

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0282-05

# 对数三角形光纤光栅磁场测量性能分析

冯 奎<sup>1,2</sup> 朱 勇<sup>1</sup> 苏 洋<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)  
(<sup>2</sup> 中国人民解放军 96175 部队, 安徽 黄山 245600)

**摘要** 基于光纤光栅偏振效应的磁场测量系统中, 偏振相关损耗受到光纤光栅结构的影响。以磁场测量的原理为基础, 分析光纤光栅透射谱与系统测量范围和灵敏度之间的关系, 光纤光栅透射谱的斜边带宽和斜率大小分别反映了磁场的测量范围和灵敏度。通过对均匀光栅、相移光栅和对数三角形等光栅结构磁场测量性能的仿真比较, 发现对数三角形光纤光栅具有较宽的偏振相关损耗峰值带宽, 能够有效提高测量系统的实时性。利用重构等效啁啾技术设计制作对数三角形光纤光栅进行实验分析, 实验结果与理论仿真基本吻合, 为测量系统中光纤光栅的选择提供了参考。

**关键词** 磁场测量; 偏振相关损耗; 对数三角形光栅; 测量范围; 灵敏度

中图分类号 TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0282

## Analysis of Performance on Logarithm-Triangle Fiber Grating Magnetic Field Measurement

Feng Kui<sup>1,2</sup> Zhu Yong<sup>1</sup> Su Yang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Communications Engineering, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjin, Jiangsu 210007, China)  
(<sup>2</sup> 96175 Unit of People's Liberation Army, Huangshan, Anhui 245600, China)

**Abstract** In the system of magnetic field measurement based on the polarization properties of fiber grating, the polarization dependent loss (PDL) is influenced by the structure of fiber grating. From the principle of the measurement system, the bandwidth and slope of transmission spectrum corresponding to the measurement range and sensitivity respectively which relate to the grating structure are analyzed. The measurement performance on uniform, phase shifted, and logarithm-triangle fiber gratings is simulated, which shows that the logarithm-triangle fiber grating can broaden the bandwidth of PDL peak values and improve the measurement responsibility. The experiment with logarithm-triangle fiber grating designed by the technology of reconstruction equivalent chirp is implemented, and the result provides reference for grating structure selected in the measurement system.

**Key words** magnetic field measurement; polarization dependent loss; logarithm-triangle grating; measurement range; measurement sensitivity

## 1 引 言

随着光纤光栅制作技术的日趋成熟, 光纤光栅在传感领域得到了飞速发展, 目前已经成功运用到温度、应力和压力等传感领域<sup>[1~3]</sup>。在磁场传感的发展过程中, 传统的电学测量手段已经难以满足现

代复杂电磁环境的要求, 结合光纤光栅的特点, 产生了借助光纤光栅实现磁场传感的方法<sup>[4~6]</sup>。在外界磁场变化的影响下, 光的偏振相关特性会发生改变, 通过对光纤光栅偏振相关损耗(PDL)的测量达到磁场测量的目的, 并且可以通过设计光纤光栅结构来

收稿日期: 2010-04-20; 收到修改稿日期: 2010-05-31

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

提高磁场测量系统的性能<sup>[7,8]</sup>。本文分析了光纤光栅结构与磁场测量系统性能之间的关系,设计并制作对数三角形光纤光栅进行实验分析研究,以提高磁场测量系统性能。

## 2 光纤光栅透射谱与磁场测量性能关系

### 2.1 磁致偏振相关损耗

在外加磁场情况下,忽略光纤光栅中双折射的影响,光纤光栅的 PDL 定义为左、右旋圆偏振光之间的差分损耗,它体现了光栅对不同偏振态的敏感度。表示式为<sup>[7]</sup>

$$P_{DL}(\lambda) = |10\lg[T_L(\lambda)/T_R(\lambda)]| = |10\lg T_L(\lambda) - 10\lg T_R(\lambda)|, \quad (1)$$

式中  $T_L(\lambda)$  和  $T_R(\lambda)$  分别表示左旋和右旋圆偏振光的透射率。

在外加磁场时,左、右旋圆偏振光布拉格波长  $\lambda_{BL}$  和  $\lambda_{BR}$  之间的差值  $\Delta\lambda$  可表示为<sup>[9,10]</sup>

$$\Delta\lambda = \lambda_{BL} - \lambda_{BR} = 2VB\lambda\Lambda/\pi, \quad (2)$$

