

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0219-04

# 基于光纤光栅偏振特性的温度、轴向应力不敏感的 磁场测量方法

苏 洋<sup>1</sup> 彭 晖<sup>1</sup> 冯 奎<sup>1</sup> 徐俊华<sup>2</sup> 李玉权<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 解放军理工大学通信工程学院光纤通信实验室, 江苏 南京 210007; <sup>2</sup> 济南军区 72556 部队 13 分队, 山东 济南 250000)

**摘要** 提出了利用光纤光栅的偏振相关损耗(PDL)直接测量磁场的方法。利用耦合模理论进行了理论仿真,验证了在一定的测量范围内 PDL 峰值随外加磁场单调递增的关系。分析了光栅长度和折射率调制系数对磁场传感器测量范围和灵敏度的影响。利用相位掩模方法制作光纤布拉格光栅(FBG)进行实验测量,实验数据和理论吻合较好。同时对此方案的温度、轴向应力不敏感性进行了分析和实验验证,证明了温度和轴向应力不会对偏振特性产生影响,此方法可明显改善交叉敏感问题。

**关键词** 测量; 磁场测量; 传感器; 光纤光栅; 偏振相关损耗; 交叉敏感

**中图分类号** TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s2.0219

## Magnetic Field Measurements Using Polarization Properties of Fiber Grating with Temperature and Axial Strain Insensitive

Su Yang<sup>1</sup> Peng Hui<sup>1</sup> Feng Kui<sup>1</sup> Xu Junhua<sup>2</sup> Li Yuquan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210007, China  
<sup>2</sup> 13 Element of 72556 Unit of PLA, Jinan, Shandong 250000, China

**Abstract** A novel demodulation technique for magnetic field fiber Bragg gratings (FBG) sensors based on the monitoring of the polarization dependent loss (PDL) in transmission is presented. Theoretical simulations are realized using the coupled mode theory. It is shown that in certain range the PDL peak value increases with applied magnetic field monotonously. The effects of grating parameters on measurement range and sensitivity are analyzed. The experimental measurements are conducted on FBG inscribed by means of the phase mask technique. A good agreement between experimental and simulated evolutions is demonstrated. Owing to the polarization properties it is possible to obtain temperature and axial strain-insensitive measurements which is demonstrated by theoretical study and experimental measurements.

**Key words** measurement; magnetic field measurement; sensors; fiber grating; polarization dependent loss; cross-sensitive

### 1 引 言

光纤光栅(FBG)在传感领域引起人们越来越大的兴趣,尤其是智能材料和结构传感中的应力测量。利用这些器件,可以在光纤中分布很多传感元件。它们可以测量静态或动态的场,比如应力和温度<sup>[1~3]</sup>。对于磁场测量,传统的方法主要是利用磁致伸缩材料,这种方法不能够测量脉冲磁场等瞬态磁场<sup>[4]</sup>。Kersey 等<sup>[5]</sup>描述了一种用于监测交流高磁场的光纤探头,利用干涉检测方法检测由磁致圆

双折射引起的光栅中心波长的漂移,从而测量磁场。

在 FBG 中,光栅本征双折射通常是由单边写技术造成的<sup>[6,7]</sup>。同时作用于光栅的横向压力或磁场也可以引入双折射<sup>[5,8]</sup>。

双折射引起波长位移很小且测量器件的分辨率有限,导致在光栅的幅度响应中很难观测到双折射的变化,但双折射可以引起光栅中的偏振相关损耗(PDL)等偏振特性的改变。Caucheteur 等<sup>[9]</sup>利用光栅中的双折射效应进行了横向力的测量。

**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**: 苏 洋(1980—),女,讲师,博士,主要从事光传感技术方面的研究。E-mail: qieziyangyang@163.com

基于对传输中的偏振特性的监测,利用光栅的偏振特性进行磁场测量。利用耦合模理论进行了理论仿真,分析了磁场对 PDL 谱的影响。结果表明,在一定的测量范围内 PDL 值随外加磁场呈单调递增关系。分析了光栅长度和折射率调制系数对磁场测量范围和灵敏度的影响。利用相位掩模方法制作 FBG 进行实验测量,实验数据和理论吻合较好。同时此方案具有对温度、应力不敏感的特性,可明显改善传统传感器中的交叉敏感问题。

