$ (以下模拟计算如不特殊说明,都采用此参数)。我们将整个光栅区分为 1000 段,每一个小段的矩阵由于其中折射率调制不同引起耦合系数的不同而有所差异,在第 500 段和第 501 段中间加入了一个 π 的相移矩阵。

2) $(\varphi_1 - \varphi_2)/2 = \pi/2$ 和 $2\pi L/\Lambda_s + (\varphi_1 - \varphi_2)/2 = 5\pi/2$ 。此时在端点处莫尔光栅条纹达到极小值:要求 $\Lambda_s = L$, 即莫尔光栅条纹的缓变周期等于光栅长度,同时二光栅的起始相位差为 π 。图 2 为相应的折

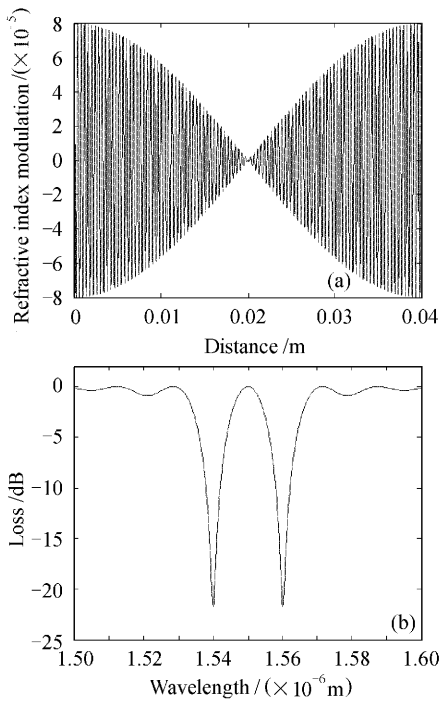


图 1 $\Delta_s = 2L, \varphi_1 - \varphi_2 = 0$ 情况下的折射率调制示意图(a)和相应的光栅透射谱(b)

Fig.1 Modulation of refractive index (a) and the corresponding spectrum (b) when $\Delta_s = 2L, \varphi_1 - \varphi_2 = 0$

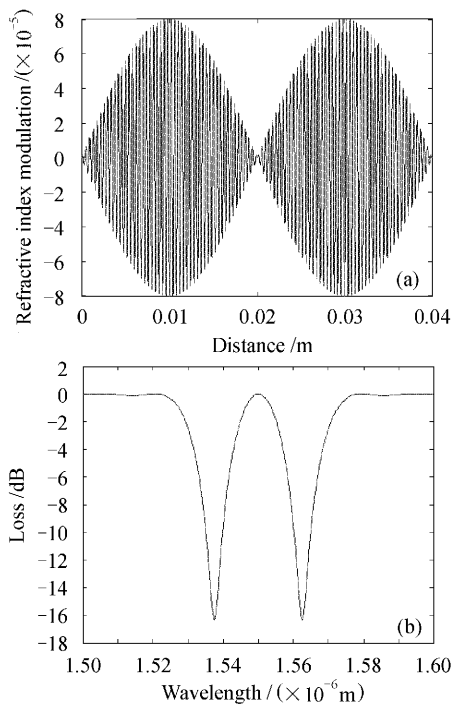


图 2 $\Delta_s = L, \varphi_1 - \varphi_2 = \pi$ 情况下的折射率调制示意图(a)和相应的光栅透射谱(b)

Fig.2 Modulation of refractive index (a) and the corresponding spectrum (b) when $\Delta_s = L, \varphi_1 - \varphi_2 = \pi$ 折射率调制示意图和相移光栅的透射谱。对比第一种