式中  $V$  表示光纤光栅的 Verdet 常数,  $B$  表示磁场的

磁感应强度,  $\Lambda$  表示光栅周期。可以看出布拉格波长的差值与磁感应强度呈线性关系。由(1),(2)式可得 PDL 与磁感应强度之间的关系为

$$\frac{\partial P_{DL}(\lambda, B)}{\partial B} \approx \frac{1}{C} \left| \frac{dT_{dB}(\lambda)}{d\lambda} \right|, \quad (3)$$

式中  $T_{dB}(\lambda)$  表示透射谱,  $C = 2V\lambda\Lambda/\pi$ , 在光栅结构固定时,  $C$  为常数。因此在一定范围内,不同波长处的 PDL 随磁场呈线性变化,通常通过检测 PDL 的峰值来进行磁场测量。

### 2.2 光纤光栅透射谱与性能指标之间的关系

为直观描述光栅透射谱与磁场测量系统的灵敏度和测量范围之间的关系,假设光栅透射谱是三角形结构,即为对数三角形光纤光栅。光栅透射谱带宽左斜边带宽  $\Delta f_L$  为 0.05 nm,右斜边带宽  $\Delta f_R$  为 0.1 nm,边缘的倾斜角度  $\theta_1$  小于  $\theta_2$ ,在磁场影响下左、右旋圆偏振光布拉格波长间距为  $\Delta\lambda$ 。定义透射谱插入损耗最大值的绝对值为透射谱的深度  $h$ ,如图 1 所示。

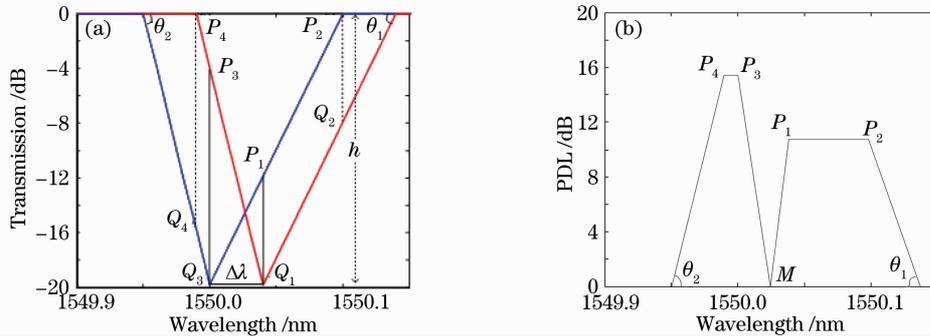


图 1 磁场引起理想对数三角形光栅的透射谱变化(a)及其 PDL(b)

Fig. 1 Transmission spectrum (a) and PDL (b) of ideal logarithm-triangle fiber grating changed by magnetic field

图 1(a)中  $P_1Q_1, P_2Q_2, P_3Q_3$  和  $P_4Q_4$  值分别表示不同波长处左、右旋圆偏振光透射谱的差值,即 PDL 值,当波长为左旋布拉格波长时, PDL 值最大。在未加磁场布拉格波长  $\lambda_B$  在  $Q_1Q_3$  中心位置, PDL 值为 0。磁场引起的偏振相关损耗谱如图 1(b)所示。可以看出,由于光纤光栅透射谱的不对称性, PDL 谱两个峰值的大小和宽度都不相同,两个 PDL 峰值与  $\Delta\lambda$  之间的关系分别表示为

$$\begin{aligned} P_{DL}(\lambda_{BL}) &= P_3Q_3 = \Delta\lambda \cdot \tan \theta_2 \\ P_{DL}(\lambda_{BR}) &= P_1Q_1 = \Delta\lambda \cdot \tan \theta_1 \end{aligned} \quad (4)$$

倾斜角度小的一侧对应 PDL 幅值较小,表明其测量灵敏度较低,但同时可见其 PDL 谱峰值处有较宽的平台,这表明其具有更宽的测量范围,考虑测量系统波长可能存在小范围内的波动,这一较宽的平

台也能提高测量的稳健性。磁场测量灵敏度可以定义为 PDL 随磁场的变化率,因此磁场测量的灵敏度由透射谱斜率的绝对值决定。当透射谱斜率  $\theta_1 = \theta_2$  时,光纤光栅透射谱的深度  $h$ 、斜边带宽  $\Delta f$  和  $\theta$  之间存在关系为

$$h = \tan \theta \cdot \Delta f, \quad (5)$$

式中  $\Delta f$  决定了磁场测量系统的测量范围,  $\tan \theta$  即透射谱的斜率大小决定了磁场测量的灵敏度,并且灵敏度和测量范围成反比关系,它们的乘积等于光纤光栅透射谱的深度。

