

文章编号: 0258-7025(2009)08-2070-06

相移光纤光栅的反射谱特性分析

蔡璐璐 吴 飞 王玉田

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 应用传输矩阵法对相移光纤光栅(FBG)的反射光谱特性作了详细的理论分析,给出了相应的数学模型,并进行了验证。结果表明,相移的引入导致光纤光栅反射谱产生分裂,分裂点波长与相移大小呈线性正比关系并具有周期性;分裂点反射率与相移位置、光栅中心波长之间具有一定的对称性,且符合双曲正切关系。

关键词 光纤光学; 相移光纤光栅; 传输矩阵; 反射谱; 分裂点; 双曲正切

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093608.2070

Analysis for the Reflective Spectrum Characteristics of Phase-Shifted Fiber Gratings

Cai Lulu Wu Fei Wang Yutian

(College of Electric Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract Based on the transfer matrix method, the reflective spectrum characteristics of the phase-shifted fiber grating are analyzed by detailed theoretic. The corresponding mathematical model is established and validated. It is shown that the phase shift leads to the split of the reflective spectrum of the fiber grating. The wavelength of the split point is linearly and periodical to the phase shift. The reflectivity of the split point is symmetrical to the phase-shifted position and the central wavelength of the fiber grating. And the reflectivity of split point is approximately hyperbolically tangential versus the phase-shifted position.

Key words fiber optics; phase-shifted fiber grating; transfer matrix; reflective spectrum; split point; hyperbolically tangential

1 引 言

近年来,随着光纤光栅(FBG)制作技术的迅速发展,基于相移光纤光栅反射特性的窄带滤波器、窄线宽激光器以及单频光纤激光器等的制作已得到广泛的应用^[1~5]。在工程实际应用中,根据不同需要设计具有不同反射谱的相移光栅显得尤为重要,所以相移光纤光栅特性的研究对于新型光栅制作技术及其应用具有重要的意义^[6~8]。目前,国内外学者对相移光纤光栅的反射谱特性已开展了较多的研究^[9~14]。但已有的文献只是简单地描述了相移大小、相移位置对光栅反射谱的影响,并未给出详细的分析以及相应的数学模型。因此,本文对相移光纤光栅的反射光谱特性作了详细的理论分析,给出了

相应的数学模型,并进行了验证。研究表明,相移的引入导致光纤光栅反射谱产生分裂,分裂点波长与相移大小呈线性正比关系并具有周期性;分裂点反射率与相移位置、光栅中心波长之间具有一定的对称性,且符合双曲正切关系。

2 理论模型

相移光纤光栅的分析采用传输矩阵的方法,如图 1 所示。相移 φ 将光纤光栅分为两部分,第一部分长为 L_1 ,第二部分长为 L_2 。

整个光纤光栅的传输过程可以表示为

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ B_1^* & A_1^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e^{-j\varphi} & 0 \\ 0 & e^{j\varphi} \end{bmatrix}$$

收稿日期: 2008-12-23; 收到修改稿日期: 2009-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(60672015)资助项目。

作者简介: 蔡璐璐(1979-),女,助理研究员,博士研究生,主要从事光纤光栅传感器方面的研究。E-mail: ysu-fbg@163.com

导师简介: 王玉田(1952-),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感方面的研究。

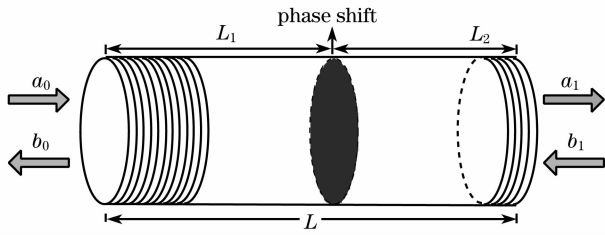


图1 相移光纤光栅计算模型

Fig.1 Illustration of model for phase-shifted fiber grating

$$\begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ B_2^* & A_2^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 φ 为相移的大小。长为 L_i 的光纤光栅传输矩阵

