

文章编号: 0253-2239(2008)09-1717-06

# 基于光纤光栅的磁场测量新方法

彭 晖 苏 洋 李玉权 陈 鹏 吴伟磊 朱英勋

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要** 提出了一种基于光纤光栅中法拉第效应和测量偏振相关损耗的直接测量磁场的新方法,给出了理论分析和实验结果。当有外加磁场时,光纤光栅中的法拉第效应使两个圆偏振光的传播常量改变,从而导致光纤光栅的偏振相关损耗的变化。仿真结果表明,外加磁场与偏振相关损耗峰值在一定的测量范围内存在线性关系,测量结果对温度变化不敏感。分析了光栅的参量对测量性能的影响。实验中得到该方案测量磁场的灵敏度为  $7.8 \times 10^{-6}$  dB/Gs,利用现有精度为  $10^{-5}$  dB 的光矢量分析仪得到最小可测磁场为 2 Gs。实验与理论吻合较好。

**关键词** 光纤光栅; 磁场测量; 法拉第效应; 偏振相关损耗; 温度不敏感

**中图分类号** TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082809.1717

## Measurement for Magnetic Field with Fiber Grating

Peng Hui Su Yang Li Yuquan Cheng Peng Wu Weilei Zhu Yingxun

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

**Abstract** A new magnetic field measurement method based on Faraday effect and measurement of polarization-dependent loss (PDL) in fiber grating was proposed and analyzed in theory and experiment. When the external magnetic field is applied, the transmission constants of the two circularly polarized lights in fiber grating will be changed by the Faraday effect, and so does the PDL of fiber grating. The simulations show there is a linear relationship between the peak value of PDL and magnetic field in a certain range. Moreover, this method is insensitive to temperature. The influence of parameters of grating on measurement performance was analyzed. The measurement sensitivity is  $7.8 \times 10^{-6}$  dB/Gs and the precision is 2 Gs using the optical vector analyzer with  $10^{-5}$  dB precision in experiment, which agree well with the theoretical analysis.

**Key words** fiber grating; magnetic field measurement; Faraday effect; polarization-dependent loss (PDL); temperature insensitive

## 1 引 言

光纤光栅作为传感元器件,除了具有普通光纤传感器体积小、灵敏度高、带宽宽、耐腐蚀等优点外,而且易于集成,能够实现多点分布式测量,克服了传统传感器测量成本高、精度低的缺点。在光纤光栅磁场测量中,最常见的方法是利用外界物质。在光纤光栅外涂上磁致伸缩材料或者将光纤光栅镶入磁致伸缩材料中形成磁场传感头,通过磁力效应,对光纤光栅形成外应力,基于光纤光栅对外应力的敏感性,达到磁场探测目的<sup>[1~3]</sup>。在测量较弱的磁场或传感材料的磁致伸缩较小时,可以采用增敏措施来

提高磁场记录。王黎蒙等<sup>[1]</sup>分析了镍和铽两种强磁体条件下的磁致伸缩量,外磁场、布拉格波长位移量和中心波长四个参量之间的相互关系,但磁致伸缩作为机械效应,其高频响应必然较差。1994年,A. D. Kersey等<sup>[4]</sup>提出了一种直接测量磁场的方法,其基本原理是在外加磁场作用下,光纤光栅中的左旋和右旋圆偏振光的布拉格反射波长发生漂移,只需测出此漂移量即可直接确定磁场的大小。但是由于石英材料的费尔德(Verdet)常量很小,磁场导致的反射谱分裂很小,目前最普遍的光谱分析仪的精度约50 pm,检测起来较困难。A. D. Kersey等采

收稿日期: 2007-12-20; 收到修改稿日期: 2008-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(60472007)和国家自然科学基金青年科学基金(60502003)资助课题。

作者简介: 彭 晖(1979—),男,博士研究生,主要从事光传感技术方面的研究。E-mail: maomaopenghui99@tom.cn

导师简介: 李玉权(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事光信息技术方面的研究。E-mail: proflyq@126.com

