

文章编号: 0258-7025(2010)03-0763-06

基于偏振特性的相移光栅磁场传感方法分析

冯奎 朱勇 苏洋 彭晖

(中国人民解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 应用传输矩阵法,对相移光栅的磁场传感机理进行了理论推导和仿真实验验证,分析了相移光栅的相移大小、相移位置以及光栅长度对磁场传感系统性能的影响。仿真结果表明,相移光栅阻带中透射窗口的带宽和透射率直接影响了磁场的测量结果,并与传统光纤布拉格光栅(FBG)测量方案进行了比较。仿真和实验表明,具有窄带宽高透射率透射窗口的相移光栅能够显著提高磁场传感系统的精度和灵敏度。

关键词 传感器;相移光栅;偏振相关损耗;法拉第效应;透射窗口

中图分类号 TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0763

Analysis of Magnetic Field Sensor with Phase-Shifted Grating Based on the Polarization Properties

Feng Kui Zhu Yong Su Yang Peng Hui

(Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract The magnetic field measurement mechanism with phase-shifted grating is presented by using transfer matrix approach. The effects of grating parameters on the sensing performance are analyzed by simulations. It shows that the bandwidth and transmission rate of the stop-band transmission window in phase-shifted grating have great effects on the measurements. The results are compared with fiber Bragg grating (FBG) scheme. The simulations and experiments show that the phase-shifted grating with narrow bandwidth and high transmission rate can improve the accuracy and sensitivity of the magnetic sensor system.

Key words sensors; phase-shifted grating; polarization dependent loss; Faraday effect; transmission window

1 引言

近年来,利用光纤布拉格光栅(FBG)进行传感受到了广泛的关注,通过测量光栅布拉格波长的变化对温度、应力、压力等进行测量的传感单元已经获得广泛的应用^[1~3]。在磁场测量的应用中,最常见的方法是在光栅外层涂上磁致伸缩材料,利用光纤光栅测量应力的原理进行磁场检测^[4,5]。Kersey等^[6]利用光纤光栅中的磁致双折射效应,通过测量反射波长的变化直接进行磁场的测量。基于偏振相关特性的测量方法是一种全新的光栅传感方案,光栅在外界因素的影响下,光的偏振效应会发生改变,从而达到传感目的^[7,8]。研究发现,受磁场的影响,偏振光通过光纤光栅后透射谱会发生微弱变化,这种微弱变化反应到偏振相关特性上,便于对磁场大

小的测量。理想情况下光纤光栅偏振相关损耗(PDL)的峰值与磁场强度存在线性关系^[9],通过测量PDL即可测得磁场大小,并且可以通过优化光栅结构来提高传感系统的性能。利用均匀光栅进行传感时,PDL峰值较小,系统的灵敏度较低。本文利用相移光栅进行磁场测量,通过仿真分析光栅结构特性对磁场传感系统的影响,自制均匀光栅和相移光栅进行实验分析,为设计适于磁场传感的光栅结构提供参考。

2 磁场传感原理

2.1 偏振光受磁场影响

由法拉第效应可知,线偏振光在光纤光栅中传播,受磁场的影响,偏振光的振动方向会发生旋转。

收稿日期: 2009-04-16; 收到修改稿日期: 2009-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(60871075)和中国博士后科学基金(20090451500)资助课题。

作者简介: 冯奎(1984—),男,硕士研究生,主要从事光传感方面的研究。E-mail: fengkuijs@126.com

导师简介: 朱勇(1971—),男,教授,硕士生导师,主要从事光信息技术方面的研究。E-mail: jlzhuy@163.com

旋转角度与光纤光栅的 Verdet 常数有关,受光源波长和环境温度变化的影响,石英光纤在 1550 nm 波长附近的 Verdet 常数大约为 $1 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ 。由磁场引起的左旋和右旋圆偏振光折射率之差为

$$n_R - n_L = \frac{VB\lambda}{\pi}, \quad (1)$$

式中 n_L, n_R 分别为左旋、右旋圆偏振光等效折射率, V 为 Verdet 常数, B 为磁感应强度, λ 为偏振光波长。折射率的差异,导致其左旋和右旋圆偏振光透射谱 $t_L(\lambda)$ 和 $t_R(\lambda)$ 发生分裂。如图 1 所示,两圆偏振光透射窗口的波长产生微小的差异 $\Delta\lambda$ 。由(1)式可知,在线偏振光波长为 1550 nm,外界磁场强度为 1 T 时,通过周期 Λ 为 535 nm 的光栅后,两圆偏振光透射窗口波长变化 $\Delta\lambda$ 约为 0.5 pm。这个微弱的差异值虽然反应了磁场的大小,但是由于波长的变化受磁场影响较小,需要精密的干涉解调方案进行检测,不利于对磁场的测量。