## 3 仿真分析

### 3.1 均匀/相移光栅

均匀光栅与相移光栅的结构不同,其透射谱斜

率也不相同,磁场测量的性能会有一定差别。图2仿真了不同长度均匀光栅的PDL谱及其峰值随磁场变化关系的线性拟合。具体光栅参数为:交流折

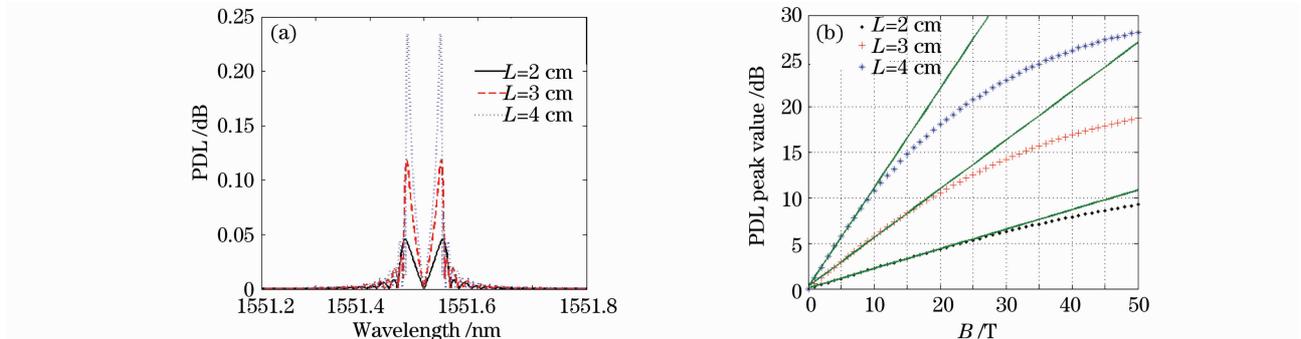


图2 不同长度均匀光栅的PDL谱(a)及其峰值随磁场变化(b)

Fig. 2 PDL (a) and peak values at different magnetic fields (b) of uniform fiber grating with different lengths

图3数值仿真了不同相移量时相移光栅的PDL谱及其峰值随磁场变化的线性拟合。(具体的光栅参数如下:光栅长度: $L=2$  cm,交流折射率调制: $A_c=1 \times 10^{-4}$ ,直流折射率调制: $D_c=0$ ,光栅周期: $\Lambda=535$  nm, $n_{\text{eff}}=1.45$ ,磁感应强度 $B=0.2$  T, $\theta$ 分别为 $\pi/2, \pi/4$ 和 $\pi/6$ )。由于相移量 $\theta$ 大小不同

射率调制: $A_c(z)=5 \times 10^{-5}$ ,直流折射率调制: $D_c(z)=0$ ,光栅周期: $\Lambda=535$  nm, $n_{\text{eff}}=1.45$ ,磁感应强度 $B=0.2$  T,光栅长度分别为2,3和4 cm。

时相移光栅透射窗口的位置会发生改变<sup>[11,12]</sup>,相应PDL谱不再保持对称。通过对均匀光栅和相移光栅磁场测量的仿真可以看出,磁场测量灵敏度提升后,测量的范围会变小,与2节理论分析的结果吻合。