用非平衡马赫-曾德尔(M-Z)光纤的检测方法测量磁场的大小,因此这种方法不利于测量弱磁场。本文提出了一种利用光纤光栅直接测量磁场的新方法,利用右旋和左旋圆偏振光的透射能量的偏振相关损耗(PDL)来测量磁场,并进行了仿真和实验。

## 2 测量原理

由菲涅耳理论和法拉第效应<sup>[5]</sup>得到由磁场引起的光纤左旋和右旋圆偏振光折射率之差为

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

式中  $n_L, n_R$  分别为左旋光和右旋光的有效折射率,  $B$  为磁场,  $V$  为 Verdet 常量。石英光纤在 1300 nm 波长附近的 Verdet 常量大约为  $8 \times 10^{-5}$  rad/(Gs · m)。

### 2.1 光纤布拉格光栅的偏振相关损耗

偏振相关损耗<sup>[7~10]</sup>定义为两个偏振模之间的差分损耗。对于光纤布拉格光栅(FBG),其 PDL 则为

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

式中  $T_L(\lambda), T_R(\lambda)$  分别为左旋和右旋圆偏振光的能量透射系数。根据模耦理论可得光栅的透射系数:

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

式中  $\alpha = \sqrt{\kappa^2 - \sigma^2}$ ,  $\kappa$  为交流耦合系数,  $\sigma$  为直流耦合系数,  $L$  为光栅长度。从而得到左旋和右旋圆偏振光的能量透射系数分别为  $T_L(\lambda) = |t_L(\lambda)|^2$ ,  $T_R(\lambda) = |t_R(\lambda)|^2$ 。

根据模耦理论可知,FBG 的中心反射波长为<sup>[6,11]</sup>

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (4)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  为导模的有效折射率,  $\Lambda$  为光栅的周期。加入磁场后,光栅产生法拉第效应,左旋和右旋圆偏振光的有效折射率发生改变<sup>[12,13]</sup>,因此对应的布拉格波长之间的差为

$$\lambda_{B,L} - \lambda_{B,R} = 2(VB\lambda/\pi)\Lambda. \quad (5)$$

通过分析可知,磁场的改变将会影响左旋和右旋圆偏振光的透射系数,左旋和右旋圆偏振光分别有一个反射峰。文献中<sup>[4]</sup>中提到通过测量光栅两个反射峰的距离,利用(5)式来确定磁场大小,该方法需要很精密的仪器和复杂的检测方法。本文中不采用直接测量布拉格波长漂移来测量磁场,而将其转换为测量光栅的 PDL 来检测磁场的大小。

在外加磁场的作用下,左旋和右旋偏振光的布拉格波长发生了改变,这样就引起了光栅的 PDL。根据(2)式、(3)式,略去中间推导过程,可以将 PDL

表示为:

$$L_{PD}(\lambda) = \left| 10\lg \frac{\frac{\alpha_L^2}{\kappa_L^2 \cosh^2(\alpha_L L) - \sigma_L^2}}{\frac{\alpha_R^2}{\kappa_R^2 \cosh^2(\alpha_R L) - \sigma_R^2}} \right|. \quad (6)$$

根据(6)式可以得到 PDL 的示意图如图 1 所示。由图 1 可知,最小的 PDL 值出现在两个谱的交叉点,而且在透射谱主阻带内有最大 PDL 值。

在  $\sigma_y^2/k^2 \gg 1$  的条件下,(6)式可以近似简化为:

$$L_{PD}(\lambda) = 80B\kappa \frac{n_{\text{eff}}V\lambda\Lambda}{(\ln 10)\lambda_B^2\sigma_L\sigma_R}, \quad (7)$$

式中  $\lambda_B$  为没有磁场作用条件下的布拉格波长,在测量的磁场动态范围内,  $\sigma_L, \sigma_R$  可以近似认为是不变的。在这些合理的近似条件下,由(7)式可见,以 dB 表示的 PDL 值与磁场成正比。如果磁场太大,就不能有这些近似条件存在,PDL 的值将不再与磁场成正比。利用该特性,可以用来测量磁场的大小,为了便于测量,一般采用 PDL 的峰值来测量磁场。