## 2 理论分析

在均匀 Bragg 光栅中的布拉格谐振条件为  $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ , 其中  $n_{\text{eff}}$  是光栅的纤芯折射率,  $\Lambda$  是 FBG 的周期。当沿光栅方向有外加磁场时,法拉第效应使光纤光栅中的左旋和右旋两个圆偏振光之间出现了折射率差  $\Delta n$ , 称之为磁致圆双折射<sup>[10]</sup>。与这两个圆偏振相关的有效折射率则为  $n_{\text{eff},l} = n_{\text{eff}} + \Delta n/2$  和  $n_{\text{eff},r} = n_{\text{eff}} - \Delta n/2$ 。因此就出现了两个布拉格条件

$$\lambda_{B,l(r)} = 2n_{\text{eff},l(r)}\Lambda. \quad (1)$$

而加在光纤上的磁场引起的折射率变化为  $(n_{\text{eff},l} - n_{\text{eff},r}) = \frac{VB\lambda^{[10]}}{\pi}$ 。其中  $B$  是磁感应强度,  $V$  为光纤的费尔德常数, 在  $1.3 \mu\text{m}$  附近, 费尔德常数约为  $8 \times 10^{-1} \text{ rad}/(\text{T} \cdot \text{m})$ , 这个效应是比较微弱的。那么这两个布拉格波长的间距为

$$\lambda_{B,l} - \lambda_{B,r} = 2(VB\lambda/\pi)\Lambda. \quad (2)$$

为了分辨出两个布拉格波长之间的微小间距, Kersey 使用了干涉检测方法<sup>[4]</sup>。而实际上, 磁场导致的双折射还引起了光栅中的偏振特性的改变<sup>[7]</sup>。

从光栅的耦合模理论中可推导出复传输系数<sup>[11]</sup>

$$t = \frac{i\alpha}{\sigma \sinh(\alpha L) + i\alpha \cosh(\alpha L)}, \quad (3)$$

式中  $\alpha$  和  $\sigma$  取决于  $n_{\text{eff}}$  以及光栅的周期  $\Lambda$  和折射率调制系数  $\delta n$ , 功率传输系数则为  $T = |t|^2$ 。

当出现双折射时, 由于两个模式在光栅中经历了不同的耦合, 方程(3)给出的复传输系数  $t$  就变为两个系数  $t_l, t_r$ ,

$$t_{l(r)} = \frac{i\alpha_{l(r)}}{\sigma_{l(r)} \sinh[\alpha_{l(r)}L] + i\alpha_{l(r)} \cosh[\alpha_{l(r)}L]}. \quad (4)$$

PDL 的原始定义是光器件或系统在所有偏振状态下的最大传输差值, 即

$$\delta_{\text{PDL}}(\lambda) = 10 \lg [T_{\text{max}}(\lambda)/T_{\text{min}}(\lambda)], \quad (5)$$

式中  $T_{\text{max}}$  和  $T_{\text{min}}$  分别指的是通过 FBG 的最大和最小光功率。分析表明最大最小值总是等于  $T_l$  或

$T_r$ <sup>[12]</sup>, 因此 FBG 的 PDL 可以写为

$$\delta_{\text{PDL}}(\lambda) = |10 \lg [T_l(\lambda)/T_r(\lambda)]|. \quad (6)$$

图 1 仿真了 FBG 中的传输系数以及对应的 PDL 谱。光栅参数为  $L = 10 \text{ mm}$ ,  $\Lambda = 535 \text{ nm}$ ,  $\delta n = 5 \times 10^{-5}$ 。可以看到, 在透射带宽内有很明显的  $\delta_{\text{PDL}}$  值, 而  $T_l$  和  $T_r$  的谱非常接近, 不容易看到  $\Delta n$  的效应。

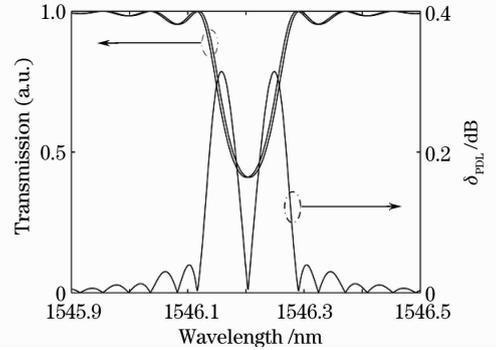


图 1 l 和 r 偏振光的传输系数和 PDL 谱  
Fig. 1 Transmission coefficients (for l and r modes) and PDL spectrum