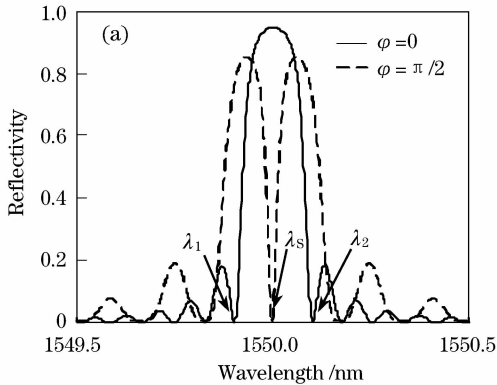
可表示为 $M_i = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ B_i^* & A_i^* \end{bmatrix}$, 这里 $A_i = \cosh(S_i L_i) -$

$j \frac{\Delta\beta_i}{S_i} \sinh(S_i L_i)$, $B_i = -j \frac{k}{S_i} \sinh(S_i L_i)$, $S_i =$

$\sqrt{k^2 - \Delta\beta_i^2}$, 其中 $\Delta\beta_i = \frac{2n_{\text{eff}}\pi}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda}$, Λ 为 FBG 栅距,

k 为耦合系数。

根据其边界特性 $\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 计算可得



$$\begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix} = e^{j\varphi} \begin{bmatrix} A_1 A_2 e^{-j2\varphi} + B_1 B_2^* \\ B_1^* A_2 e^{-j2\varphi} + A_1^* B_2^* \end{bmatrix},$$

因此,相移光纤光栅的反射率 R 可表示为

$$R = |r|^2 = \left| \frac{B_1^* A_2 e^{-j2\varphi} + A_1^* B_2^*}{A_1 A_2 e^{-j2\varphi} + B_1 B_2^*} \right|^2. \quad (2)$$

3 结果与讨论

3.1 分裂点波长与相移大小的关系

相对于均匀光纤光栅,相移光纤光栅的反射谱不再保持单个谐振峰,而是分裂成两个谐振峰,分裂处的凹点即为分裂点 λ_s ,如图 2 所示。

3.1.1 周期性

由图 2(a)可知,分裂点 λ_s 的移动范围是光纤光栅全谱带宽 ($\Delta\lambda_{\text{FBG}} = \lambda_2 - \lambda_1$)。随着相移的增加,分裂点 λ_s 由 λ_1 往长波长方向移动到 λ_2 ,同时反射谱恢复到初始状态,如图 2(b)所示。当分裂点移出全谱带宽范围时,新的分裂点又从 λ_1 开始移动,呈现一定的周期性。

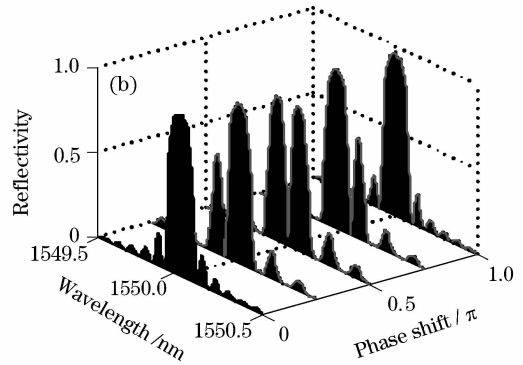


图2 相移光纤光栅反射谱

Fig.2 Spectra for phase-shifted-fiber grating

由(2)式可知,整个相移光纤光栅反射谱的特性受参数 $e^{-j2\varphi}$ 影响,而 $e^{-j2\varphi}$ 项具有周期性,所以若要保证光栅反射谱无变化,相移变化量 $\Delta\varphi$ 只要满足

$$\Delta\varphi = k\pi, \quad k = 1, 2, \dots,$$

因此,可以得到相移光栅反射谱的变化周期为 π 。图 3 描述了相移光纤光栅反射谱的周期性。

图 3(a)中,实线为 $\varphi = \pi/4$ 时的反射谱,虚线为 $\varphi = \pi/4 + \pi = 5\pi/4$ 时的反射谱;图 3(b)分别显示了 $\varphi = \pi/4, \varphi = \pi/4 + \pi, \varphi = \pi/4 + 2\pi$ 的反射谱。由图