2.2 光纤光栅偏振相关特性

光的特性是由相位、频率(波长)、偏振和幅度 4 个参数来决定,由法拉第原理可知相位和偏振态的

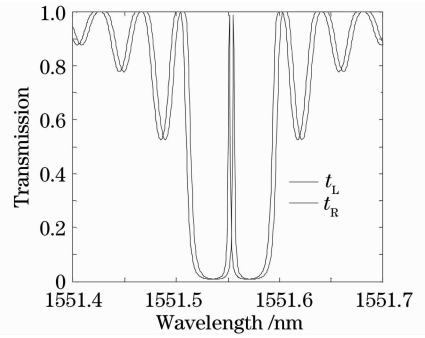


图 1 左旋和右旋圆偏振光透射率

Fig. 1 Transmission for left-circularly and right-circularly polarized lights

变化也携带了外场信息,可以用来测量磁场的变化。

光纤光栅偏振相关损耗定义为两个偏振模之间的差分损耗,它体现了光栅对不同偏振态的敏感度。其表示式为^[9]

$$f_{\text{PDL}}(\lambda) = |10 \lg[T_L(\lambda)/T_R(\lambda)]|. \quad (2)$$

对光栅内只有一个相位突变的相移光栅来说,可将其看成由两个均匀子光栅级联而成,两子光栅之间光波长的相位发生突变。由传输矩阵理论可知,均匀光栅第 n 段的传输矩阵 \mathbf{T}_n 可表示为^[10]

$$\mathbf{T}_n = \begin{bmatrix} \cosh(\alpha_n \Delta L) - i \frac{\hat{\sigma}_n}{\alpha_n} \sinh(\alpha_n \Delta L) & -i \frac{k_n}{\alpha_n} \sinh(\alpha_n \Delta L) \\ i \frac{k_n}{\alpha_n} \sinh(\alpha_n \Delta L) & \cosh(\alpha_n \Delta L) + i \frac{\hat{\sigma}_n}{\alpha_n} \sinh(\alpha_n \Delta L) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中

$$\alpha = [\kappa^2 - \sigma_{L(R)}^2]^{1/2}, \quad \kappa = \nu\pi\delta n / \lambda,$$

$$\sigma = 2\pi n_{\text{eff}}(1/\lambda - 1/\lambda_B) + 2\pi\delta n / \lambda,$$

κ 为交流耦合系数, ν 为折射率变化的条纹可见度,一般为常数,本文中取 1。 σ 为直流耦合系数,其值与折射率有关, L 为光栅长度, n_{eff} 为有效折射率, δn 为折射率调制系数, λ_B 为布拉格波长。

相移段的传输矩阵可表示为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \exp(-j\varphi) & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 φ 表示相移光栅相位的变化量。整个相移光栅的传输矩阵可表示为

$$\mathbf{T}_t = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{N-1} \times \mathbf{T}_{N-2} \times \dots \\ \mathbf{T}_{N-M} \times \mathbf{P} \times \mathbf{T}_{N-M-1} \times \dots \times \mathbf{T}_0,$$

M 和 N 决定了相移位置。由传输矩阵可以得到光栅能量透射系数

$$T(\lambda) = \left| \frac{1}{T_{22}} \right|^2. \quad (5)$$

设计一个光栅, n_{eff} 为 1.45, Λ 为 535 nm, δn 为 5×10^{-5} , L 为 4 cm。为便于分析比较,选取光栅相移量 φ 为 $\pi/2$, 根据(2)式,可以得到数值仿真结果。图 2 是 PDL 输出随外加磁场变化的仿真图。从中可以看出, PDL 的峰值随外加磁场的增加而增加,