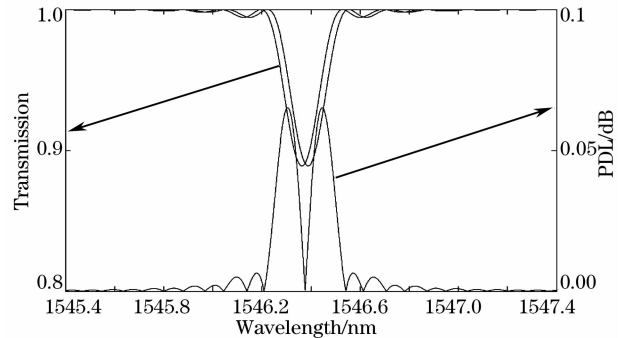


图 1 左旋和右旋圆偏振光的透射能量系数与 PDL  
Fig. 1 Transmission coefficients for left-handed and right-handed circular polarized lights

### 2.2 温度敏感性

由于热胀效应,温度变化使得 FBG 光栅常量发生变化,另一方面热光效应使得光栅区域的折射率发生变化。在一定温度范围内两者均与温度的变化量  $\Delta T$  成正比,可以分别写为<sup>[14,15]</sup>

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = a\Delta T, \quad (8)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} = -\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dF} \frac{dF}{dT} \Delta T, \quad (9)$$

式中  $a$  为光纤材料的热膨胀系数,  $a \approx 5.5 \times 10^{-7}$   $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ,  $T$  为温度,  $F$  为光纤的归一化频率。温度引起的 FBG 波长漂移主要取决于热光效应,它占热漂移量的 95% 左右,记

$$\xi = -\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dF} \frac{dF}{dT}, \quad (10)$$

称之为热光系数,石英光纤中  $\xi = 6.67 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,则

$$\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} = \xi \Delta T. \quad (11)$$

在温度变化后,光栅的有效折射率改变,略去推导过程,得到变化后的透射谱为

$$T'(\lambda) = T(\lambda - \Delta\lambda), \quad (12)$$

式中  $\Delta\lambda = \lambda'_{\text{B}} - \lambda_{\text{B}}$ . 于是

$$L'_{\text{PD}}(\lambda) = L_{\text{PD}}(\lambda - \Delta\lambda). \quad (13)$$

根据(8)式~(13)式,仿真给出了温度变化前后PDL的改变如图2所示,由图2可见,温度的改变

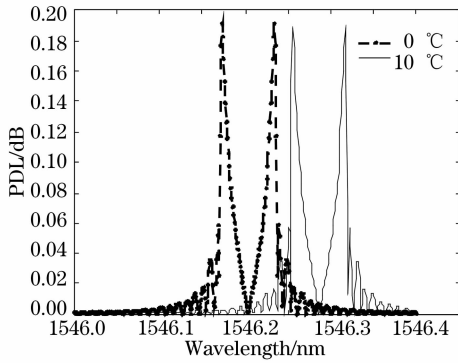


图2 不同温度下PDL的值

Fig. 2 PDL at different temperatures

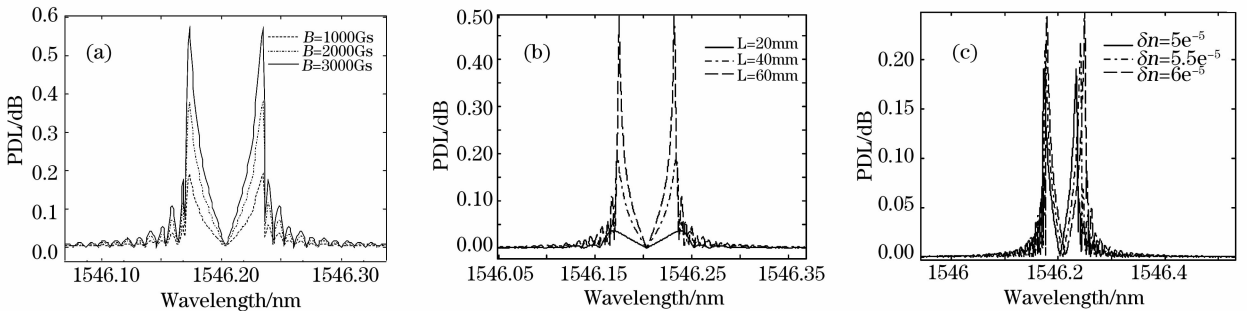


图3 PDL随磁场大小(a),光栅长度(b)及调制深度(c)的变化曲线

Fig. 3 PDL versus wavelength at different magnetic fields (a), grating lengths (b) and modulation depths (c)