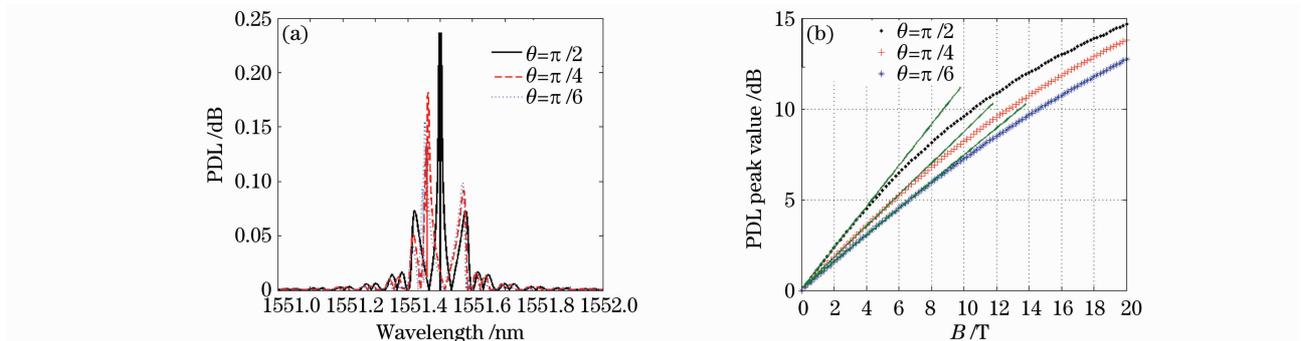


图3 不同相移大小相移光栅的PDL谱(a)及其峰值随磁场变化(b)

Fig. 3 PDL (a) and peak values at different magnetic fields (b) of phase-shifted grating with different phases

### 3.2 对数三角形光栅

在图2(a)和图3(a)中,均匀光栅和相移光栅的PDL峰值所对应的波长带宽很小,在利用波长扫描法检测峰值时,很容易因为波长步长过大或者波长抖动,产生测量误差,这说明其稳健性较差。另外,也无法满足利用单个波长进行测量的要求,难以提高磁场测量系统的实时性。而从图1中可知对数三角形光栅透射谱的斜率在一定范围内是恒定的,而且PDL谱所对应的两个峰值都有一定的带宽,通过在这个带宽内合理选择单个工作波长,实现利用单波长测量磁场,从而能够克服因波长扫描检测带来的误差,提高系统测量的实时性和稳健性。

这里设计中心波长为1550 nm,透射谱深度为20 dB,斜边倾斜角度相同,带宽为0.2 nm的对数三角形光纤光栅结构(透射谱深度和带宽可根据需要灵活设计),透射谱如图4(a)所示。图4(b)是按照分离剥层算法<sup>[13,14]</sup>的步骤,重构得到的交流折射率调制和附加相位随光栅位置的分布图,从中可以看出光栅的长度约为3.8 cm。利用重构参数进行仿真分析,图4(c),(d)分别为仿真所得透射谱及其斜率,图4(e)为重构仿真PDL,可以看出偏振相关损耗的峰值带宽有很大增加。图4(f)对仿真数据进行了拟合,磁场测量的范围和偏振相关损耗峰值带宽的增加是以降低灵敏度为代价的。

