

布喇格光栅磁场传感器交叉敏感的研究

何亚蓉¹,葛海波¹,闫雪琴¹,杜建平²

(1.西安邮电大学 电子工程学院,西安 710061;2.西安邮电大学 通信与信息工程学院,西安 710061)

摘要:从光纤光栅传感的基本原理出发,分析了光纤光栅内外参量对于磁场测量的影响,对温度、应力、压力和光纤光栅内应力分别进行了讨论。仿真结果表明,基于 PDL 的磁场传感方案对于温度和应力不敏感,内应力和时变压力则会影响其性能,压力的影响尤为显著。测量精度要求高,内应力必须予以考虑。

关键词:光纤光栅 磁场测量 交叉敏感 偏振相关损耗 内应力

中图分类号:TP929.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2013)01-047-04

Research of the cross sensitive of magnetic field sensors based on FBG

HE Ya-rong¹, GE Hai-bo¹, YAN Xue-qin¹, DU Jian-ping²

(1.School of Electronic Engineering, University of Xi'an Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China;2.School of Communication and Information Engineering, University of Xi'an Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: From the basic principle of fiber grating sensor, analyzed the influence of the external and internal parameters for the magnetic-field measurement, discussed the influence of pressure, temperature, stress and the internal stress of fiber grating for measuring magnetic field. The simulation results show that the magnetic field sensing solutions based on PDL is not sensitive to temperature and axial stress, pressure and internal stress can affect the performance, especially the pressure; For measuring precision demand is higher occasions, inner stress is that must be considered.

Key words: fiber grating; magnetic-field measurement; cross sensitive; polarization dependent loss(PDL); internal stress

0 引言

磁场的测量在科学研究和工程实践领域都具有非常重大的意义。目前使用的磁强计多是采用磁偶极子作为传感元件,但是这种磁强计不适宜在恶劣环境下工作(有源、不耐腐蚀等)。光纤光栅以其体积小、质量轻、耐腐蚀、易复用和无源等优点广泛地应用于光纤通信和传感领域,光纤布喇格光栅温度、应力传感器现已商用化,而使用光纤光栅进行磁场测量尚属新兴的研究领域。近年的研究多是在光纤表面涂敷磁致伸缩材料或是将磁芯嵌入光纤内部,利用机械应力与光纤光栅 Bragg 中心反射波长的关系达到磁场测量的

目的^[1-3]。但是,机械形变对于磁场测量的精确度和灵敏度都有很大的影响。1994年,A.D.Kersey等人^[4]提出一种直接测量磁场的方法,其基本原理是直接测量外加磁场引起的法拉第效应,使得光纤内左旋和右旋圆偏振光的 Bragg 反射中心波长发生漂移。但是,石英光纤的 Verdet 常数太小,小磁场情况下光谱分析仪很难测得漂移量的大小。2008年,彭晖等人^[5]提出基于 PDL 磁场测量方法,本文即是对于这种磁场测量方法的讨论。温度、应力、压力和光纤内部不均匀性等都会在各方面影响光纤的参数,实际中多是这几种参量并存,所以讨论这些参量的交叉敏感性对于磁场传感实用化有着重大意义。2010年,冯奎等人^[6]就温度、压力和外应力等参量交叉敏感问题进行了讨论,但并没有讨论内应力(内部双折射)的影响。本文不仅对上述参量进行了讨论,还讨论了内应力对磁场传感的影响。

收稿日期:2012-09-13。

基金项目:陕西省自然科学基金(2011JM8308)资助。

作者简介:何亚蓉(1987-),女,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感方面的研究。

1 理论基础

由法拉第效应和菲涅耳理论^[7,8],可得左旋光和右旋光的有效折射率之差^[5]:

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

式(1)中 n_L 和 n_R 表示左旋光和右旋光的有效折射率, V 为 Verdet 常数, B 为磁感应强度, λ 为光的波长。

偏振相关损耗定义为最大输出功率偏振态和最小输出功率偏振态功率比的 dB 值,对于光纤布喇格光栅,偏振相关损耗的定义为^[9]:

$$L_{PD}(\lambda) = |10\lg[T_L(\lambda)/T_R(\lambda)]| \quad (2)$$

式(2)中, $T_L(\lambda)$ 、 $T_R(\lambda)$ 分别为左旋和右旋圆偏振光的透射能量。根据模耦合理论以及单光光纤的相关参数得在 $\hat{\sigma}_{L,R}^2/\kappa^2 \gg 1$ 条件下, PDL 可以近似为:

$$L_{PD}(\lambda) = 80B\kappa \frac{n_{eff}V\lambda\Delta}{(\ln 10)\lambda_B^2\sigma_L^2\sigma_R^2} \quad (3)$$