进一步的研究发现,PDL峰值并不是一直与磁场的大小呈线性关系,这与理论上的分析是一致的。图4给出了在光栅长度分别为40 mm和50 mm,其他参量不变的条件下PDL峰值与磁场变化的关系。由图4可见,PDL的峰值趋近一个极限值,光栅长度为40 mm时约30 dB,50 mm时约为35 dB。在 $0 \sim 10^5$  Gs量级之间,PDL峰值随磁场呈线性关系,超过这一值后,PDL大小趋于饱和,这给出了该方案所能测量的磁场范围。利用PDL与磁场成线性关系的这一特性,通过测量PDL值就可以推算出磁场的大小。

只是让PDL的谱在波长轴上移动,但不会影响PDL的值。因此利用该方法测量磁场,其测量结果对温度不敏感。

### 3 仿 真

设计一个光栅,其  $n_{\text{eff}} = 1.455$ ,  $\Lambda = 535$  nm,光栅长度  $L = 40$  mm,折射率调制深度  $\delta n = 5e^{-5}$ 。根据给定的光栅数据和(6)式,可以得到数值仿真结果。

PDL随磁场改变的关系如图3(a)所示。可见PDL是一个以布拉格波长为中心的对称图形,它的值随磁场的增加而增加,而且磁场的变化并没有引起其谱形状的变化。

同样,改变光栅的长度及调制深度也会影响PDL,如图3(b)、图3(c)所示。增加光栅长度和调制深度会增加光栅的反射率,同样会使PDL的峰值增加。利用该现象,可以根据不同的需要设计不同长度或调制深度的光栅。在小磁场情况下,如果使用短光栅则PDL的峰值太小而不适合测量,此时应该使用较长的光栅或调制深度大的光栅。同时可见,改变光栅的长度及调制深度会改变PDL的形状。

将该方法与文献[4]提出的方法相比较。利用长度40 mm,调制深度为 $5e^{-5}$ 的光栅进行仿真,比较这两种测量方法灵敏度的差别,如图5所示。可见利用Kersey的方法测量中心波长的漂移,磁场每改变1Gs,波长的变化量为 $4.21e^{-017}$ ,而PDL的变化量是 $1.9 \times 10^{-4}$  dB。即使在1000 Gs的磁场下,波长变化量仅为0.042 pm,PDL变化量为0.19 dB。目前普通的光谱仪的精度为几十皮米,所以想通过测量波长的变化来得到磁场的大小很困难。而目前光矢量分析仪(OVA)测量PDL的精度在 $10^{-5}$  dB量级<sup>[16]</sup>。因此在光栅长度为40 mm时,OVA检测的

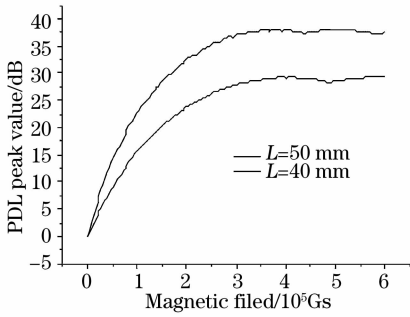


图 4 不同光栅长度下的 PDL 峰值随磁场的变化趋势  
Fig. 4 PDL peak value versus magnetic field at different lengths of fiber grating

灵敏度为 0.1 Gs, 如果增加光栅的长度, 测量的灵敏度还可以增加。图 6 是磁场为 1000 Gs 时, 利用不同长度的光栅测量得到的 PDL 值, 因此可以通过增加光栅的长度大大提高测量的灵敏度。但如图 4 所示, 增加光栅的长度会使测量的动态范围减少, 所以在设计时, 应该根据实际的需要, 在测量动态范围和测量灵敏度上做折中。

