

doi: 10.3788/gzxb20124102.0139

弱双折射光纤布喇格光栅反射偏振对温度响应特性的研究

田春华^{1,2}, 励强华¹, 郭炳霞¹, 王启宇¹, 高社成¹

(1 哈尔滨师范大学 物理与电子工程学院, 哈尔滨 150025)

(2 齐齐哈尔医学院 医学技术学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘 要:理论分析了切趾弱双折射光纤布喇格光栅反射偏振相关特性与温度之间的关系. 数值模拟了切趾弱双折射光纤光栅的反射谱、偏振相关损耗和差分群时延随波长变化曲线. 实验测出了不同温度下反射谱、偏振相关损耗和差分群时延随波长变化曲线. 根据实验结果对偏振相关损耗和差分群时延的变化情况作出了分析. 反射偏振相关损耗呈现两个峰值, 随温度增加两峰漂移程度相同, 表明偏振相关损耗无明显差异. 差分群时延最大值随温度增加成线性向长波方向漂移, 证明了光纤光栅正交模损耗变化的等同性. 综合理论分析与实验结果表明: 切趾弱双折射光纤布喇格光栅的偏振特性随温度产生明显的变化, 其正交模变化呈现等比例特性.

关键词: 光纤布喇格光栅; 双折射; 偏振相关损耗; 差分群时延

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)02-0139-5

0 引言

近年来, 作为光纤光栅传感和通信系统的光纤无源器件之一的光纤光栅的应用日益广泛^[1-2]. 对光纤光栅施加应力或改变温度可以引起其周期及折射率的改变, 导致其光谱中心波长产生漂移. 基于光栅光谱波长漂移的光纤光栅传感测量, 由于其固有带宽平坦区比较宽导致测量准确度相对较低. 人们试图研究光纤光栅的偏振特性来寻找敏感参量以提高测量准确度. 因此, 对光纤光栅偏振特性的研究就显得尤为重要.

国外, 2004 年 S. T. Oh 等人研究了基于双折射效应的应力对单模光纤光栅透射谱偏振特性的影响^[3]. 2010 年 J. Fbotero-Cadavid 等人研究了应力对写入保偏光纤光栅的光谱特性的影响等^[4-5]. 国内, 有人对光纤光栅光谱特性以及温度和双折射的传感特性进行了研究^[6-10]; 利用光纤光栅光谱特性进行传感的相关理论已经很成熟了, 并已应用于实际生产和生活中. 但利用光纤光栅的双折射对温度的相对稳定性研究温度对切趾光纤布喇格光栅 (Fiber Bragg Gratings, FBGs) 反射偏振特性的影响, 来提高光纤光栅温度测量的准确度尚未见报道.

本文根据光纤光栅的温度传感原理对光纤光栅

的偏振特性随温度变化情况进行了分析, 数值模拟了反射谱、偏振相关损耗 (Polarization Dependent Loss, PDL)、差分群时延 (Differential Group Delay, DGD) 随波长变化曲线. 实验测量出了不同温度下的 PDL 和 DGD 随波长变化曲线, 并作了分析, 得出切趾弱双折射 FBGs 的偏振特性随温度增加向长波方向漂移. 本文的研究内容对光纤光栅应用于传感和通信领域会有一定的帮助.

1 理论分析

光纤的光学特性取决于它的结构和成分. 光纤传输光时内部存在两个相互正交的 x 和 y 偏振模式. 理想情况下, 光纤是完全轴对称形式 (几何形状为理想圆, 折射率分布均匀), 这两个正交模式在光纤中将以相同的速度传播, 因而, 在传播过程中偏振态不会变化. 实际上, 由于光纤光栅材料横向的不均匀性、光纤光栅在制作过程中的光照方向性和使用过程中的微弯等等, 均会造成光纤光栅存在双折射. 光纤双折射是指光纤中传输的两个相互正交模式之间具有不同的折射率. 这表现在两个正交偏振的模式传播速度不同, 总的偏振沿光纤长度方向变化.