## 3 磁场对 PDL 谱的影响

图 2 为当磁场改变时的  $\delta_{\text{PDL}}$  随波长的变化谱, 参数设置  $L = 25 \text{ mm}$ ,  $\Lambda = 535 \text{ nm}$ ,  $\delta n = 5 \times 10^{-5}$ , 仿真条件下当磁场值小于 70 T 左右时,  $\delta_{\text{PDL}}$  幅度随磁场单调增加, 而当  $B$  超过 100 T 时, 幅度趋向饱和。

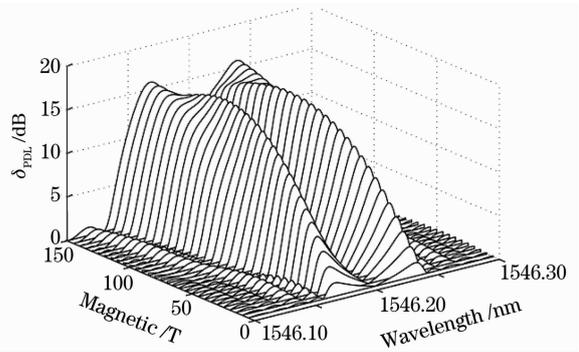


图 2 透射 PDL 谱与磁场的关系

Fig. 2 PDL spectrum in transmission versus magnetic field

图 3 为在不同的光栅长度下  $\delta_{\text{PDL}}$  峰值随外加磁场的变化, 光栅长度范围为  $10 \sim 25 \text{ mm}$ , 步长为  $5 \text{ mm}$ 。仿真时折射率调制系数固定为  $5 \times 10^{-5}$ , 光栅周期为  $535 \text{ nm}$ , 磁场变化范围为  $0 \sim 500 \text{ T}$ , 步长为  $5 \text{ T}$ 。

从图 3 中可以看出, 对于所有的曲线,  $\delta_{\text{PDL}}$  峰值在磁场达到某个值后都趋于一个饱和值, 饱和区域内有一些小的波动, 这些波动是由传输谱中的旁瓣引起的。仿真中四种光栅长度下, 饱和区的  $\delta_{\text{PDL}}$  峰

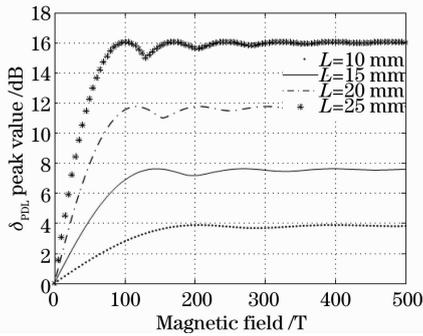


图 3 不同光栅长度下  $\delta_{\text{PDL}}$  峰值与磁场的关系  
Fig. 3 Evolution of  $\delta_{\text{PDL}}$  peak values as function of magnetic field for different grating physical lengths

值分别约为 4, 7, 7, 11.6 和 16 dB。

同时光栅长度对  $\delta_{\text{PDL}}$  峰值具有较大影响。当光栅长度增加时,可以达到的  $\delta_{\text{PDL}}$  峰值增加,因此灵敏度也增加,但是同时  $\delta_{\text{PDL}}$  峰值单调递增的范围降低了。在仿真条件下,对于 10 mm 长的 FBG,  $\delta_{\text{PDL}}$  峰值线性范围约为 100 T,而对 25 mm 长的 FBG 线性范围约为 50 T。

仿真计算得到,对于 10 mm 长的光栅,  $\delta_{\text{PDL}}$  峰值对磁场的灵敏度约为 0.031 dB/T 的量级;对于 25 mm 长的光栅,灵敏度约为 0.30956 dB/T 的量级。比较而言,后者长度是前者的 2.5 倍,灵敏度却是前者的 10 倍左右,这证明长度越长,灵敏度越高。因此根据应用的需求,可以用光栅长度控制磁场的测量范围和灵敏度。

图 4 为光栅长度恒定为 10 mm,折射率调制深度以步长从  $5 \times 10^{-5}$  变化到  $20 \times 10^{-5}$  时,  $\delta_{\text{PDL}}$  峰值与磁场的关系。