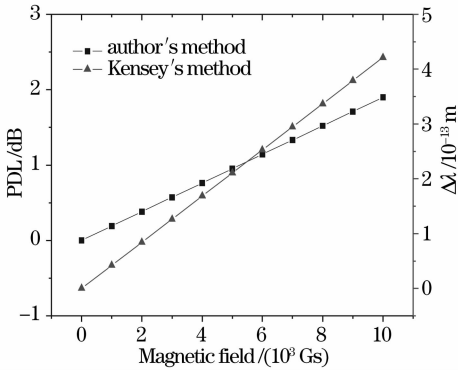


图 5 两种方法测量磁场的灵敏度比较  
Fig. 5 Sensitivity comparison of two methods for magnetic field measurement

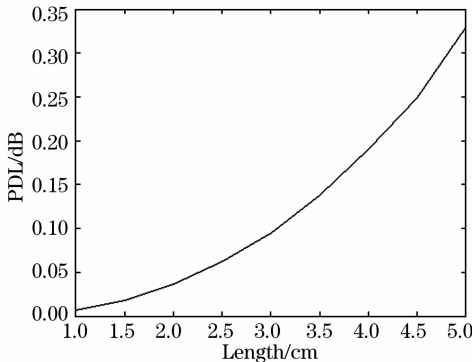


图 6 不同长度光栅的灵敏度  
Fig. 6 Sensitivity at different fiber grating lengths

### 4 实 验

采用自行研制的光纤布拉格光栅, 具体技术指标: 单模光纤载氢写入, 掩模板周期为 535 nm, 布拉格波长 1547.54 nm; 由于实验所用的磁场发生器较短, 因此光栅长度 10 mm; 有效折射率 1.455; 调制深度  $5e^{-5}$ 。图 7 给出了磁场测量的实验框图, 光矢量分析仪(LUNA OVA)的外腔式激光器发出线偏振光, 通过偏振控制器(PC)后输入光纤布拉格光栅, 调节 PC 使透过光功率最大。光栅放入磁场发生器中, 光栅的透射光进入光矢量分析仪进行测量和分析。

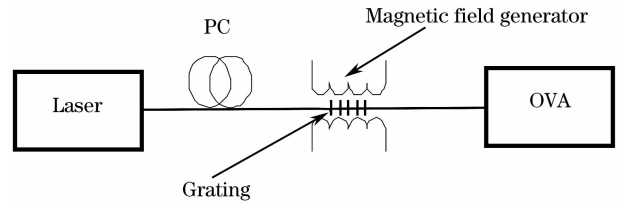


图 7 磁场测量实验框图

Fig. 7 Schematic of magnetic field measurement

图 8 给出了实测光栅的透射谱, 中心波长为 1547.54 nm, 谱宽为 0.1 nm。随着磁场的增加, 磁场发生器的温度也会增加, 导致了如图 8 的透射谱的漂移。图 9(a) 给出了在未加磁场时光栅的偏振相关损耗, 可见并不为零, 在透射谱的范围内, PDL 有一个很突出的部分, 这是由于光栅本身固有的 PDL, 大约为 0.3 dB。在透射谱外的部分也不是 0, 这是由于光纤本身的非圆形特性所导致的自身 PDL。图 9(b) 所示为外加不同的磁场后光栅的偏振相关损耗, 光栅的 PDL 明显出现了变化, 从图中可见明显有两个尖峰, 随磁场的增加, PDL 的峰值也在增加, 这与理论仿真是相一致的。