切趾光栅可以利用分段均匀传输矩阵法来求解反射和透射系数进而研究其偏振特性. 将切趾光栅

基金项目: 黑龙江省自然科学基金 (No. A200910) 资助

第一作者: 田春华 (1980-), 女, 讲师, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅偏振特性. Email: tianchunhua1980@163.com

导师 (通讯作者): 励强华 (1963-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤非线性及光纤偏振. Email: Lqh0118@126.com

收稿日期: 2011-09-13; 修回日期: 2011-10-01

分成 M 段均匀小光栅, 则其 $x(y)$ 方向上的反射系数 $\rho_{x(y)}$ 为

$$\rho_{x(y)} = S_{x(y)M} / R_{x(y)M} = F_{x(y)21} / F_{x(y)11} \quad (1)$$

$S_{x(y),M}$ 为 $x(y)$ 方向上的反射振幅; $R_{x(y),M}$ 为 $x(y)$ 方向的入射振幅; $F_{x(y)}$ 为 $x(y)$ 方向上的整个光栅的传

输特性矩阵, 其表达式为

$$F_{x(y)} = \begin{bmatrix} F_{x(y)11} & F_{x(y)12} \\ F_{x(y)21} & F_{x(y)22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$F_{x(y)} = F_{x(y)M} \cdot F_{x(y)(M-1)} \cdots \cdots F_{x(y)j} \cdots \cdots F_{x(y)1} \quad (3)$$

且光栅的传输特性矩阵为

$$F_{x(y),j} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{x(y)} \Delta z) - i \frac{\hat{\sigma}_{x(y)}}{\gamma_{x(y)}} \sinh(\gamma_{x(y)} \Delta z) & -i \frac{\kappa}{\gamma_{x(y)}} \sinh(\gamma_{x(y)} \Delta z) \\ i \frac{\kappa}{\gamma_{x(y)}} \sinh(\gamma_{x(y)} \Delta z) & \cosh(\gamma_{x(y)} \Delta z) + i \frac{\hat{\sigma}_{x(y)}}{\gamma_{x(y)}} \sinh(\gamma_{x(y)} \Delta z) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中

$$\gamma_{x(y)} = \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2} \quad (5)$$

$$\kappa = \pi \nu \bar{\delta} n_{\text{eff}} / \lambda \quad (6)$$

$$\hat{\sigma}_{x(y)} = 2\pi n_{\text{eff},x(y)} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{B,x(y)}} \right) + \frac{2\pi \bar{\delta} n_{\text{eff}}}{\lambda} \quad (7)$$

式中 $n_{\text{eff},x(y)}$ 为 $x(y)$ 方向上有效折射率, Δ 为光栅周期. $\lambda_{B,x(y)}$ 为 $x(y)$ 方向上的中心波长; $\bar{\delta} n_{\text{eff}}$ 为折射率调制深度, Δz 为光栅段的长度; $\nu=1$; L 为光栅长度.

偏振相关损耗为

$$\text{PDL}(\lambda) = 10 \lg \left(\frac{|\rho_x(\lambda)|^2}{|\rho_y(\lambda)|^2} \right) \quad (8)$$

差分群时延为

$$\text{DGD}(\lambda) = |\tau_x(\lambda) - \tau_y(\lambda)| \quad (9)$$

式中

$$\tau_{x(y)} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\theta_{\rho,x(y)}}{d\lambda} \quad (10)$$

式中 $\tau_{x(y)}$ 为 $x(y)$ 方向上的群时延; $\theta_{\rho,x(y)}$ 为 $x(y)$ 方向上的反射系数 $\rho_{x(y)}$ 的相位.

根据以上理论进行模拟, 取模拟参量为: $\Lambda = 530.28 \text{ nm}$, $n_{\text{eff}} = 1.4658$, $\Delta n = 1 \times 10^{-7}$, $L = 0.01 \text{ m}$, $\bar{\delta} n_{\text{eff}} = 1.15 \times 10^{-4}$. 图 1 为上述参量下切趾光纤光栅