可见,相移光纤光栅反射谱具有周期性,当相移量 φ 变化 π 时,光纤光栅的反射谱变化一周。

3.1.2 分裂点波长与相移量的线性关系

在分裂点变化的一个周期内,随着相移量的增加,分裂点从全谱带宽的短波长 λ_1 处往长波长方向 λ_2 处移动,而且分裂点移动的波长与相移量的大小成一定的关系。

由(2)式可知,假设 $A_1 = |A_1| e^{j\varphi_{A1}}, A_2 = |A_2| e^{j\varphi_{A2}}, B_1 = |B_1| e^{j\varphi_{B1}}, B_2 = |B_2| e^{j\varphi_{B2}}$, 则可求得反射率 R 为

$$R = \frac{|A_1|^2 |B_2|^2 + |B_1|^2 |A_2|^2 + 2 |A_1 A_2 B_1 B_2| \cos(\varphi_{A1} + \varphi_{A2} - \varphi_{B1} + \varphi_{B2} - 2\varphi)}{|A_1|^2 |A_2|^2 + |B_1|^2 |B_2|^2 + 2 |A_1 A_2 B_1 B_2| \cos(\varphi_{A1} + \varphi_{A2} - \varphi_{B1} + \varphi_{B2} - 2\varphi)},$$

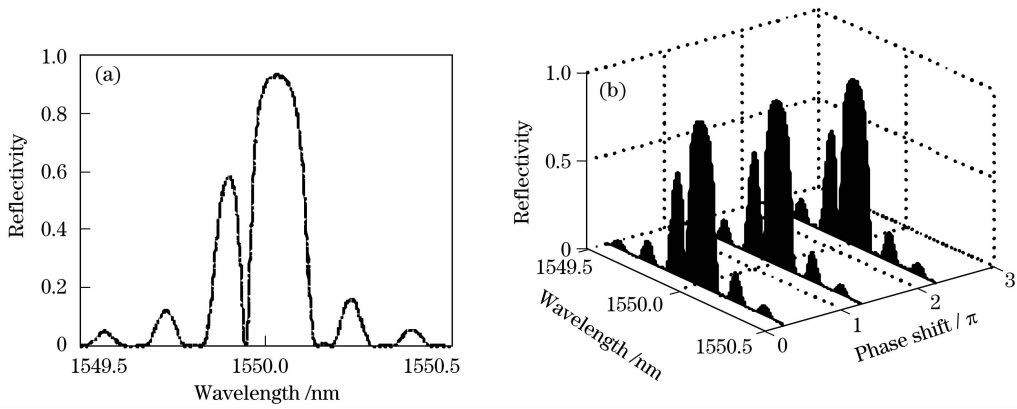


图 3 相移光纤光栅反射谱周期性比较图

Fig. 3 Comparison diagram for phase-shifted fiber grating

设 $\varphi_{\text{FBG}} = \varphi_{A1} + \varphi_{A2} - \varphi_{B1} + \varphi_{B2}$, 则上式可简写为

$$R = \frac{|A_1|^2 |B_2|^2 + |B_1|^2 |A_2|^2 + 2 |A_1 A_2 B_1 B_2| \cos(\varphi_{\text{FBG}} - 2\varphi)}{|A_1|^2 |A_2|^2 + |B_1|^2 |B_2|^2 + 2 |A_1 A_2 B_1 B_2| \cos(\varphi_{\text{FBG}} - 2\varphi)}, \quad (3)$$

式中 B_i 在全谱带宽内为一纯虚数, 即 $\varphi_{B1} = \varphi_{B2} = -\pi/2$, 所以 $\varphi_{\text{FBG}} = \varphi_{A1} + \varphi_{A2}$, 如图 4 所示(虚线为原始光纤光栅反射谱)。