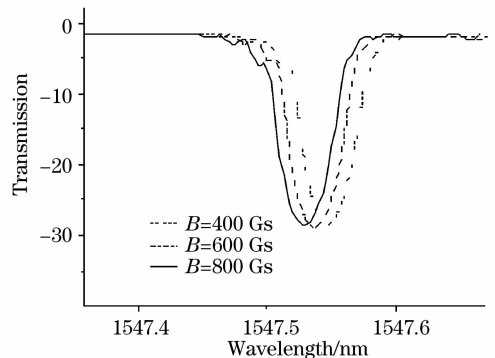


图 8 光栅实测的透射谱  
Fig. 8 Measured FBG's transmission spectrum

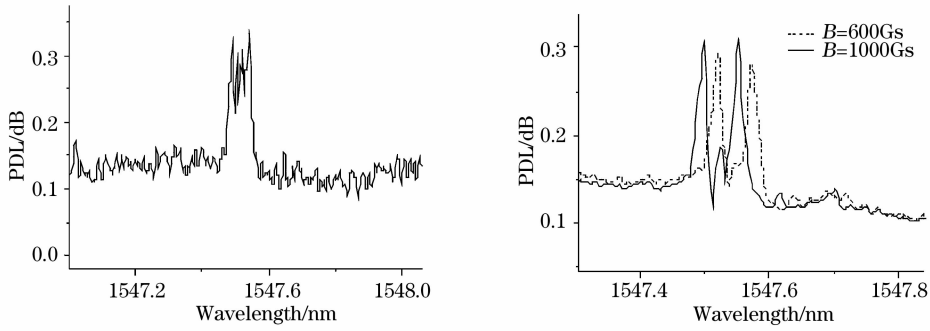


图9 未加磁场(a), 加入磁场(b)的 PDL

Fig.9 PDL without (a) and with (b) magnetic field

表1给出了在400~2400Gs,步长为200Gs的磁场下,理论的PDL值与实测的PDL值。图10根据表1的数据,分别给出了仿真和实测的磁场大小与PDL峰值之间的关系,可见实测的PDL的峰值大小与所加磁场的大小呈线性关系,其拟合曲线与仿真的拟合曲线平行,之间存在的差距约为0.3dB,这与如图9(a)所给出的光栅自身固有的PDL值是相符的。由于实验使用的光栅长度为10mm,则磁场传感器的灵敏度为 $6.3 \times 10^{-6}$  dB/Gs,采用OVA进行PDL测量,OVA的精度为 $10^{-5}$  dB,则磁场传感器所能测量的最小磁场约为2Gs。

二是连接光栅与光矢量分析仪所用的光纤是普通的单模光纤而非保偏光纤,光在传输过程中的主偏振态会发生变化。因此要实现高精度的磁场测量,必须采用保偏光纤并在保偏光纤上写入光栅,另外还需要一定的封装措施。

表1 实验测量结果

Table 1 Measured results

Magnetic field /Gs	PDL /dB	
	Experimental peak	Simulative peak
400	0.00252	0.29518
600	0.00377	0.30093
800	0.00503	0.30344
1000	0.00629	0.30865
1200	0.00755	0.30913
1400	0.0088	0.30937
1600	0.01006	0.31026
1800	0.01132	0.31052
2000	0.01258	0.31138
2200	0.01384	0.31248
2400	0.01509	0.31456

通过实验验证,直接通过测量光栅透射光的PDL来测量磁场的大小是可行的。实验结果与仿真结果吻合得相当好。

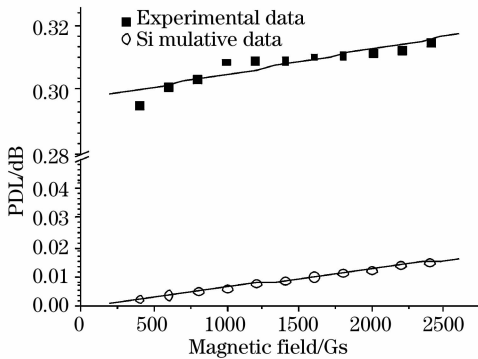


图10 实测外加磁场与PDL峰值的关系

Fig.10 Applied magnetic field versus PDL peak

根据(7)式和实际的光栅参量及表1的测量数据,理论计算得到光纤光栅磁场传感器的磁场灵敏度为 $k=6.3 \times 10^{-6}$  dB/Gs,而实验测量灵敏度约为 $k=7.8 \times 10^{-6}$  dB/Gs,比理论值略高一些,这是由于在光栅的制作过程中,仿真与制作出来的光栅在参量上会有一些的差异,引起测量值与理论值之间差异的原因。