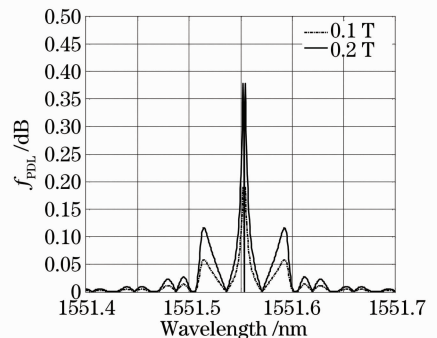


图 2 PDL 在不同磁场中的变化

Fig. 2 PDL versus wavelength at different magnetic fields

PDL 谱的形状并未发生改变,固定任一波长,PDL 值与磁场成正比。为了便于测量,一般采用 PDL 的峰值来测量磁场。图 3 给出了磁场变化在 0.1~0.2 T 范围内 PDL 峰值的变化曲线,可以看出,PDL 峰值与磁场成线性关系。

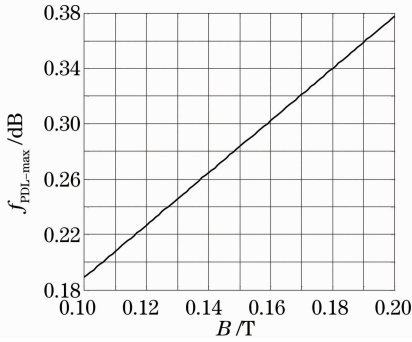


图 3 PDL 峰值随磁场的变化

Fig. 3 PDL peak values versus different magnetic fields

3 相移光栅结构对磁场测量的影响

相移光栅是在常规光纤布拉格光栅的某一特定部位引入一定的相移,产生两个相互异相的光栅,这两个相互异相的光栅类似于波长选择 Fabry-Perot 谐振腔,允许谐振波长的光注入到 FBG 的阻带,在阻带中打开一个线宽极窄的透射窗口。透射窗口的位置和线宽对相移光栅的 PDL 值会产生很大影响。

3.1 相移大小对磁场测量的影响

相移量 φ 大小不同时,相移光栅透射窗口的位置发生改变。由图 4 可知随着相移量 φ 的减小,窗口位置向短波长方向移动,当 φ 增大时,窗口位置向长波长方向移动,且两光栅相移之和为 π 时以 φ 为 $\pi/2$ 左右对称,窗口位置与相移量大小成线性关系^[11]。透射窗口的移动,使得 PDL 也发生相应的移动,图 5 给出了在磁场大小为 0.2 T 时,不同相移量的 PDL 变化谱线。在谱线移动的同时,PDL 的

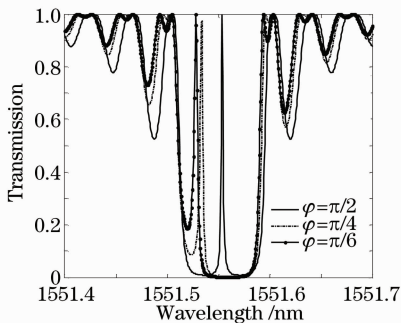


图 4 相移量对相移光栅透射率的影响

Fig. 4 Effects of different phase shift magnitudes on transmission of phase-shifted grating

峰值也逐渐变小,这是由于窗口的透射率发生变化而引起的。图 6 给出了相移不同时 PDL 峰值随磁场的变化曲线,相移量的改变并未影响磁场和 PDL 峰值的线性关系,而且相移量的增加可以提高系统测量的灵敏度。