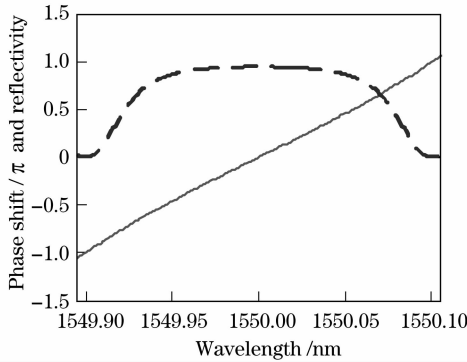


图 4 φ_{FBG} 与光纤光栅反射谱对比

Fig. 4 φ_{FBG} versus reflected spectra of FBG

由图 4 可见, 在全谱带宽内, φ_{FBG} 在 $-\pi \sim \pi$ 范围内与波长近似成线性关系

$$\varphi_{\text{FBG}} = \frac{2\pi}{\Delta\lambda_{\text{FBG}}} (\lambda - \lambda_1) - \pi. \quad (4)$$

由(3)式可知, 分裂点实质上是相移光纤光栅反射谱中的一个极值点, 所以在分裂点 λ_s 处, 必须满足

$$\varphi_{\text{FBG}} - 2\varphi = (2k + 1)\pi, k = 1, 2, \dots$$

考虑一个周期内分裂点移动, 则有分裂点波长 λ_s 与相移 φ 的关系为

$$\lambda_s = \frac{\Delta\lambda_{\text{FBG}}}{\pi} \varphi + \lambda_1, \quad (5)$$

由(5)式可知, 在全谱带宽内, 分裂点的波长移动在

一个周期内与相移光纤光栅的相移量大小成线性正比关系, 如图 5 所示。

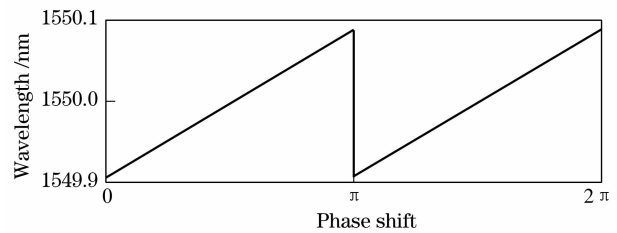


图 5 光纤光栅分裂点波长与相移量大小的关系

Fig. 5 Wavelength variation of the split point versus phase shift

3.2 分裂点反射率与相移位置的关系

相移光纤光栅反射谱的分裂点波长不仅与相移量大小成线性周期关系, 而且分裂点反射率 R_s 还与相移位置有一定的关系, 如图 6 所示(以 L_1 的长度表示相移所处光栅的位置)。

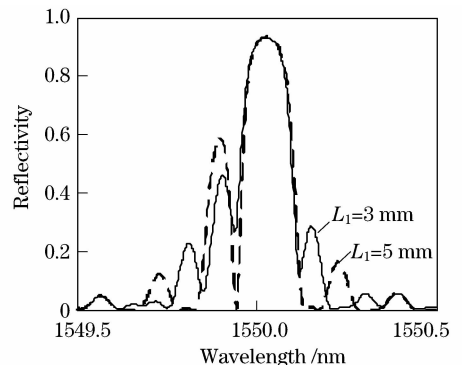


图 6 光栅相移位置不同时的反射光谱

Fig. 6 Spectra of FBG under different phase-shifted position

图 6 描述了光纤光栅相移位置不同时的反射

谱, 光纤光栅参数同上, 虚线是 $L_1=5\text{ mm}$ 时的反射谱, 实线是 $L_1=3\text{ mm}$ 时的反射谱。由图 6 虚线可知, 当相移位置越接近光纤光栅中间位置 ($L=10\text{ mm}$, 中间位置在 5 mm 处) 时, 分裂点的反射率越低。由 (3) 式可知, 当 $\varphi_{\text{FBG}}-2\varphi=(2k+1)\pi$ 时, 就得到了分裂点的反射率 R_S 为

$$R_S = \frac{|A_1|^2|B_2|^2+|B_1|^2|A_2|^2-2|A_1A_2B_1B_2|}{|A_1|^2|A_2|^2+|B_1|^2|B_2|^2-2|A_1A_2B_1B_2|} = \frac{(|A_1B_2|-|B_1A_2|)^2}{(|A_1A_2|-|B_1B_2|)^2}, \quad (6)$$