从图10可见,每点测量值并不是呈严格的线性,而是在周围波动,其线性拟合度为0.91,通过分析,可知误差的来源有两个方面:一是由光栅与光纤的振动造成,光栅与光纤的振动会影响光的偏振态;

## 5 结 论

给出了一种新颖、简单的直接利用光纤光栅测量磁场大小的方法。该方法的基础是光纤光栅的PDL值与外加磁场的大小呈线性关系。分析了光栅长度、调制深度对PDL的影响,以及该方案可以测量的磁场动态范围。数值仿真和实验结果证实了该方案的可行性。实验结果与理论分析基本一致,证明利用该方案可以进行磁场的测量,测量的动态范围在 $10^5$ Gs附近。并且该方案具有对温度变化不敏感的优点。

致谢 南京大学微波光子技术实验室陈向飞教授提供光矢量分析仪,特此表示衷心的感谢!

### 参 考 文 献

- 1 Wang Limeng, Zhu Ronghua. Sensing scheme for magnetic field with fiber Bragg grating[J]. *Laser & Infrared*, 1999, **29**(4): 238~242  
王黎蒙,朱荣华. 光纤布拉格光栅磁场传感方案[J]. 激光与红外 1999, **29**(4): 238~242
- 2 He Wanxun, Shi Wenkang, Ye Ailun. Realization of long period fiber grating based on magnetic field sending scheme[J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(6): 545~546  
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 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
- 4 A. D. Kersey, M. J. Marrone. Fiber Bragg grating high-magnetic-field probe [A]. *Proc. SPIC, Tehth International Conference on Optical Fiber Sensors*, 1994, **2360**(9): 53~56
- 5 Zhong Xihua. *Modern Fundamentals of Optics* [M]. Beijing: Beijing University Press, 2004  
钟锡华. 现代光学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2004
- 6 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 7 S. Bette, C. Caucheteur *et al.*. Spectral characterization of differential group delay in fiber Bragg grating written into Hi-Bi optical fiber[C]. *ECCO 2005 Proceedings*, vol3 paper we4. P. 131
- 8 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
- 9 Ping Lu, Dan Grobnc, Stephen J. Mihailov. Characterization of the birefringence in fiber Bragg gratings fabricated with an ultrafast-infrared laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(3): 779~786
- 10 Ivan P. Kaminow, Dingyi Li. *Optical Fiber Telecommunications* [M]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunications Press, 2006  
甘民乐,厉鼎毅. 光纤通信[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006
- 11 Gao Zhipeng, Yu Zhenhong, Xing Lihua. A novel method for reconstructing strongly reflecting fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 991~996  
高志鹏,余震虹,邢丽华. 一种重构强反射光纤布拉格光栅的新方法[J]. 光学学报, 2006, **26**(7): 991~996
- 12 Wu Fei, Li Lixin, Li Zhiquan. Theoretical analysis of fiber Bragg grating characterization by applying transverse force[J]. *Chin. 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
- 13 Liqun Huang, Weiping Huang, Jingkuan Wang *et al.*. Improved layer peeling algorithm for strongly reflecting fiber gratings[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(9): 505~507
- 14 Yu Youlong. Research on fiber Bragg grating and its application in sensing field[D]. Tianjing: Naikai University, 1996.  
余有龙. 光纤光栅及其在传感领域中应用的研究[D]. 天津: 南开大学博士学位论文, 1999
- 15 Li Wei, Zhang Xiaopin, Zhang Min *et al.*. Reduction of cross sensitivity in fiber Bragg grating sensor basedon the principle of polarized-light interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 19~24  
李卫,张小频,张民等. 偏振光干涉法消除光纤光栅解调中的交叉敏感现象[J]. 光学学报, 2006, **26**(1): 19~24
- 16 Optical Vector Analyzer User Guide, Document version 4.7 for OVA control software version 3.7.1. 2006 Luna Technologies, Inc