在磁场测量的很短的波长范围内,可以近似地认为 σ_L^2 和 σ_R^2 不变(小磁场条件下),根据式(3)可知,磁感应强度与 PDL 呈线性关系,故而可以通过测量 PDL 得到磁场的大小。

2 对于外界条件的敏感性分析

2.1 温度

温度对于磁场测量的影响主要表现在两个方面:①热膨胀导致光纤产生形变,改变光栅机械常数(如光栅周期);②热光效应改变光栅栅区的有效折射率。根据相关理论^[10,11],免去推导过程,可知温度的改变仅仅改变了 FBG 的 Bragg 中心波长,并不会影响 PDL 谱的形状和峰值。

2.2 轴向应力

应力是有方向的,通常将轴向应力简称为应力,将横向应力称为压力。应力对于光纤光栅的影响为:导致机械形变,引起光栅机械常数变化;弹光效应引起光纤光栅有效折射率的变化。根据相关理论^[10,11,12],免去推导过程可知,应力变化对于光纤光栅的影响与温度变化导致的影响是类似的,因此应力变化不会引起对磁场测量的不利影响。

2.3 横向应力(压力)

压力对光纤光栅的影响,实际上是由于光栅周期的伸缩和弹光效应引起的。当光纤布喇格光栅受到横向均匀分布的压力时,由于光纤的变形导致折射率发

生变化,并产生线双折射。根据文献^[11]的结论,考虑线双折射问题,免去推导过程,以左旋光为例, PDL 可以表示为 x 方向和 y 方向上 PDL 之和,右旋光类似。这种情况下,输出的 PDL 谱不仅在波长轴上发生了移动,而且谱的形状也发生了变化。测量过程中,时变压力使得磁场与 PDL 的线性关系变成了复杂的非线性关系,严重影响了测量的性能。若测量过程中压力保持恒定,仍然可以推导出在 $\hat{\sigma}^2/\kappa^2 \gg 1$ 条件下, PDL 与磁场呈线性关系。

3 交叉敏感的分析

3.1 温度、应力和压力变化并存下磁场测量性能

由上面的讨论可知,温度、应力和压力都会使得 Bragg 中心波长发生漂移,而压力还会导致光纤内部产生双折射。若将这几项综合考虑,由 2.1 节、2.2 节和 2.3 节的结论,可以证明, PDL 谱总的变化为温度、应力和压力对其影响的线性叠加。

3.2 磁场与内应力

光纤光栅局部不均匀而存在内应力,研究表明^[13]光纤光栅内部的双折射是沿光栅轴向 $0 \sim 10^{-6}$ 随机分布的,根据式(2)可知,在光波长为 $1.5\mu\text{m}$ 左右、磁感应强度的大小为 1T(特斯拉)数量级时,内双折射的数量级与小磁场引起光纤光栅圆双折射的数量级相同。而当磁场的数量级更低时,内应力引起的双折射更是主要的方面。因此,为了更精确地测量,研究内应力对于磁场测量的影响是非常必要的。

对于光纤内应力,不论是什么方向的,都可以分解为沿光纤轴向(z)和垂直于光纤轴向平面内的 x 方向和 y 方向的应力分量。 z 方向的应力分量影响同外应力, x 、 y 方向的应力分量影响同压力。对于内应力引起的双折射,可以假设光纤光栅分段均匀,并且忽略轴向内应力分量的影响,最后得出其透射谱,如图 1 所示;同时得到其 PDL 谱,如图 2 所示。

