

# 光纤布拉格光栅线双折射对磁场测量的影响

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** 由法拉第效应原理,通过测量磁场引起光纤布拉格光栅(FBG)的偏振相关损耗(PDL),可以测得磁感应强度大小。FBG 中线双折射的存在,同样改变了光的偏振特性,仿真并实验验证了 FBG 固有偏振相关损耗的特点。利用琼斯矩阵法理论推导了 FBG 在既有双折射又有磁场影响时,输入线偏振光偏振态的变化规律。通过对偏振相关损耗与线偏振光起偏角和双折射大小的仿真分析可知,不同起偏角的线偏光对线双折射的敏感度不同。在线双折射的影响下,偏振相关损耗峰值随起偏角大小呈周期性变化,对磁场测量的灵敏度产生影响,而与磁感应强度的线性关系并未发生变化。

**关键词** 光纤光学;磁场测量;光纤布拉格光栅;偏振相关损耗;线双折射;偏振态

**中图分类号** TP212

**OCIS** 060.3735 280.4788

**文献标识码** A

## Effect of Linear Birefringence on Magnetic Field Measure System with Fiber Bragg Grating

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

*<sup>1</sup>Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210007, China*  
*<sup>2</sup>96175 unit of PLA, Huangshan, Anhui 245600, China*

**Abstract** According to the principle of Faraday effect, the magnetic field can be measured with the polarization dependent loss (PDL) of the fiber Bragg gratings (FBG). The polarization of light is changed by the liner birefringence existing in FBG. The intrinsic PDL in the different structure gratings is simulated and measured, and the validity of the result is proved. The change of the state of polarization with the magnetic field and birefringence is theoretically analyzed and simulated by using the Jones matrix. The influences of liner birefringence and polarizing angle on the measurement system are compared. The peak of PDL and the cross sensitivity of the system vary with different polarizing angle. The linear relation between the magnetic field and the peak of PDL is not affected by these factors.

**Key words** fiber optics; magnetic field measurement; fiber Bragg grating; polarization dependent loss; linear birefringence; state of polarization

## 1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)凭借尺寸小、质量轻、抗干扰能力强等特点,广泛应用于对温度、应力、压力和电磁场等测量领域<sup>[1~6]</sup>。传统的 FBG 磁场测量方法主要是利用磁致伸缩材料,将磁场变化转换为应力变化来测量。磁场引起的法拉第效应可以改变光在光栅传播时的偏振特性,通过检测输出光的偏振相关损耗(PDL),可以达到磁场测量的目的<sup>[7,8]</sup>。

FBG 中固有的线双折射主要分为两部分<sup>[9]</sup>,一部分是在光纤拉制过程中引入的双折射,称为光纤本征双折射;另一部分是在光栅的写入过程中,由于光敏材料的偏振敏感特性,不同偏振态的光源写入获得的相

收稿日期: 2009-12-23; 收到修改稿日期: 2010-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(60871075)和博士后科学基金(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

对折射率是不同的,在利用相位掩模板单侧照射制作光栅时,光致折射率调制的横向分布也不均匀,也会引入双折射,称为光栅致双折射。通过分析光栅中双折射对磁场测量系统的影响,在仿真不同起偏角和线双折射关系的基础上,确定了适合磁场测量的线偏振光的偏振状态。

## 2 磁场测量原理

由法拉第效应可知,线偏振光在光纤光栅中传播时,由磁场引起的左旋和右旋圆偏振光折射率之差<sup>[10]</sup>

$$\Delta n = n_R - n_L = VB\lambda/\pi, \quad (1)$$

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,  $\lambda$  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<sup>[8]</sup>,产生圆偏振相关损耗

$$f_{\text{CPDL}} = \left| 10 \lg \left( \frac{T_L(\lambda)}{T_R(\lambda)} \right) \right|. \quad (2)$$

文献[7]中指出在一定范围内,圆偏振相关损耗随磁场变化呈线性关系,可通过检测圆偏振相关损耗峰值的变化实现对磁场的测量。图 1 给出了偏振相关损耗谱及其峰值随磁场变化的仿真曲线。由(2)式可以看出,不同的光栅结构受磁场影响结果不同,磁场测量系统的性能与 FBG 构有很大关系。