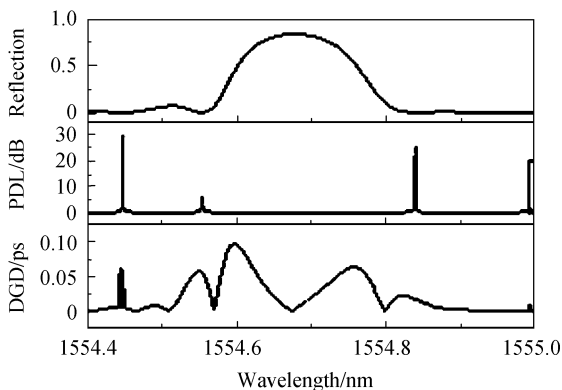


图 1 光纤光栅反射谱、偏振相关损耗、差分群时延随波长的变化曲线

Fig. 1 The curves of Reflected spectrum, polarization dependent loss and differential group delay of fiber Bragg gratings changing with wavelength

反射谱、PDL 和 DGD 随波长的变化曲线.

外界温度对 Bragg 波长的影响主要由热膨胀效应和热光效应引起的. 根据光纤光栅的传感原理^[2], 在不考虑非线性效应的情况下, 温度变化引起的光纤光栅反射波长移动可表示为

$$K_{T,x(y)} = \frac{\Delta \lambda_{B,x(y)}}{\lambda_{B,x(y)} \Delta T} = \alpha + \xi_{x(y)} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \quad (12)$$

$$\xi_{x(y)} = \frac{1}{n_{\text{eff},x(y)}} \frac{\partial n_{\text{eff},x(y)}}{\partial T} \quad (13)$$

式中 $K_{T,x(y)}$ 为 $x(y)$ 方向上温度灵敏度; $\xi_{x(y)}$ 为 $x(y)$ 方向上光纤的热光系数, 描述光纤折射率随温度的变化关系; α 为光纤的热膨胀系数, 描述光栅周期随温度的变化关系. 可见折射率和光栅周期的变化都会引起谱线中心波长的漂移, 而光纤光栅偏振特性主要是由于双折射的存在导致的, 当温度改变时双折射值发生改变, 即 $n_{\text{eff}(x)}$ 和 $n_{\text{eff}(y)}$ 的差值发生变化, 从而导致光纤光栅偏振特性的改变. 由于 α 比 $\xi_{x(y)}$ 小很多, 因此, 本实验重点分析光纤光栅双折射的变化, 实验中的 FBGs 的双折射非常小, 当温度改变时双折射变化量非常微小, 当从热膨胀系数和热光系数考虑时我们可以认为 $n_{\text{eff}(x)} \approx n_{\text{eff}(y)}$, 且文献[7]给出温度差值在 100°C 以内可以不考虑温度灵敏度的非线性效应, 即 α 和 $\xi_{x(y)}$ 为常量^[5]. 则

$$K_{Tx} \approx K_{Ty} \quad (14)$$

式(14)说明切趾弱折射光纤光栅在 x 和 y 两个偏振方向上具有几乎相同的热光系数和热膨胀系数, 即对温度有基本相同的敏感度系数. 文献[7]给出在室温下, 熔融石英的热膨胀系数和热光系数分别为常量 $\alpha \approx 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ^[7], $\xi \approx 8.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ^[7].

因此 $\hat{\sigma}_{x(y)}$ 可表示成

$$\hat{\sigma}_{x(y)} = 2\pi n_{\text{eff},x(y)} \left[\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{B,x(y)} (1 + \Delta T \cdot K_{T,x(y)})} \right] + \frac{2\pi \bar{\delta} n_{\text{eff}}}{\lambda} \quad (15)$$

由式(8)、(9)和(15)就将 PDL 和 DGD 与温度变化之间建立了一定的关系。

根据以上分析可见温度改变时弱双折射光纤光栅的双折射改变量非常小,又由于常温下热光系数和热膨胀系数为常量,所以温度改变时光纤光栅的中心波长会产生漂移,但其峰值变化不大。

2 实验装置

实验装置如图 2,可调谐激光光源(Agilent81980A)发出的光进入光纤偏振分析仪(Agilent A2000)的控制端,产生偏振度几乎为 100%的线偏振光,A2000 控制端产生的偏振光经过耦合器再通过单模光纤光栅,最后利用 A2000 的测试端口对光纤光栅的反射端进行测量.裸光纤光栅放在温控箱内,测量温度范围为 20℃~100℃,每隔 5℃测量一次,波长测量范围为 1 554~1 557 nm.光纤光栅参量为: $\Lambda = 530.28 \text{ nm}$, $n_{\text{eff}} = 1.4658$, $\Delta n = 1 \times 10^{-7}$, $L = 0.01 \text{ m}$, $\bar{\delta}_{\text{neff}} = 1.15 \times 10^{-4}$ (温度改变时各参量会有所变化).测量准确度为 1 pm,测量选用的单模光纤光栅为康宁 SMF-28 光纤写制的切趾 FBGs.