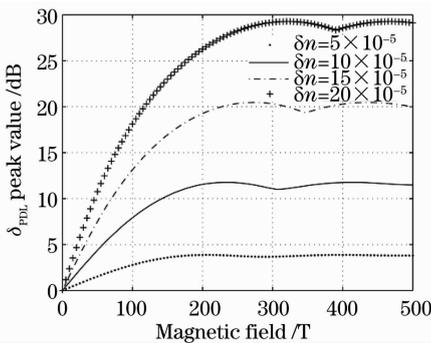


图 4 不同折射率调制系数下  $\delta_{\text{PDL}}$  峰值与磁场的关系  
Fig. 4 Evolution of  $\delta_{\text{PDL}}$  peak values as function of magnetic field for different refractive index modulations

同样  $\delta_{\text{PDL}}$  峰值在一定范围内呈单调递增关系,超过范围后趋向一定的饱和值。仿真可以看出,调制深度越大,灵敏度越高,线性测量范围同样也变小。

经计算比较,因此对于一段 10 mm 的 FBG,当调制深度从  $5 \times 10^{-5}$  增加到  $20 \times 10^{-5}$  时,  $\delta_{\text{PDL}}$  峰值的灵敏度每特斯拉增长约 7.5 倍。因此合理的设计光栅的长度、折射率调制深度等参数可以灵活控制测量灵敏度和测量范围。

### 4 实验研究

将自制光栅利用  $\delta_{\text{PDL}}$  峰值进行磁场测量。利用相位掩模方法在载氢单模光纤中写入 FBG,参数为  $n_{\text{eff}} = 1.455, \Lambda = 535 \text{ nm}, \delta n = 2 \times 10^{-4}, L = 10 \text{ mm}$ 。在实验中,FBG 平行于由电线圈产生的磁场,所加磁场范围为 0~210 mT,步长为 30 mT,利用光矢量分析仪测量 FBG 谱以及 PDL 谱。图 5~8 所示的实验曲线是每 10 次测量的平均值。

图 5 是磁场为 60 mT 时的透射谱以及相对应的 PDL 谱。可以看到在透射带宽范围内 PDL 谱有两个峰值,并且光栅具有一定的本征  $\delta_{\text{PDL}}$  值。

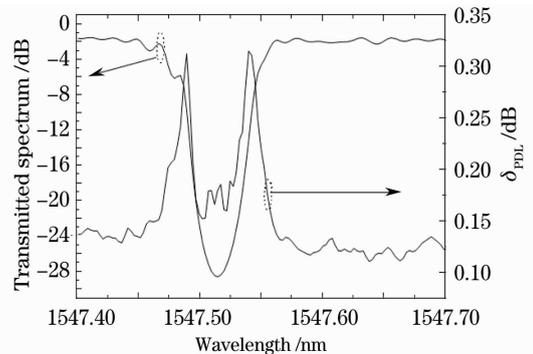


图 5 实验所得透射谱和相应的 PDL 谱  
Fig. 5 Transmitted spectrum and corresponding PDL spectrum in experiment

图 6 分别为 30, 150 和 210 mT 的磁场下 PDL 谱的测量值,可以看出峰值随磁场的增加而单调递增,与理论分析一致。

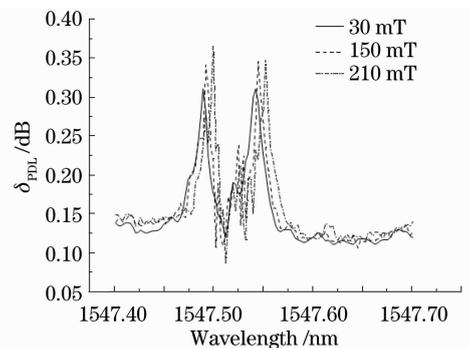


图 6 不同磁场下的 PDL 谱  
Fig. 6 PDL spectrum at different magnetic fields in experiment

图7给出了不同磁场大小下的 $\delta_{\text{PDL}}$ 峰值的仿真值和测量值。可以看出在0~210 mT的范围内, $\delta_{\text{PDL}}$ 峰值幅度单调递增,变化趋势与理论仿真值一致。用线性函数对测量值的变化趋势进行拟合,可以看到 $\delta_{\text{PDL}}$ 的峰值大小与所加磁场的大小基本呈线性变化,其拟合曲线与仿真曲线基本平行,之间存在的差距约为0.3 dB,可以认为这是光栅制作过程中引入的双折射。