(6) 式中, 当 $L_1=L_2$, 有 $A_1=A_2, B_1=B_2$ 成立, 所以此时 $R_S=0$, 即相移位置在光栅中间位置时, 分裂点反射率为 0, 而当 $L_1 \neq L_2$, 即相移位置不在光栅中间位置时, 分裂点反射率不为 0。

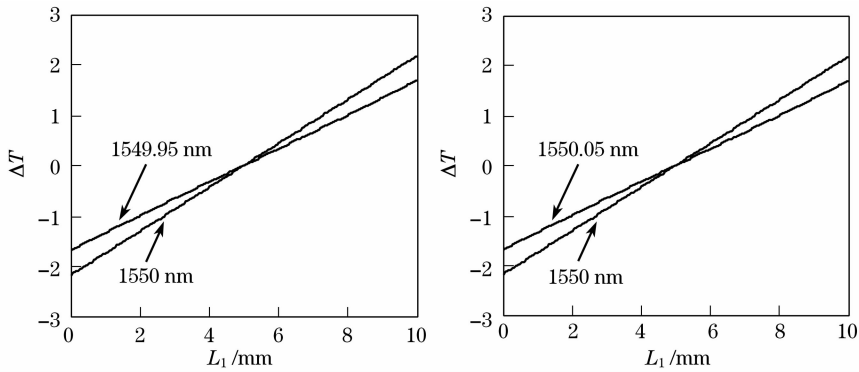


图 7 ΔT 与相移光纤光栅的相移位置关系

Fig. 7 Relationship ship between ΔT and phase shifted position

对图 7 进行数据拟合可得

$$\Delta T(L_1) = \frac{\Delta T(L) - \Delta T(0)}{L} \cdot L_1 + \Delta T(0), \quad (8)$$

对于 T_i 分析可知

当 $L_1=0$ 时, $T_1(L_1)=0, T_2(L_2)=T_2(L-L_1)=T_2(L)$, 所以 $\Delta T(0)=-T_2(L)$; $L_1=L$ 时, $T_1(L_1)=T_1(L), T_2(L_2)=T_2(L-L_1)=T_2(0)=0$, 所以 $\Delta T(L)=T_1(L)-T_2(0)=T_1(L)$ 。而 $T_1(L)=T_2(L)=T(L)=\ln[|A(L)|+|B(L)|]$, 所以 (8) 式可以表示为

$$\Delta T(L_1) = \frac{2T(L)}{L} \cdot L_1 - T(L) = T(L) \frac{L_1 - L_2}{L}, \quad (9)$$

式中 $T(L)$ 是初始光栅的常数, 同时是波长 λ 的函数, 而且关于中心波长 λ_B 对称, 如图 8 所示。

若以光纤光栅中间位置 ($L/2$) 处为坐标原点, 如图 9 所示, 相移光纤光栅反射谱分裂点的反射率与相移位置 X (相对中间位置, $-L/2 \leq X \leq L/2$) 满足关系式

由公式 $\cosh^2(x) - \sinh^2(x) = 1$ 和光纤光栅传输矩阵特性 $|A_i|^2 - |B_i|^2 = 1$, 可以假设 $|A_i| = \cosh(T_i), |B_i| = \sinh(T_i)$, 则 (6) 式可表示为

$$R_S = \tanh^2(T_1 - T_2), \quad (7)$$

式中 $T_1(\lambda, L_1) = \ln(|A_1| + |B_1|), T_2(\lambda, L_2) = T_2(\lambda, L-L_1) = \ln(|A_2| + |B_2|)$ 。