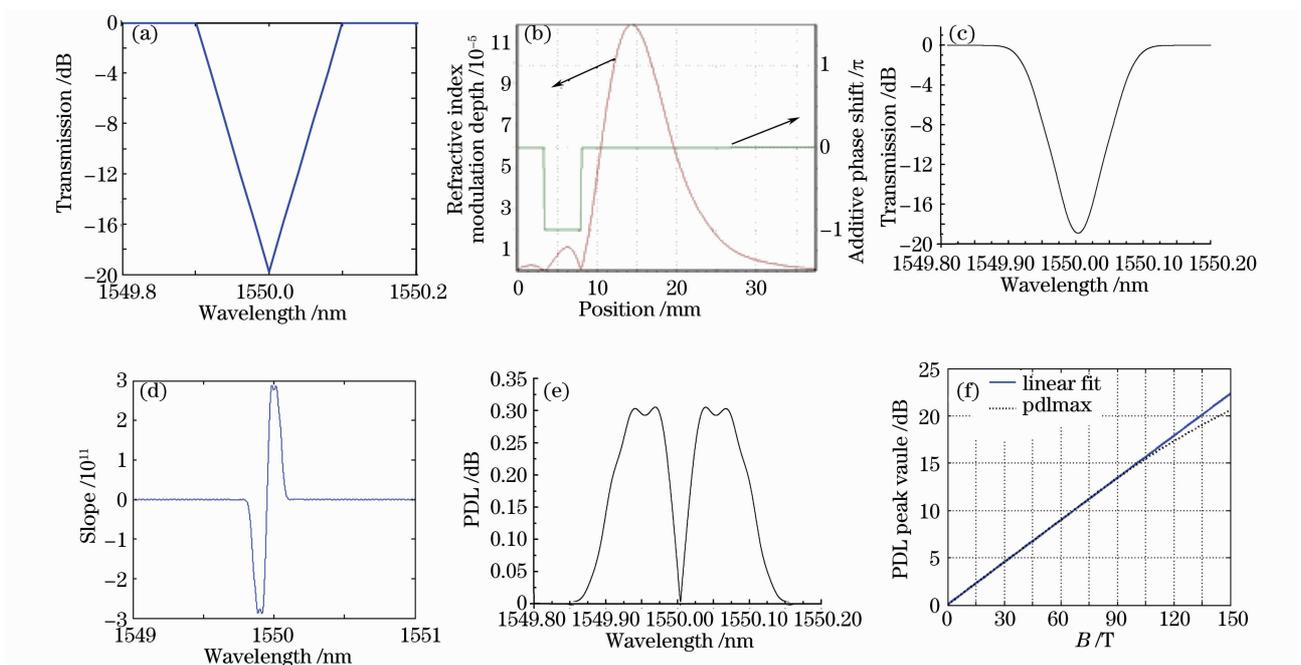


图 4 对数三角形光栅仿真分析。(a)目标透射谱,(b)重构参数,(c)仿真重构光栅透射谱,(d)透射谱斜率,(e)重构仿真 PDL,(f)峰值随磁场变化

Fig. 4 Simulation result of logarithm-triangle grating. (a) target transmission spectrum, (b) parameter reconstruct, (c) transmission spectrum, (d) slope of reconstruct fiber grating, (e) PDL, (f) peak values at different magnetic fields

### 4 实验分析

通过仿真分析均匀光栅、相移光栅和对数三角形光栅透射谱与磁场测量性能指标的关系,均匀光栅和相移光栅虽然测量时有较高的灵敏度,但系统的实时性和稳健性较差,对数三角形光栅可以弥补

这两项不足。为进一步验证理论与仿真分析的正确性,根据图 4 中重构出的光栅结构数据,利用相位掩模板结合重构等效啁啾技术制作了对数三角形光纤光栅<sup>[15]</sup>,利用光矢量分析仪进行磁场测量实验,图 5 为实测对数三角形光栅的透射谱和 PDL。

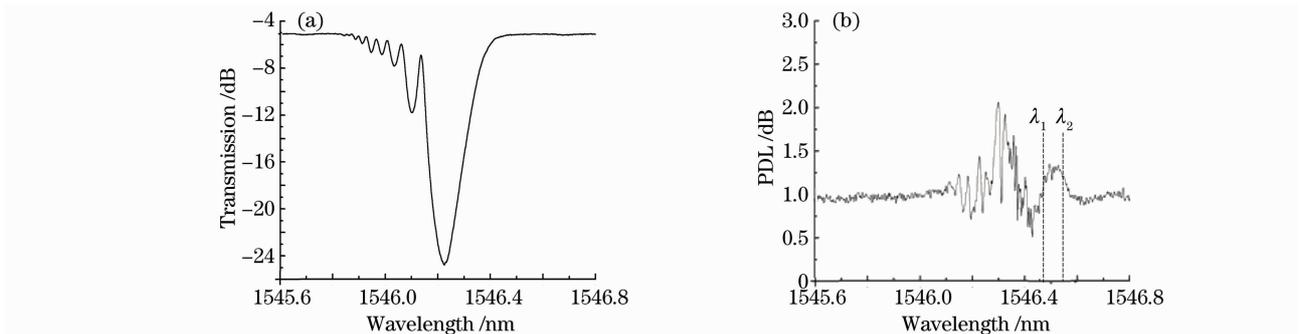


图 5 测量对数三角形光纤光栅透射谱(a)与 PDL 谱(b)

Fig. 5 Transmission spectra (a) and PDL (b) of logarithm-triangle grating without magnetic field

制作对数三角形光栅的布拉格波长并非为设计要求的 1550 nm,这是由于制作过程中,光纤在固定时受到轴向应力,制作完成后应力消失,布拉格波长发生变化。由于相位掩模板自身所带啁啾较大,光栅在短波长部分出现了明显的啁啾。图 5(b)是无磁场时由光纤光栅双折射产生的 PDL 谱,与光栅的结构有关<sup>[16]</sup>。可以看出对数三角形光纤光栅的

PDL 谱在波长  $\lambda_1, \lambda_2$  内较为平坦,基本符合设计要求,能够提高磁场检测的速度,并且克服因波长扫描产生的误差。

图 6 为在磁感应强度为 0.15 T 和 0.25 T 时利用实验平台测得 PDL 谱。由于对数三角形光纤光栅磁场测量的灵敏度很小,受实验室条件限制,产生的磁感应强度较低,PDL 峰值的变化很小,磁场测