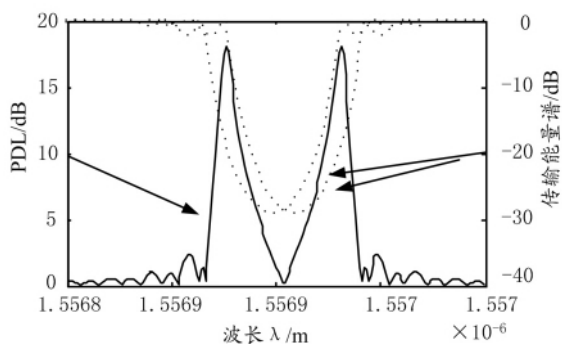


图 1 典型的 PDL 谱和左旋右旋光的透射谱

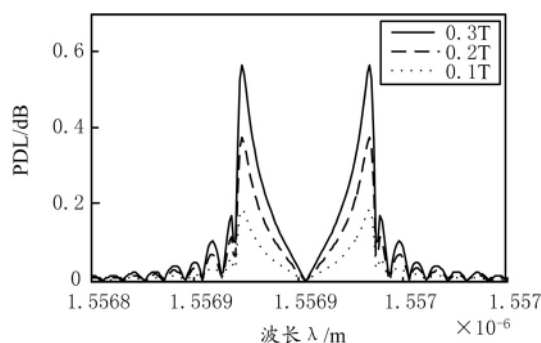


图2 PDL随磁场变化

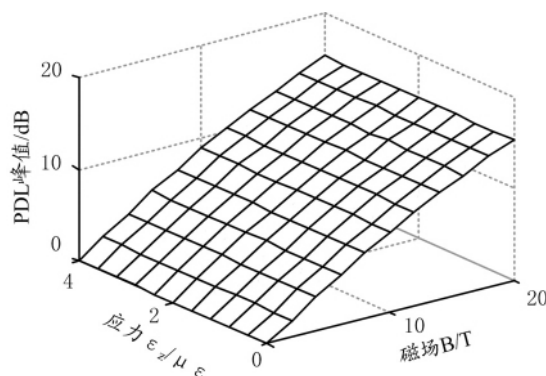


图4 应力对PDL的影响

4 PDL在不同条件下的仿真

本文设计的仿真参数为:光栅长度 $L=40\text{mm}$,光栅周期 $\Lambda=535\text{nm}$,折射率调制深度 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}=5\times 10^{-5}$,有效折射率 $n_{\text{eff}}=1.455$ 。图1为典型的光纤光栅的PDL谱和左旋右旋光的透射能量谱。为便于观察,图1的圆双折射为 $\Delta n=10^{-5}$ 。由图1可知,PDL谱是以Bragg波长为中心的对称图形,两个峰值均在左旋和右旋光透射谱的第一零点处。

图2是在不同磁感应强度条件下的PDL谱,仿真结果表明,PDL确实与磁感应强度呈线性关系。从图2中还可以看出,PDL峰值波长几乎是不变化的,这对于检测与处理数据是非常有利的。

图3和图4分别为温度和应力对于磁场测量的影响。由两图可知,温度和应力的变化不会引起PDL峰值的变化。理论分析表明,温度和应力的变化只会改变取得峰值的波长。

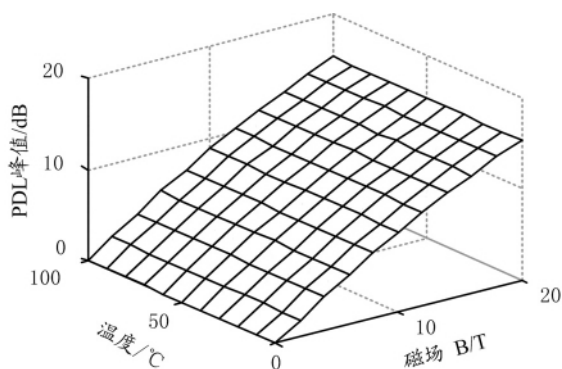


图3 温度对PDL的影响

图5为压力对磁场测量的影响,由图5可知,随着压力的增大,PDL与磁场保持线性关系的范围越来越窄,可见压力严重影响了磁场测量的性能。

图6为交叉敏感的仿真图,选用的光纤光栅长度为40mm,其余参数不变。由图6可见,与理论分析相

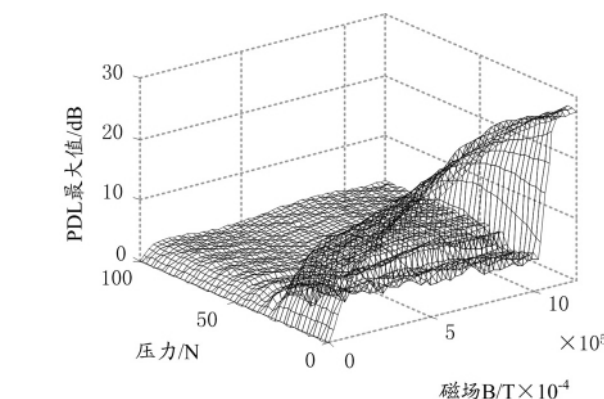


图5 压力对PDL的影响

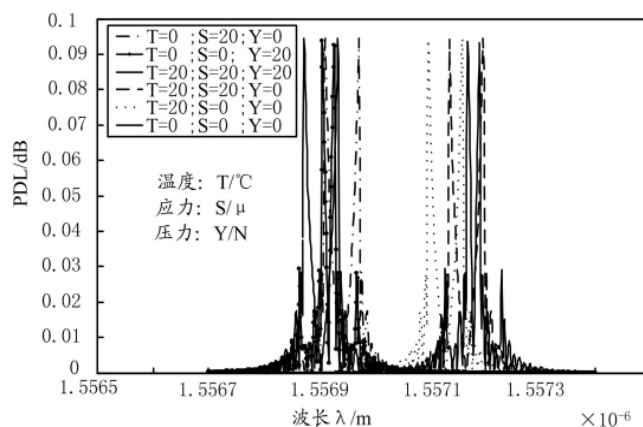


图6 交叉敏感分析

同,当温度、应力和压力变化同时存在时,Bragg反射中心波长漂移,表现为PDL谱对称中心移动。同时,由于双折射,PDL谱型也发生变化。如果压力不变,温度和应力的变化会使PDL保持相同的谱型在波长轴上移动。