情况下的谱形,可以看到同样是相移光栅,但其旁瓣有了明显的减小(这属于变迹效应)。

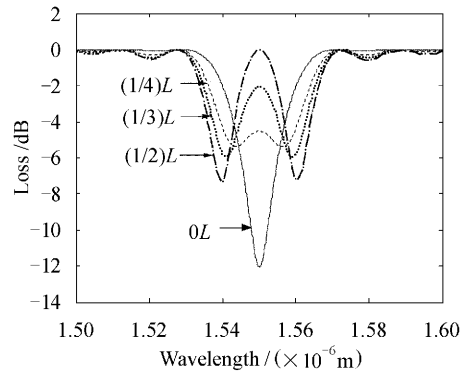


图 3 相移点处于不同位置情况下的透射谱
Fig.3 Spectral responses with phase-shift point at different site

当相移点不处于光栅正中间的时候,光栅的谱会发生相应的变化,主要体现在两个主峰中间透射带透射率的改变。图 3 是在 π 相移点出现在光栅不同位置时候模拟出的不同透射谱。图中所标的值 $0L, (1/4)L, (1/3)L, (1/2)L$ 分别表示相移点离光栅端点的距离,分别对应于 $\varphi_1 = \pi, \varphi_1 = (1/2)\pi, \varphi_1 = (1/3)\pi, \varphi_1 = 0$,而其他条件均一致: $\varphi_2 = 0, \Delta_s = 2L$ 。从图中可以看到,随着相移点逐渐偏离光栅的中心,两峰的距离逐渐靠近,同时 1550 nm 处的损耗逐渐增加。当相移点处于光栅的端点处时,相移光栅也就变成了普通的光栅。

利用莫尔光栅效应通过改变 Δ_2 的大小,同样可以制作出存在多个 π 相移点的长周期光纤光栅。在这种相移光栅的透射谱上总会存在两个比较大的主峰,它们之间的距离会随着相移点个数 N 的增加而增加。而在这两个主峰之间还会出现 $N - 1$ 个小的谐振峰。图 4 是模拟计算出来的 N 分别等于 $1, 2, 3,$

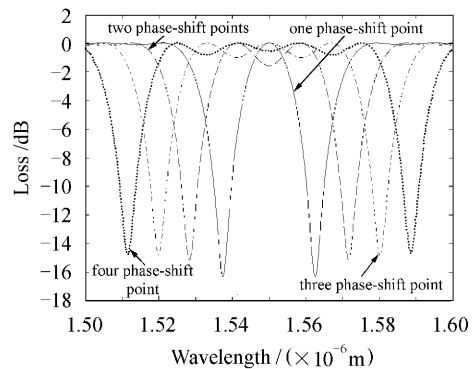


图 4 不同个数相移点情况下的透射谱
Fig.4 Spectral responses with different number of phase-shift points

4 时的相移光栅透射谱。

5 莫尔光栅用作纯变迹光栅

常见的有着均匀方波形折射率调制的长周期光纤光栅由于包含有一些高频的调制分量,主谐振峰的旁瓣一般比较大,而且在一些特定波长处会产生一些高阶包层模的谐振峰。在实际的应用中这些因素会影响到器件的性能。比如在利用长周期光纤光栅对制作特殊波长耦合器的时候,较大的旁瓣会影响到其波长选择性和隔离度。为了尽可能地减小旁瓣与主峰幅值的比例,人们采用了折射率调制的变迹技术^[10]来消除这些高频分量。

同样利用式(4)进行分析,当莫尔光栅条纹的缓变周期 Δ 等于两倍光纤光栅长度,并使莫尔光栅条纹的亮区落在光纤光栅的中部时,光纤光栅的折射率调制幅度的变化呈现一个余弦分布。与通常所采用的升余弦函数不同的是,光纤莫尔光栅的折射率调制同时发生在正负两个方向,因而能够保持纤芯平均折射率不变,实现纯变迹。利用传输矩阵法可以计算出