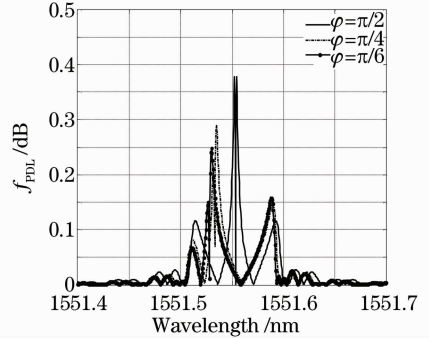


图 5 PDL 在不同相移时的变化

Fig. 5 PDL versus wavelength at different phase shift magnitudes

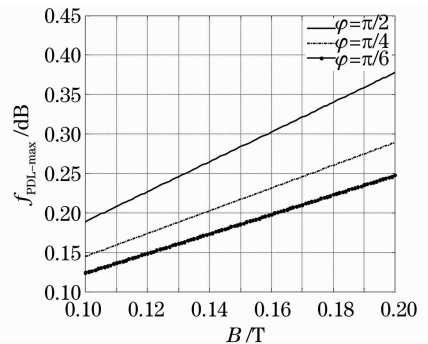


图 6 不同相移时 PDL 峰值随磁场的变化

Fig. 6 PDL peak values versus magnetic field at different phase shift magnitudes

3.2 相移位置对磁场测量的影响

在光栅中不同的位置插入相移,透射窗口也会产生变化。从图 7 可以看出,相移量恒定为 $\varphi = \pi/2$,相移位置不在中间,光谱的形状还是相似的,但窗口的

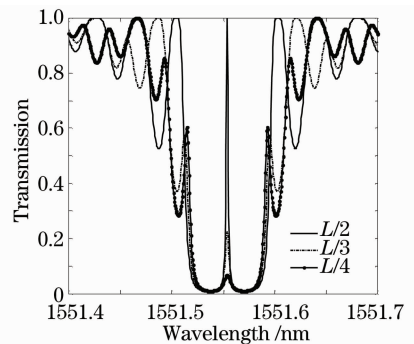


图 7 相移位置对相移光栅透射率的影响

Fig. 7 Transmission of phase-shifted grating at different locations

透射率减小很多,只有相移位置在中间时透射率才为1。在磁场大小为 0.2 T 时,对 PDL 进行数值仿真。如图 8 所示,相移位置的改变并未改变 PDL 谱线的形状,PDL 的峰值随相移位置偏移光栅中心的大小而改变,相移位置在中间时,PDL 的峰值最大,适于传感系统的解调。同样,这种变化不会改变磁场与 PDL 峰值的线性关系,如图 9 所示。

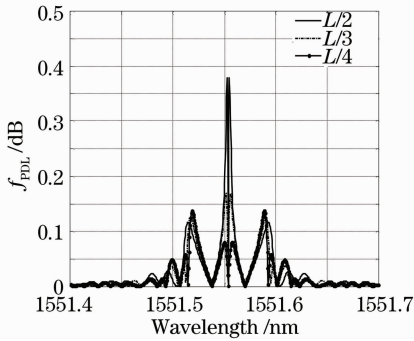


图 8 PDL 在不同相移位置的变化

Fig. 8 PDL versus wavelength at different phase shift locations

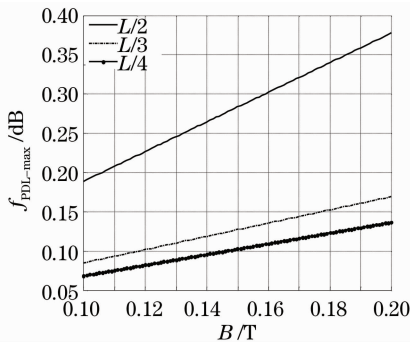


图 9 相移位置不同时 PDL 峰值随磁场的变化

Fig. 9 PDL peak values versus magnetic field at different locations of phase shift

3.3 相移光栅的长度对磁场测量的影响

光栅长度是影响光栅透射率的重要因素,相移光栅的长度还会影响到透射窗口的带宽。图 10 给出了在光栅中心位置插入 $\pi/2$ 相移,光栅长度从 3 cm 增加到 5 cm 的透射率曲线。从中可以看出,透射窗口的带宽随着光栅长度的增加逐渐减小。带宽减小后,磁场引起左旋和右旋圆偏振光透射谱的改变更加明显,使得 PDL 显著变化。从图 11 可以看出,在磁场为 0.2 T 条件下,光栅长度增加到 5 cm 时,PDL 峰值已达到 1 dB,这对传感系统的解调有很大帮助。由图 12 可知,磁场与 PDL 峰值仍然保持线性关系,与图 6 和图 9 类似,曲线的斜率会发生变化,光栅长度增加使 PDL 峰值的变化量增大,即提高了磁场测量的灵敏度和精度。