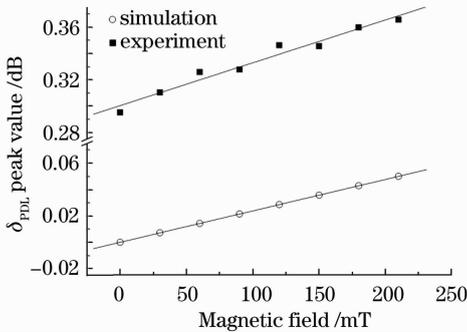


图7  $\delta_{\text{PDL}}$ 峰值与磁场的关系

Fig. 7  $\delta_{\text{PDL}}$  spectrum versus magnetic field

同时,也对PDL谱的温度和轴向应力不敏感特性进行了初步实验验证。实际上,磁场主要产生磁致圆双折射值,而温度和轴向应力的影响主要是中心波长的漂移,因此这两个外界波动不会对偏振特性产生类似的影响<sup>[12,13]</sup>,这也是传统利用波长漂移进行测量要克服交叉敏感的原因所在。通过理论推导得到在改变温度和轴向应力后,仍有 $\delta_{\text{PDL}}'(\lambda) = \delta_{\text{PDL}}(\lambda - \Delta\lambda)$ ,即温度和轴向应力只是引起PDL谱的漂移。

图8为磁场恒定时不同温度条件下的PDL谱和透射谱的测量曲线。可以看到,随着温度的增加,PDL谱随同透射谱一同向长波长方向漂移,而峰值基本保持恒定。同样也进行了不同轴向应力作用下的PDL谱的实验,得到了类似的结果。

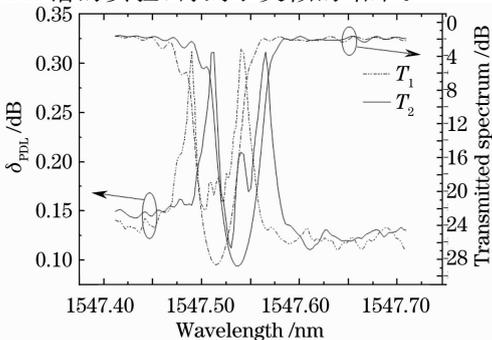


图8 温度改变时的PDL谱和透射谱的变化

Fig. 8 Evolution of PDL and transmitted spectrum with respect to temperature

## 5 结 论

利用耦合模理论和琼斯矩阵对基于光纤光栅偏振相关损耗直接测量磁场的方法进行了理论仿真,重点分析了光栅长度和折射率调制系数对磁场传感器测量范围和灵敏度的影响。利用相位掩模方法制作FBG进行实验测量,实验数据和理论吻合较好。同时对此方案的温度、轴向应力不敏感性进行了初步实验验证,证明了温度和轴向应力不会对偏振特性产生影响。并且此方案可以通过改善光栅结构进一步优化传感特性,目前此部分的工作正在进行中。

## 参 考 文 献

- Zhang Weigang, Tu Qinchang, Sun Lei *et al.*. Recent progress in theory, design and applications of fiber grating sensors [J]. *Progress in Physics*, 2004, **24**(4): 398~423
- 张伟刚,涂勤昌,孙磊等. 光纤光栅传感器的理论、设计及应用的最新进展[J]. *物理学进展*, 2004, **24**(4): 398~423
- Jiang Desheng, He Wei. Review of applications for fiber Bragg grating sensors [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(4): 420~430
- 姜德生,何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(4): 420~430
- 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
- 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
- A. D. Kersey, M. J. Marrone. Fiber Bragg grating high-magnetic-field probe [C]. *SPIC*, 1994, **2360**(9): 53~56
- S. Bette, C. Caucheteur, M. Wuilpart *et al.*. Spectral characterization of differential group delay in uniform fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**: 9954~9960
- Ge Tingwu, Lu Dan, Xu Kun *et al.*. Theoretical analysis of by polarization dependent loss induced 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
- 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
- C. Caucheteur, S. Bette, R. Garcia-Olcina. Transverse strain measurements using the birefringence effect in fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photo Technol. Lett.*, 2007, **13**(19): 966~968
- Liu Gongqiang, Yue Zhiqiang, Shen Defang. *Magneto-optics* [M]. Shanghai: Science and Technology Press, 2001
- 刘公强,乐至强,沈德芳. *磁光学* [M]. 上海:上海科学技术出版社, 2001
- T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8)S: 1277~1294
- C. Caucheteur, S. Bette, R. Garcia-Olcina *et al.*. Use of the polarization properties of fiber Bragg gratings for sensing purposes [C]. *SPIE*, 2006, **6189**: 618922
- 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