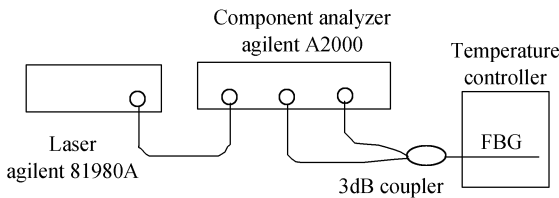


图 2 反射偏振特性测试装置
Fig.2 Test equipment of the reflected polarization properties

3 实验结果

3.1 温度对切趾 FBGs 反射 PDL 的影响

图 3 为不同温度下切趾 FBGs 反射谱线随波长变化曲线.图 4 为不同温度下 FBGs 反射 PDL 随波长变化曲线.经过反复的测量与对比发现随温度的升高曲线遵循同一规律变化,所以图中只给出了四

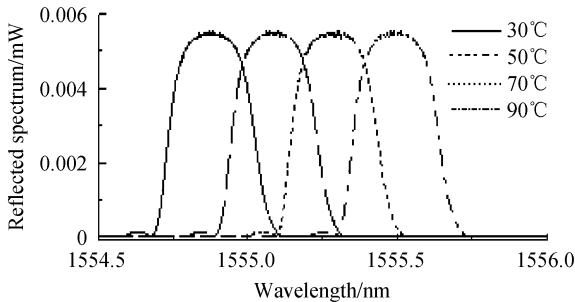


图 3 不同温度下反射谱线随波长的变化曲线
Fig.3 The curves of reflected spectrum changing with wavelength under different temperature

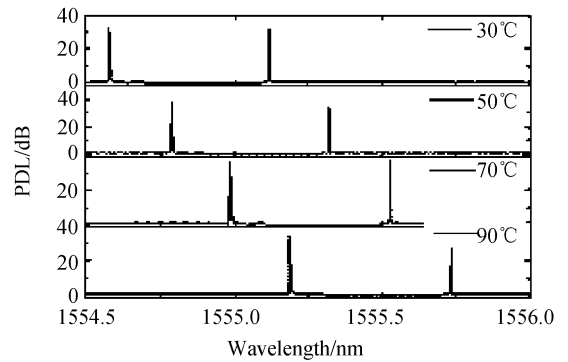


图 4 不同温度下反射偏振相关损耗随波长的变化曲线
Fig.4 The curves of reflected polarization dependent loss changing with wavelength under different temperature
个温度点的谱线图.

由于反射谱随温度变化的特性已经有很成熟的理论,所以只对 PDL 作出分析.通过图 3 和图 4 可以看出,PDL 与反射谱一样均随温度升高整体向长波方向漂移,谱线形状及反射带宽都未发生变化.每个 PDL 曲线都有两个锐利的峰.由下面三幅图片给出 PDL 随温度变化特性.图 5 为切趾 FBGs 反射中心波长和 PDL 双峰位置随温度变化曲线;图 6 为切

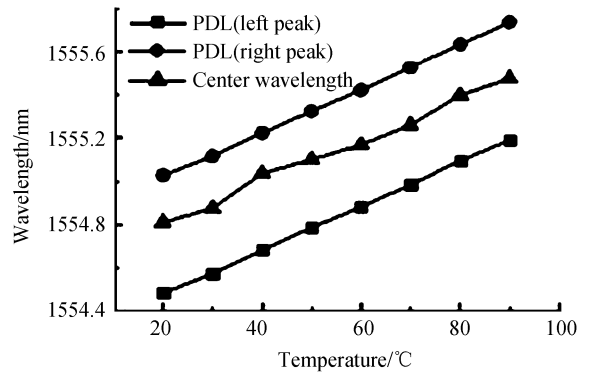


图 5 反射中心波长和偏振相关损耗双峰对应波长随温度的变化曲线
Fig.5 The curves of reflected center wavelength and the two peaks of polarization dependent loss changing with the wavelength