量的灵敏度较低。因此,对数三角形光纤光栅适用于对实时性较高磁感应强度很大的脉冲强磁场的测量,但对于磁场较弱的情况具有一定的局限性。通

过设计对数三角形光纤光栅透射谱的斜率和深度可以提高磁场测量的性能。

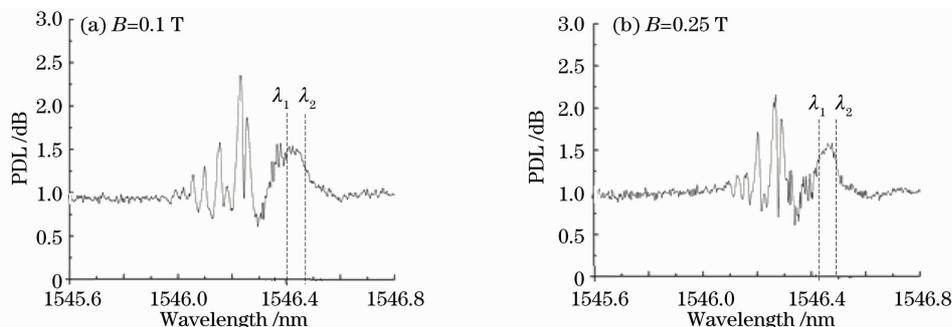


图 6 对数三角形光纤光栅磁场测量

Fig. 6 PDL value versus magnetic field with logarithm-triangle grating

## 5 结 论

分析了基于偏振效应的光栅磁场测量方法中的光栅透射谱与磁场测量性能之间的关系,光栅透射谱的深度和斜率决定了磁场测量的测量范围和灵敏度。数值仿真了不同结构光栅因透射谱的不同,对磁场测量性能指标的影响,从中发现对数三角形光纤光栅能够克服在波长扫描时产生误差,并提高磁场测量系统的实时性和稳健性。利用重构等效啁啾的方法设计制作对数三角形光纤光栅进行了磁场测量实验,实验结果与理论分析基本一致,对数三角形光纤光栅提高了磁场测量系统的实用性。

## 参 考 文 献

- 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
- Wu Fei, Li Lixin, Li Zhiquan. 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
- 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
- Jiang Zhipeng, Zhao Wei, Qu Kaifeng. Development and application of magnetic field measurement technology [J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2008, **45**(508): 1~5  
姜智鹏, 赵伟, 屈凯峰. 磁场测量技术的发展及其应用[J]. *电测与仪表*, 2008, **45**(508): 1~5
- Wang Feng, Mi Dong, Xu Zhangsui *et al.*. Measurement of high pulse magnetic field based on Faraday electro magnetic induction [J]. *High Voltage Engineering*, 2008, **34**(4): 674~677  
王峰, 米东, 徐章遂等. 基于法拉第电磁感应法的脉冲强磁场测量方法[J]. *高电压技术*, 2008, **34**(4): 674~677
- 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
- Peng Hui, Su Yang, Li Yuquan. Measurement for magnetic field with fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1717~1722  
彭晖, 苏洋, 李玉权. 基于光纤光栅的磁场测量新方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1717~1722
- Su Yang, Peng Hui, Feng Kui *et al.*. Magnetic field measurements using polarization properties of fiber grating with temperature and axial strain insensitive [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 219~222  
苏洋, 彭晖, 冯奎等. 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[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 219~222
- Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- A. D. Kersey, M. J. Marrone. Fiber Bragg grating high-magnetic-field probe [C]. *SPIC*, 1994, **2360**(9): 53~56
- Feng Kui, Zhu Yong, Su Yang *et al.*. Analysis of magnetic field sensor with phase-shifted grating Based on the polarization properties [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 763~768  
冯奎, 朱勇, 苏洋等. 基于偏振特性的相移光栅磁场传感方法分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 763~768
- 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, **1**(15): 16~20  
陈鹤鸣, 张敏峰, 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, **1**(15): 16~20
- Ricardo Feced, Michalis N. Zervas, Miguel A. Muriel. An efficient inverse scattering algorithm for the design of nonuniform fiber Bragg gratings [J]. *J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(8): 1105~1115
- Gao Zhipeng, Yu Zhenghong, Xing Libhua. 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
- Yitang Dai, Xiangfei Chen, Xia Li *et al.*. Sampled Bragg grating with desired response in one channel by use of a reconstruction algorithm and equivalent chirp [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(12): 1333~1335
- 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