对于不同波长分裂点, $\Delta T = T_1 - T_2$ 与相移所在位置都呈线性关系, 如图 7 所示。而且关于 λ_B 对称波长的 ΔT 与 L_1 的曲线完全相同 (如图 7 中 1549.95 nm 和 1550.05 nm 的曲线), 这主要是由于

$$|A_i| \text{ 和 } |B_i| \text{ 的关系式中的 } \Delta\beta^2 = \left(\frac{2n_{\text{eff}}\pi}{\lambda} - \frac{2n_{\text{eff}}\pi}{\lambda_B} \right)^2 \approx \left[\frac{2n_{\text{eff}}\pi}{\lambda_B^2} (\lambda_B - \lambda) \right]^2 \text{ 关于 } \lambda_B \text{ 对称影响的。}$$

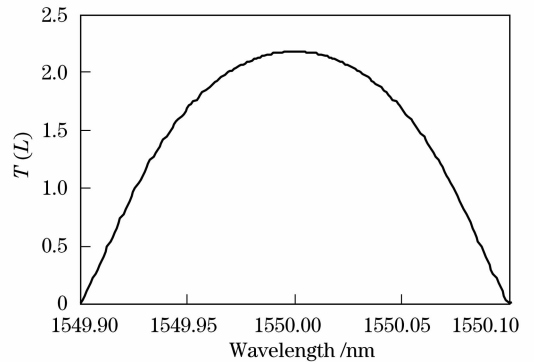


图 8 光纤光栅常数 $T(L)$ 与波长的关系

Fig. 8 Relationship between $T(L)$ and wavelength

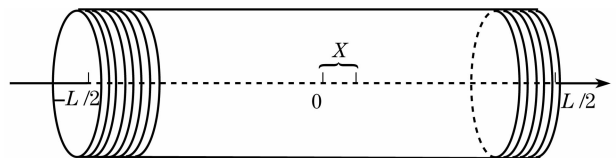


图 9 光纤光栅相移位置坐标示意图

Fig. 9 Coordinate schematic diagram of phase-shifted FBG position

$$R_s = \tanh^2\left(\frac{2T}{L}X\right). \quad (10)$$

图 10 为不同波长的分裂点反射率与相移位置的关系,可以看出,分裂点反射率与相移位置呈

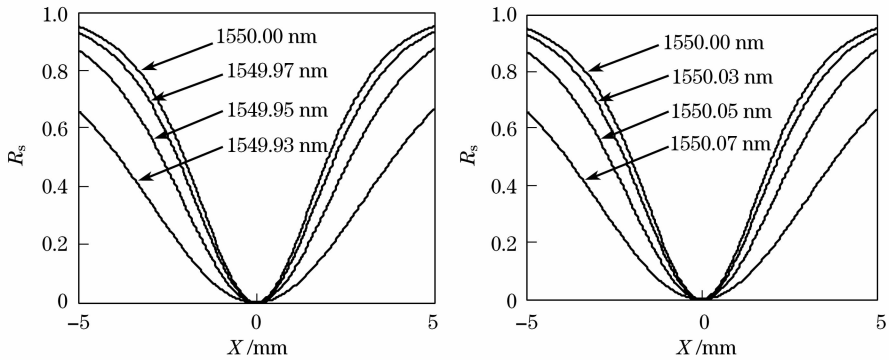


图 10 不同分裂点波长反射率与相移位置的关系

Fig. 10 Relationship between split point reflectivity and phase-shifted position

4 实 验

对于第 3 节分析的相移光纤光栅反射谱特性可以通过光纤光栅横向局部受力实验加以验证,光纤光栅横向局部受力结构如图 11 所示。

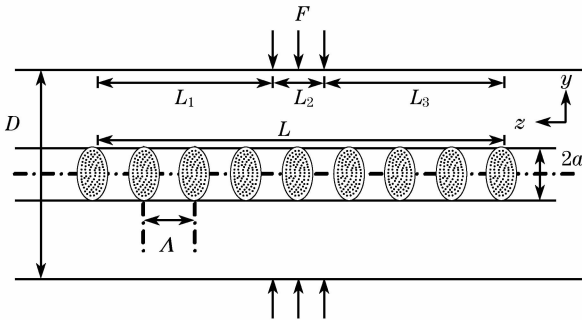


图 11 光纤光栅横向局部受力结构图

Fig. 11 Structural diagram of FBG under local transverse force

当光纤光栅横向局部受力时,长为 L_1 和 L_3 两部分光纤光栅无变化,而长为 L_2 的光纤光栅由于受到横向作用力,其折射率发生变化,导致 $\Delta\beta$ 产生两个正交偏振方向的值 $\Delta\beta_x$ 和 $\Delta\beta_y$,下面以 x 偏振方向反射光谱为讨论对象。

当受力段光纤光栅的长度 $L_2 \ll L$,该段光栅的传输矩阵可以近似为