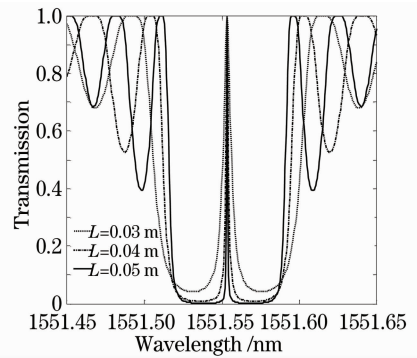


图 10 光栅长度对相移光栅透射率的影响

Fig. 10 Transmission of phase-shifted grating at different grating lengths

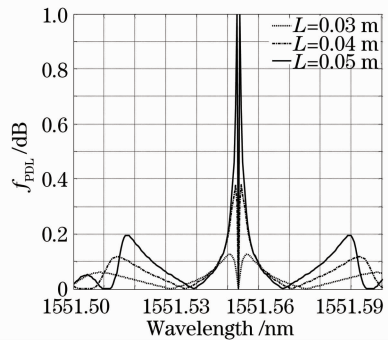


图 11 PDL 在不同相移光栅长度的变化

Fig. 11 PDL versus wavelength at different lengths of phase-shifted grating

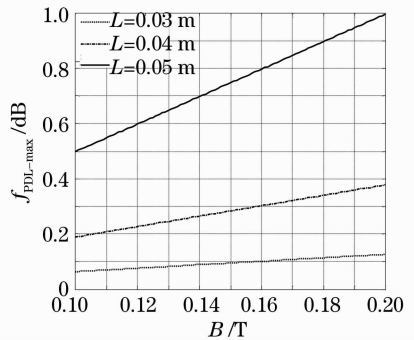


图 12 光栅长度不同时 PDL 峰值随磁场的变化

Fig. 12 PDL peak values versus magnetic field at different lengths of fiber grating

3.4 相移光栅与均匀光栅对磁场测量的影响

均匀光栅可以看作相移量 $\varphi=0$ 时的特殊相移光栅。由 3.1 节分析可知,相移量减小为 0 时,PDL 谱线峰值会降低。图 13,14 是均匀光栅和 $\varphi=\pi/2$ 的相移光栅的仿真图。可以看出,磁场大小相同时,相移光栅 PDL 峰值是均匀光栅的 2 倍左右,即提高了磁场测量系统的精度和灵敏度。

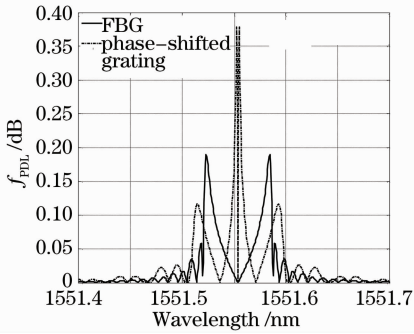


图 13 均匀光栅和相移光栅的 PDL 变化

Fig. 13 PDL of FBG and phase-shifted grating versus wavelength

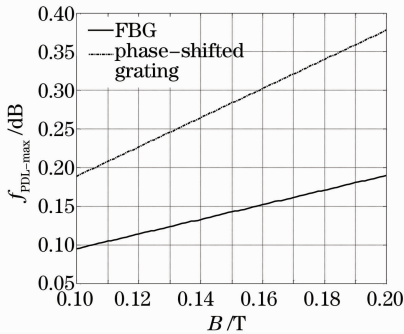


图 14 均匀光栅和相移光栅 PDL 峰值随磁场的变化

Fig. 14 PDL peak values of FBG and phase-shifted grating versus magnetic field

4 实验验证

实验室有相位掩模板法制作光纤光栅的平台，结合重构等效啁啾理论^[12]，可以制作出各种结构的光纤光栅。为了方便实验分析，利用周期为 535 nm 的相位掩模板，制作了长度 4 cm，调制深度 5×10^{-5} 的均匀采样光栅。并根据重构等效啁啾理论，制作了中部有单个等效 $\pi/2$ 相移的均匀采样光栅。