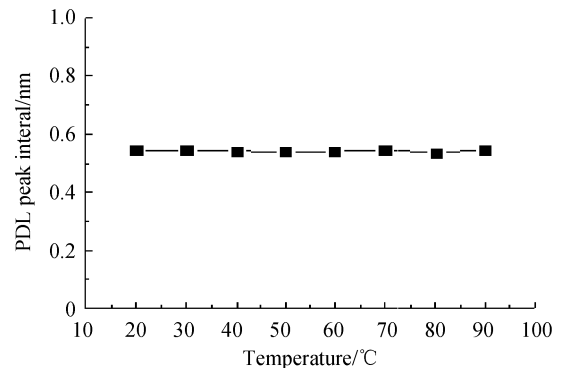


图 6 反射偏振相关损耗双峰水平间距随温度的变化曲线
Fig.6 The curves of the hspace between two peaks of reflected polarization dependent loss changing with temperature

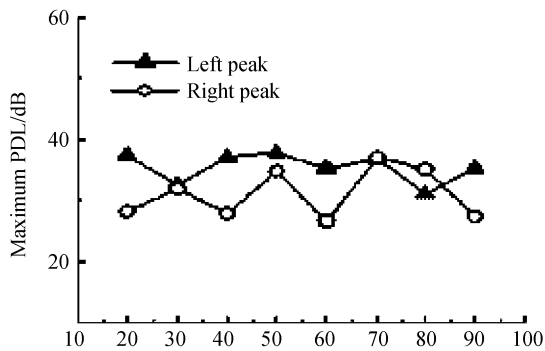


图7 反射偏振相关损耗双峰值随温度的变化曲线

Fig. 7 The curves of the value of two peaks of reflected polarization dependent loss changing with temperature

切趾 FBGs 反射 PDL 双峰水平间距随温度变化曲线；图 7 为切趾 FBGs 反射 PDL 双峰值随温度变化曲线。

由图 5 可以看出，切趾 FBGs 反射 PDL 双峰随温度成线性漂移，PDL 双峰对应波长随温度升高成正比例函数单调递增，函数关系为

$$\lambda_L = 0.01t + 1554.28 \quad (16)$$

或者

$$\Delta\lambda_L = 0.01\Delta t \quad (17)$$

$$\lambda_R = 0.01t + 1554.81 \quad (18)$$

或者

$$\Delta\lambda_R = 0.01\Delta t \quad (19)$$

式中 λ_L 和 λ_R 为 PDL 左峰和右峰对应的波长， $\Delta\lambda_L$ 和 $\Delta\lambda_R$ 为 PDL 两峰随温度升高对应的波长漂移量， t 为温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ， Δt 为温度改变量。式 (17) 和式 (19) 更有一般性，知道波长漂移量就可求出温度变化量。由此可知，PDL 谱线的漂移量与温度的变化量之间存在非常好的线性关系。式 (17) 和 (19) 的比例系数相同表明双峰同时漂移，由图 6 也能看出，不同温度下的双峰间距基本为定值。由图 7 可见 PDL 双峰的值随温度升高在一定范围内波动，这与测试系统环境的微变有关。

对比理论图 1 与实验结果图 3、图 4 和图 5，可见，反射谱线和实验谱线形状一样，在主峰旁边都有一个次峰这是由于所选择的切趾函数造成的；理论和实验的 PDL 谱线形状相同，PDL 谱线在带边处都有两个锐利的峰；DGD 谱线理论与实验轮廓基本一致。光纤光栅的周期发生改变时会导致谱线发生漂移，当外界温度发生改变时会引起光纤光栅的周期和双折射值发生改变，从而导致谱线产生漂移。

文献[3]给出了 Bragg 光纤光栅的透射谱、透射 PDL 和透射 DGD 的振幅均随双折射 Δn 的增大而增大。这个规律也适用于切趾光纤光栅的反射谱。而本实验的光纤光栅的 $\Delta n = 1 \times 10^{-7}$ 属于弱双折射光