$$M_2 = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ B_2^* & A_2^* \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} e^{-j\Delta\beta_x L_2} & 0 \\ 0 & e^{j\Delta\beta_x L_2} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\text{式中 } \Delta\beta_x = \frac{2n_{\text{eff}x}\pi}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda} \approx \frac{2(\Delta n_{\text{eff}})_x\pi}{\lambda}.$$

设 $\Delta\varphi = \Delta\beta_x L_2$,则整个光纤光栅的传输过程可以表示为

双曲正切的关系,且关于 $X=0$ 对称;关于 λ_B 对称的两个分裂点波长所对应的 R_s 与 X 的关系完全相同。

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ B_1^* & A_1^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e^{-j\Delta\varphi} & 0 \\ 0 & e^{j\Delta\varphi} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ B_3^* & A_3^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中 $\Delta\varphi = \Delta\beta_x L_2 = \frac{2(\Delta n_{\text{eff}})_x \pi L_2}{\lambda}$,其中 $(\Delta n_{\text{eff}})_x$ 为受力段光栅 x 偏振方向的有效折射率变化量,根据材料力学和光弹效应可得

$$(\Delta n_{\text{eff}})_x = -\frac{n_{\text{eff}}^3 F}{\pi E L_2 D} \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) - [(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}](3 + 2\nu) \}, \quad (13)$$

式中 F 为横向作用力, E 为光纤的杨氏模量, p_{11} 和 p_{12} 为光纤的光弹系数, ν 为泊松比, D 为光纤的直径。

(12)式和(1)式完全相同,而且由(13)式可得 $\Delta\varphi$ 与横向作用力 F 成线性正比关系,所以可以通过分析光纤光栅横向局部作用力 F 对 x 偏振方向的反射谱的影响来验证相移光纤光栅的特性,具体实验结果见文献[15,16]。

5 结 论

运用传输矩阵法对相移光纤光栅的反射谱进行了分析。分析表明,在均匀光纤光栅中引入相移,光栅反射谱产生分裂,分裂点波长与相移量大小成线性周期关系,且反射谱分裂点的反射率与相移位置为双曲正切关系。分析所得结果,可以通过光纤光栅横向局部受力实验加以论证,见文献[15,16]。