实验中采用美国 LUNA 公司的光矢量分析仪 (LUNA OVA) 作为检测器，利用磁光调制实验仪产生稳定磁场，光纤夹具固定光纤光栅与磁场方向平行，通过改变励磁强度来改变磁场强度的大小。光矢量分析仪的输出光通过放置于磁场发生器中的光栅，光栅透射光进入矢量分析仪进行数据分析处理。

图 15 给出了在未加磁场时，利用 OVA 实测均匀光栅和相移光栅的透射谱及光纤光栅的 PDL 谱。选用采样光栅的 -1 级透射谱，从图 15(a) 中可以看出，利用等效相移制作的相移光栅透射率不是很高，对磁场测量会产生一定影响；图 15(b) 是光纤光栅的 PDL 谱，在无磁场时其值并不为 0，而是杂乱无章的。这是由于光纤本征双折射和光栅致双折射引起的^[13,14]，与光栅结构本身没有关系，在光栅透射谱对应波长 PDL 有明显的突出部分，双折射的存在对测量系统会产生影响^[15]。图 16(a) 和 (b) 分别为

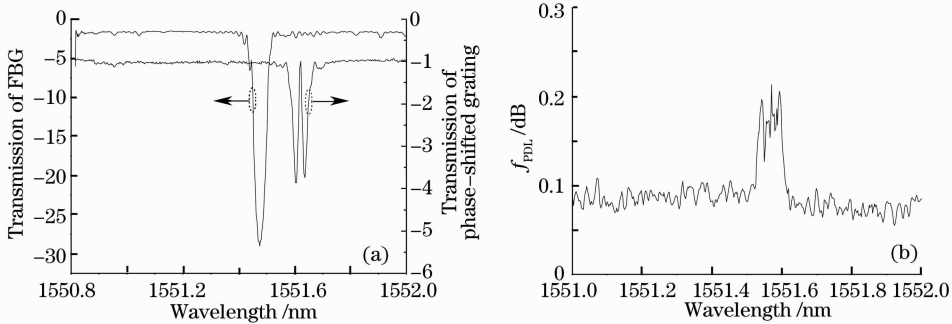


图 15 未加磁场时光栅透射谱(a)和 PDL 谱(b)

Fig. 15 Transmission (a) and PDL value (b) of fiber grating without magnetic field

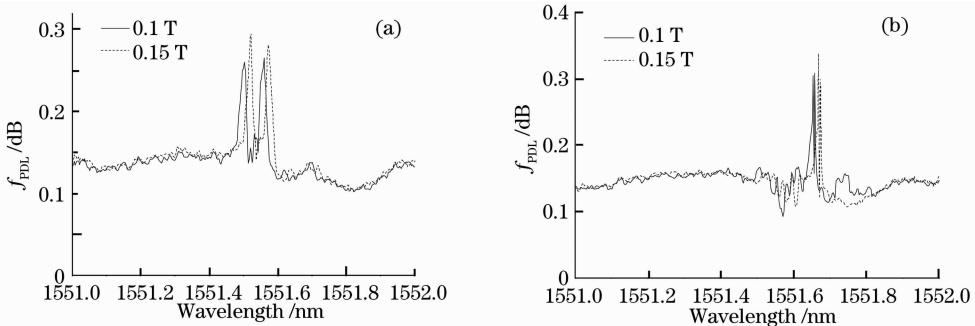


图 16 PDL 在不同磁场时的变化。(a)均匀光栅；(b)相移光栅

Fig. 16 PDL values at different magnetic fields. (a) FBG ; (b) phase-shifted grating

加入磁场后, OVA 测得的均匀光栅和相移光栅 PDL 谱线, 并进行了数字滤波处理, 减少光路噪声的影响。两个光栅的 PDL 峰值都随磁场强度增加而变大, 相移光栅 PDL 峰值变化量大于均匀光栅 PDL 峰值变化量, 与 3.4 节中仿真结果基本吻合。

受条件限制, 光纤光栅没有进行封装, 也未进行退火处理。实验过程中, 利用光纤夹具固定时, 光纤光栅受到了一定的轴向应力作用; 磁场强度增大的同时, 磁场发生器的温度变化很快, 轴向应力和温度的不确定性影响了测量结果, 使得 PDL 谱发生横向漂移, 但是 PDL 峰值没有受到影响。