图7是内应力对磁场测量影响的仿真。由图7可知,当内应力存在时 ($0\sim 10^{-6}$ 沿光纤轴向随机分布),

何亚蓉,葛海波,闫雪琴,等:布喇格光栅磁场传感器交叉敏感的研究

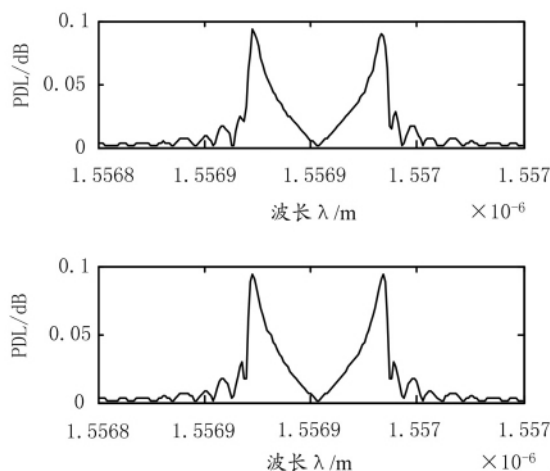


图7 内应力对磁场测量的影响

PDL 的谱型发生了微小的变化,不仅左右对称性被破坏,峰值也受到影响。可见,内应力引起的双折射虽然很小,但是,在测量精度要求比较高的情况下,对 PDL 峰值的影响是不容忽视的。

5 结束语

本文比较系统地讨论了基于偏振相关损耗(PDL)的光纤光栅磁场传感方案的交叉敏感问题,仔细分析了温度、应力、压力和光纤内应力以及它们共同作用下的传感性能。仿真结果表明,PDL 的峰值对于温度和应力变化不敏感,但 Bragg 反射中心波长却会发生漂移。时变压力会严重影响 PDL 的谱型和峰值,而且也会导致中心波长的漂移,压力恒定时,小磁场条件下,PDL 依然与磁场呈线性关系,但是测量灵敏度在压力为 100N 时较无压力时下降了 90%。内应力会破坏 PDL 谱的对称性,也会影响 PDL 的峰值,对于精确度要求高的场合,内应力是必须考虑的方面。在温度、应力、压力变化共同存在的条件下,综合影响的结果是各自影响的线性叠加。本文的部分结论已得到一定的实验

证^[6],但对于内应力部分,现在还难以验证。温度、应力和压力的影响,可以通过两条途径加以解决:①封装,可以采用恒温的坚硬封装,避免温度、应力和压力的影响;②解调技术,研究低成本、快速和准确的解调算法将是下一步的工作之一。本文的结论对于推动基于 PDL 的磁场传感器的实用化具有一定的意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 何万迅,施文康,叶爱伦. 基于长周期光纤光栅的磁场传感方案的实现[J]. 光学技术, 2001,27(6):545-546.
- [3] 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.
- [4] KERSEY A D, MARRONE M J. Fiber Bragg grating high-magnetic-field probe [A]. Proc. SPIE, Tenth International Conference on Optical Fiber Sensors, 1994, 2360(9): 53-56.
- [5] 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.
- [6] 冯奎, 朱勇, 苏洋, 等. 相移光栅磁场传感方案交叉敏感分析[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1020-1025.
- [7] 钟锡华. 现代光学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2004.
- [8] 羊国光, 宋菲君. 高等物理光学[M]. 中国科学技术大学出版社, 2008: 276-277.
- [9] LU Ping, GROBNIC D, MIHAILOV S J. Characterization of the birefringence in fiber Bragg gratings fabricated with an ultrafast-infrared laser [J]. J. Lightwave Technol., 2007, 25(3): 779-786.
- [10] 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.
- [11] 彭晖, 苏洋, 李玉权. 外界条件对光纤光栅磁场传感器性能的影响[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011, 12(2): 103-108.
- [12] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. J. Lightwave Technol., 1997, 15(8): 1277-1294.
- [13] CAUCHETEUR C, BETTE S, CARCIA-OLCINA R, et al. Transverse Strain Measurements Using the Birefringence Effect in Fiber Bragg Gratings[J]. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2007, 19(13): 966-968.

敬告作者

为广泛构架起作者和读者之间的桥梁,本刊加入了 CNKI 中国期刊全文数据库等数据期刊网,即每期刊物出版后,我们将把同样的数据送至上述数据库或网站,使信息能以最快的速度国际化、网络化。其中稿费已包含于本刊一次性所附作者的稿费中。

为尊重作者的著作权,如果有作者不同意将出版后的文章进入上述数据库或网站,来稿时敬请注明,否则将视为同意,谢谢合作。

《光通信技术》编辑部