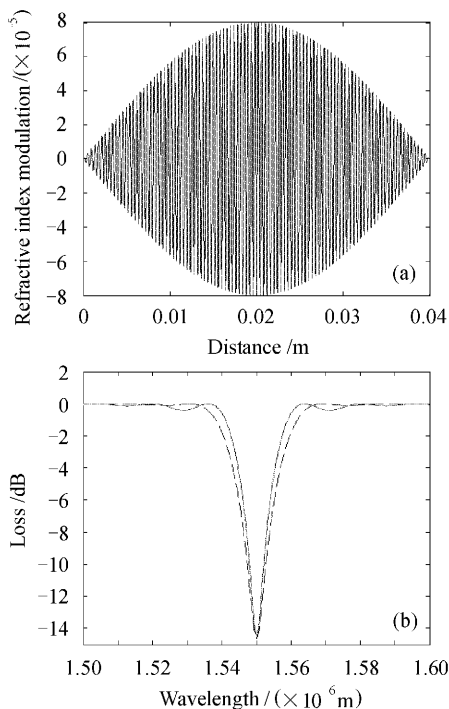


图5 变迹光栅折射率调制示意图(a)和相应的光栅透射谱(b)

实线为未变迹的透射谱,虚线为变迹后的透射谱

Fig. 5 Refractive index modulation of apodised grating (a) and the corresponding spectrum (b) the solid (dashed) line is the spectrum without (with) apodising

这种变迹莫尔光栅的谐振峰谱形。从模拟计算的透射谱(图5)中可以看出,经过莫尔光栅变迹后的谐振峰的旁瓣比均匀的长周期光栅要小很多。

6 结 论

本文从理论上分析了长周期光纤莫尔光栅的特性。模拟分析表明利用莫尔光栅技术可以方便地制作出各种高性能的长周期 π 相移光栅和变迹光栅。制作莫尔光栅的技术有很多种,常见的有拉伸二次曝光法^[2,5]和莫尔光栅相位版法^[11],这些方法都可以应用于长周期莫尔光栅的制作。同时由于长周期光栅的周期比较大,也可以采用逐点写入法。根据实际的制作条件可以选用合适的制作方法。

参 考 文 献

- 1 D. C. J. Reid, C. M. Ragdale, I. Bennion *et al.*. Phase-shifted Moiré grating fibre resonators [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(1):10~12
- 2 Zhou Kaiming, An Guiren, Ge Huang *et al.*. Bandpass filter based on a moiré in-fiber Bragg grating with a stretch and double exposure method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(9):828~832
周凯明,安贵仁,葛 璜 等. 用拉伸和二次曝光法制作基于莫尔光纤光栅的带通滤波器[J]. *光子学报*, 1998, **27**(9):828~832
- 3 L. A. Everall, K. Sugden, J. A. R. Williams *et al.*. Fabrication of multipassband moiré resonators in fibers by the dual-phase-mask exposure method [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(19):1473~1475
- 4 Hans-Georg Fröhlich, Raman Kashyap. Two methods of apodisation of fibre-Bragg-gratings [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **157**:273~281
- 5 Zhao Ling, Li Lin, Qu Ronghui *et al.*. Band-pass filter based on moiré fiber Bragg grating [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2002, **23**(6):408~411
赵 岭,李 琳,瞿荣辉 等. 基于莫尔光纤光栅的带通滤波器[J]. *半导体光电*, 2002, **23**(6):408~411
- 6 Turan Erdogan. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8):1760~1773
- 7 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
- 8 Qu Ronghui, Ding Hao, Zhao Hao *et al.*. Photo-imprinted phase-shifted fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(6):515~518
瞿荣辉,丁 浩,赵 浩 等. 紫外写入移相光纤光栅[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(6):515~518
- 9 J. Canning, M. G. Sceats. π -phase-shifted periodic distributed structures in optical fibres by UV post-processing [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(16):1344~1345
- 10 V. Grubsky, A. Skorucak, D. S. Starodubov *et al.*. Fabrication of long-period fiber gratings with no harmonics [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1):87~89
- 11 J. Albert, K. O. Hill, B. Malo *et al.*. Apodisation of the spectral response of fibre Bragg gratings using a phase mask with variable diffraction efficiency [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(3):222~223