参 考 文 献

- 1 Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng. Narrow bandwidth add-drop channel filter based on fiber-Bragg-grating-coupler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):621~625
董小伟,裴丽,简水生. 光纤布拉格光栅耦合器型窄带上下话路滤波器的数值分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):621~625
- 2 Lu Shaohua, Xu Ou, Feng Suchun *et al.*. Design and application of optical filters based on chirped phase-shifted fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9):1675~1680
鲁韶华,许鸥,冯素春等. 基于啾啾相移光纤光栅的滤波器设计及应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9):1675~1680
- 3 Wang Li, Chen Bai, Chen Jialin *et al.*. Fabrication of Yb-doped phase-shifted fiber grating laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1617~1620
王利,陈柏,陈嘉琳等. 一种制作掺 Yb 相移光纤光栅激光器的实验方案[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12):1617~1620
- 4 Chen Jianjun, Xia Guangqiong, Tian Jianfeng *et al.*. An approach to improve switch performance of $\lambda/4$ phase-shifted grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1250~1254
陈建军,夏光琼,田剑锋等. 一种提高 $\lambda/4$ 相移光纤光栅开关性能的方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9):1250~1254
- 5 Chen Xinqiao, Chen Jidong, Luo Fangliang *et al.*. A method to realize optical label switches using Bragg phase-shifted grating [J]. *Study on Optical Communication*, 2001, **27**(5):16~18
陈新桥,陈纪东,罗方亮等. 用布拉格相移光纤光栅实现光标记交换的方法[J]. *光通信研究*, 2001, **27**(5):16~18
- 6 Lu Shaohua, Xu Ou, Dong Xiaowei *et al.*. Analysis for the reflective spectrum characteristics of chirped phase-shifted fiber gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4):577~581
鲁韶华,许鸥,董小伟等. 啾啾相移光纤光栅的反射谱特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4):577~581
- 7 Fan Yi, Chen Heming. Study on transmission spectrum of apodized phase-shifted fiber Bragg grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(6):26~30
范毅,陈鹤鸣. 变迹相移光纤光栅传输谱的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(6):26~30
- 8 Li Jingyi, Rao Yunjiang, Niu Yongchang *et al.*. Phase-shifted long-period fiber grating written by high-frequency CO₂ laser pulses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1):38~40
李景义,饶云江,牛永昌等. 高频 CO₂ 激光脉冲写入的相移长周期光纤光栅[J]. *光子学报*, 2005, **34**(1):38~40
- 9 Zhao Donghui, Yang Xiufeng, Liu Zhiguo *et al.*. Analyses for characteristics of the phase-shifted fiber grating [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 1998, **9**(3):177~180
赵东晖,杨秀峰,刘志国等. 相移光纤光栅的特性分析及其应用[J]. *光电子 • 激光*, 1998, **9**(3):177~180
- 10 Qu Ronghui, Ding Hao, Zhao Hao *et al.*. Effects of grating substructures on the spectral characteristics of fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(5):567~572
瞿荣辉,丁浩,赵浩等. 光栅子结构对光纤光栅特性的影响[J]. *光学学报*, 1998, **18**(5):567~572
- 11 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. 紫外写入相移光纤光栅[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(6):515~518
- 12 Du Ge, Liu Weiping, Liao Changjun *et al.*. Analysis on reflection properties in cascaded phase-shift fiber Bragg gratings [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2000, **21**(3):206~209
杜戈,刘伟平,廖常俊等. 级联相移光纤光栅反射特性的分析[J]. *半导体光电*, 2000, **21**(3):206~209
- 13 Yan Meng, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. OCDMA encoding/decoding experiments based on superstructured fiber Bragg grating with equivalent phase shift[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):221~224
燕萌,姚敏玉,张洪明等. 基于等效相移光栅的光码分多址编/解码实验[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):221~224
- 14 Yu Huaqing, Jiang Xiangdong. Comparison study on phase-shifted grating's analysis method[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(5):352~355
余华清,姜向东. 相移光纤光栅分析方法的比较研究[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(5):352~355
- 15 Wu Fei, Li Lixin, Li Zhiquan. Theoretical analysis of fiber Bragg grating characterization by applying transverse force[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4):472~476
吴飞,李立新,李志全. 均匀光纤布拉格光栅横向受力特性的理论分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4):472~476
- 16 Cai Lulu, Yin Wenwen, Wu Fei. Study of fiber Bragg grating characteristics under local transverse force [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(12):7737~7746
蔡璐璐,尹闻闻,吴飞. 均匀光纤 Bragg 光栅局部横向受力特性研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(12):7737~7746