纤光栅，当温度改变时光纤光栅的周期会发生变化从而导致谱线产生漂移，但 Δn 改变量非常微小，所以 PDL 谱线的值几乎不发生变化。

实验结果表明：同一环境下的同一切趾光纤光栅，其反射偏振相关损耗谱线形状不变，都有两条锐利的峰且出现的位置一定，当温度升高时，光纤光栅的偏振相关损耗谱线整体向右与温度成线性关系漂移。此实验结果稳定性高可重复性好。从实验结果可见 PDL 双峰随温度变化比反射中心波长随温度变化线性关系更好，PDL 双峰均具有较好的单值性，并且两个峰值间隔不变。因此，可以跟踪两个峰值的任意一个进行测量，以作为光纤传感中静态或准静态测温中的一个测量参量，来提高测温精确度，而不涉及到光栅的封装和增敏。

3.2 温度对切趾 FBGs 反射 DGD 的影响

图 8 为不同温度下切趾 FBGs 反射 DGD 随波长的变化曲线。图 9 为切趾 FBGs 反射 DGD 最大值对应波长随温度的变化曲线。可见，随着温度的升高，DGD 的谱线形状变化不大，同样整体向长波方向漂移；最大值在一定范围内波动；最大值位置基本成线性单调增加，但最大值单值性没有 PDL 的好。

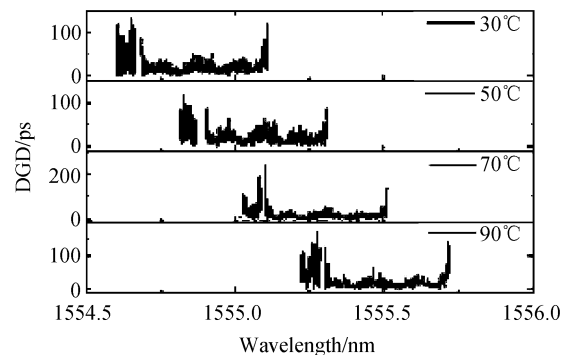


图8 不同温度下反射差分群时延随波长的变化曲线

Fig. 8 The curves of reflected differential group delay changing with wavelength under different temperature

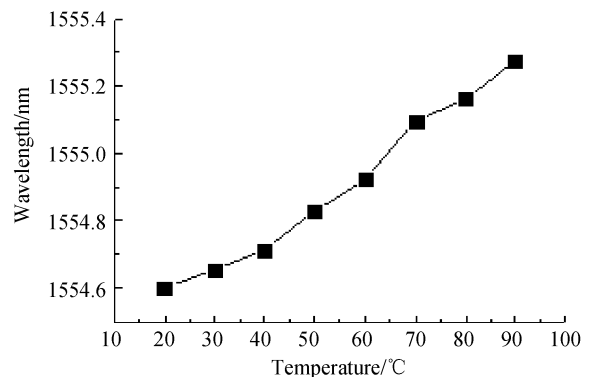


图9 反射差分群时延最大值对应波长随温度的变化曲线

Fig. 9 The curves of the corresponding wavelength of the maximum value of reflected differential group delay changing with temperature

同样根据文献[3]给出的结果,Bragg 光纤光栅的透射 DGD 的振幅随双折射 Δn 的增大而增大. 当 Δn 改变量非常微小时,DGD 谱线的值几乎不发生变化.

4 结论

本文首先给出光纤光栅的温度传感原理,分析了切趾弱双折射 FBGs 偏振相关特性与温度之间的关系,根据切趾光纤光栅的理论模拟了反射谱、PDL、DGD 的曲线;然后,实验测出了不同温度下反射谱、PDL 和 DGD 随光纤光栅波长变化曲线;最后,对 PDL 和 DGD 的变化情况进行了分析. 得出结论如下:1) 反射 PDL 有两个单值性很好的锐利的峰,随温度增加两峰均成正比例函数向长波方向同步漂移,最大值在一定范围内波动;2) DGD 最大值随温度增加基本成线性向长波方向漂移,最大值在一定范围内波动;3) 弱双折射光纤光栅,当温度改变时光纤光栅的周期会发生变化从而导致谱线产生漂移,但 Δn 改变量非常微小,所以 PDL 和 DGD 谱线的值几乎不发生变化.