5 结 论

分析了基于偏振效应的相移光栅磁场测量方法的原理, 数值仿真了不同结构的相移光栅在磁场测量中偏振相关损耗的变化, 利用自制均匀光栅和相移光栅进行了实验验证, 实验结果与理论分析基本一致。外界条件相同时, 在中心位置加入 $\pi/2$ 相移的相移光栅, 其透射窗口的带宽窄、透射率高, PDL 峰值较大, 便于系统的解调。合理设计光栅的结构, 减小透射窗口的带宽, 在提高 PDL 峰值的同时, 能够提高传感系统的精度和灵敏度。

参 考 文 献

- 1 Wu Fei, Li Lixin, Li Zhiqian. 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
- 2 Qiao Xueguang, Jia Zhen'an, Fu Haiwei. 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. 光纤光栅温度传感理论与实验[J]. *物理学报*, 2004, **53**(2): 494~497
- 3 Li Zhizhong, Yang Huayong, Cheng Yusheng *et al.*. Pressure sensing characteristics of panda fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 157~162
李智忠, 杨华勇, 程玉胜等. 熊猫光纤光栅压力传感特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 157~162
- 4 Wang Limeng, Zhu Ronghua. Sensing scheme for magnetic field with fiber Bragg grating[J]. *Laser and infrared*, 1999, **29**(4): 238~242
王黎蒙, 朱荣华. 光纤布喇格光栅磁场传感方案[J]. *激光与红外*, 1999, **29**(4): 238~242
- 5 Zhang Hucheng, Li Yuquan. Magnetic field sensor based on fiber Bragg grating [J]. *J. PLA University of Science and Technology*, 2004, **5**(2): 33~35
张虎成, 李玉权. 基于 FBG 的磁场传感器实验设计方案[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2004, **5**(2): 33~35
- 6 A. D. Kersey, M. J. Marrone. Fiber Bragg grating high-magnetic-field probe [C]. *SPIE*, 1994, **2360**: 53~56
- 7 C. Caucheteur, S. Bette, R. Garcia-Olcina *et al.*. Transverse force sensor exploiting the birefringence effect in uniform fibre Bragg gratings[C]. *SPIE*, 2007, **6585**: 65850C
- 8 Ping Lu, Qiying Chen. Polarization dependent loss of fiber Bragg gratings and sensing applications[C]. *SPIE*, 2007, **6796**: 679624
- 9 Peng Hui, Su Yang, Li Yuquan *et al.*. Measurement for magnetic field with fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1717~1722
彭 晖, 苏 洋, 李玉权等. 基于光纤光栅的磁场测量新方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1717~1722
- 10 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 11 Chen Heming, Zhang Minfeng, Wei Xianhu. Analysis for transmission spectrum of phase-shifted fiber Bragg gratings[J]. *J. Nanjing University of Posts and Telecommunications(Natural Science)*, 2002, **22**(1): 16~20
陈鹤鸣, 张敏锋, 魏贤虎. 相移光纤光栅传输谱的研究[J]. *南京邮电学院学报(自然科学版)*, 2002, **22**(1): 16~20
- 12 Dai Yitang. Research on the Theory and Application of the Novel Fiber Bragg Gratings[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. 33~36
戴一堂. 新型光纤布拉格光栅的研究与应用[D]. 北京: 清华大学, 2006. 33~36
- 13 P. Lu, D. S. Waddy, S. J. Mihailov *et al.*. Characterization of the growths of UV-induced birefringence in effective mode index and index modulation in fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(11): 253~254
- 14 Ge Tingwu, Lu Dan, Xu Kun *et al.*. Theoretical analysis of polarization dependent loss induced by fiber gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1024~1028
葛廷武, 陆 丹, 徐 坤等. 光栅致双折射引起偏振相关损耗的理论分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1024~1028
- 15 Peng Hui, Su Yang, Li Yuquan. Research of the effect of the linear birefringence on the performance of FBG sensor for measuring magnetic field[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 196~199
彭 晖, 苏 洋, 李玉权. 光纤线双折射对光栅磁场传感器性能影响的理论分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s2): 196~199