实验结果与理论分析均表明:切趾弱双折射 FBGs 的偏振特性随温度增加产生漂移,谱线值变化不大. 本文的研究结果可为光纤光栅应用于光纤传感和通信领域提供重要的依据.

参考文献

- [1] 张伟刚. 光纤光学原理及应用[M]. 天津:南开大学出版社, 2008:207-218.
- [2] 赵勇. 光纤光栅及其传感技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2007:63-71.

- [3] CAUCHETEUR C, BETTE S, GARCIA-OLCINA R, *et al.* Influence of the grating parameters on the polarization properties of fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(8): 1000-1010.
- [4] BOTERO-CADAVID J F, CAUSADO-BUELVAS J D, TORRES P. Spectral properties of locally pressed fiber Bragg gratings written in polarization maintaining fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(9): 1291-1297.
- [5] OH S T, HAN W T, PEAK U C, *et al.* Discrimination of temperature and strain with a single FBG based on the birefringence effect[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(4): 724-729.
- [6] ZHANG Jin-long, YU Zhong-xiu, WANG Kui-ru, *et al.* A fiber grating dual-parameter sensor of ditrignon cantilever beam for measurement of strain and temperature[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4):770-774.
张锦龙,余重秀,王葵如,等. 双三角形结构的光纤光栅压力和温度双参量传感器[J]. 光子学报, 2009, **38**(4):770-774.
- [7] QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, FU Hai-wei, *et al.* Theory and experiment about in-fiber Bragg grating temperature sensing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(2):494-497.
乔学光,贾振安,傅海威,等. 光纤光栅温度传感理论与实验[J]. 物理学报, 2004, **53**(2):494-497.
- [8] CHAI Wei. Study on FBG temperature sensing technology [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004:13-15.
柴伟. 光纤布喇格光栅温度传感技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2004:13-15.
- [9] LI Zhi-zhong. Theoretical and experimental research on sensing characteristics of birefringent fiber gratings [D]. Beijing: National University of Defense Technology, 2006: 1-64.
李智忠. 双折射光纤光栅传感特性的理论和实验研究[D]. 北京:国防科学技术大学, 2006:1-64.
- [10] ZHANG Xia, HUANG Yong-qing, REN Xiao-min. Experimental researches on birefringence of fiber Bragg grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 241-243.
张霞,黄永清,任晓敏. 光纤光栅双折射效应的实验研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(2):241-243.

Reflected Polarization Properties of Low-birefringence Fiber Bragg Gratings Based on Temperature Effect

TIAN Chun-hua^{1,2}, LI Qiang-hua¹, GUO Bing-xia¹, WANG Qi-yu¹, GAO She-cheng¹

(1 *Institute of Physicals and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin 150025, China*)

(2 *Medical Technology Department, Qiqihar Medical University, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China*)

Abstract: The relationship between reflected polarization properties of apodized low-birefringence fiber Bragg gratings and temperature effect are analyzed theoretically. Numerical value simulates reflection spectrum of the apodized low-birefringence fiber Bragg gratings, polarization dependent loss and differential group delay curves with wavelength. The reflected center wavelength, polarization dependent loss and differential group delay which evolve with wavelength are measured under different temperature and the curves are drawn accordingly. The evolution of polarization dependent loss and differential group delay are analyzed according to the results of the experiment. In the experiment, reflected polarization dependent loss presents two peaks which shift to an equal extent as temperature changes and it indicates that polarization dependent loss has no significant difference. The maximum of difference group delay with temperature increase linearly shifts to long wavelengths and it is proved that the loss of orthogonal modes has changed equally. The synthetical theory analysis and experimental results show that the evolution of reflected polarization properties of apodized low-birefringence fiber Bragg gratings changes obviously with temperature changing and the changing of orthogonal modes presents proportional characteristics.

Key words: Fiber Bragg grating; Birefringence; Polarization dependent loss; Differential group delay