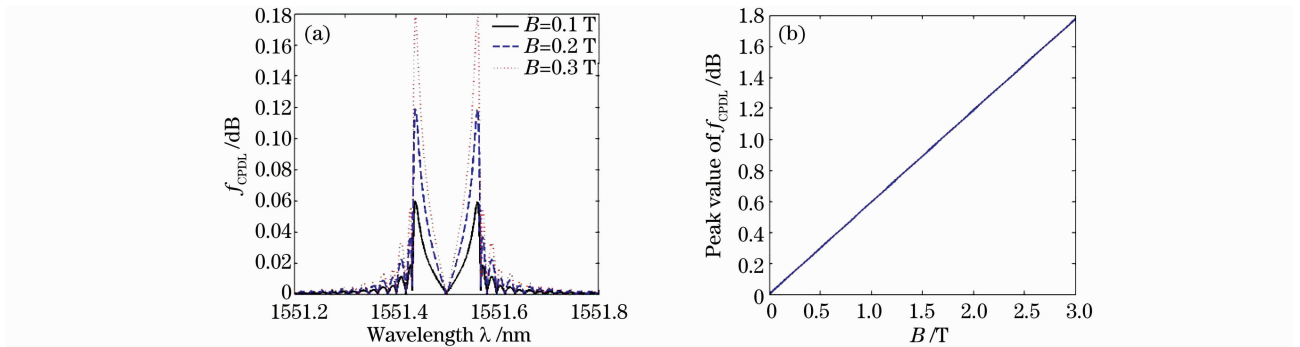


图 1 (a)  $f_{\text{CPDL}}$  随波长的变化; (b)  $f_{\text{CPDL}}$  的峰值随磁场的变化

Fig. 1 (a)  $f_{\text{CPDL}}$  versus wavelength; (b) peak values of  $f_{\text{CPDL}}$  versus magnetic field

## 3 FBG 偏振相关损耗

光纤本身的各项异性和光栅制作的非对称性,使得不同结构的 FBG 中都含有线双折射,受双折射影响,光栅的输出信号为经过双折射主轴的线偏振光的叠加,FBG 折射率分布可以表示为

$$\begin{bmatrix} n_x(z) \\ n_y(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{x0} \\ n_{y0} \end{bmatrix} + \left\{ \frac{1}{2} \begin{bmatrix} A_x(z) \\ A_y(z) \end{bmatrix} \exp \left[ j \frac{2\pi z}{\Lambda} + j\varphi(z) \right] + c.c. \right\}, \quad (3)$$

式中  $n_{x0}$  和  $n_{y0}$  为光纤主轴的折射率,  $A_x(z)$  和  $A_y(z)$  为光纤光栅光致折射率调制的幅度,  $\Lambda$  为光栅周期,相位因子  $\varphi(z)$  表示光栅存在的啁啾。则光栅输出信号为

$$E_T = (E_{ix}t_x)^2 + (E_{iy}t_y)^2, \quad (4)$$

式中  $E_{ix}$  和  $E_{iy}$  分别为输入信号在双折射主轴  $x, y$  方向上的分量,  $t_x$  和  $t_y$  为相应的光栅透射率。考虑输入线偏振光在参考系统中的偏振方向为  $\varphi$ , 光栅传输系数可以写为

$$T_\varphi = \frac{(E_{ix}t_x)^2 + (E_{iy}t_y)^2}{(E_{ix})^2 + (E_{iy})^2} = \cos^2(\varphi)T_x + \sin^2(\varphi)T_y. \quad (5)$$

当  $\varphi$  为 0 或  $\pi/2$  时,  $T_\varphi$  可以达到最大或最小值,即为  $T_x$  和  $T_y$ 。因此光栅双折射引起的光栅固有偏振相关损耗为

$$f_{\text{IPDL}} = \left| 10 \lg \left[ \frac{T_x(\lambda)}{T_y(\lambda)} \right] \right|. \quad (6)$$

光栅固有偏振相关损耗受双折射和光栅结构的影响。光纤的本征双折射值较小,而且沿光栅是随机分布的,光栅制作过程中产生的双折射大小随紫外光照射时间有所不同<sup>[11,12]</sup>。对 FBG 固有偏振相关损耗进

行仿真分析,具体的参数为:取本征双折射  $\Delta n_{\text{eff}}$  是从  $0 \sim 10^{-6}$  的随机值,光栅长度  $L=0.02$  m,直流折射率调制  $D_c=0$ ,  $\Lambda=535$  nm,  $n_{x0}=1.45$ ,  $n_{y0}=1.45 + \Delta n_{\text{eff}}$ ,  $A_x=1 \times 10^{-4}$ ,  $A_y=1.01 \times 10^{-4}$ ,仿真结果如图 2 所示。

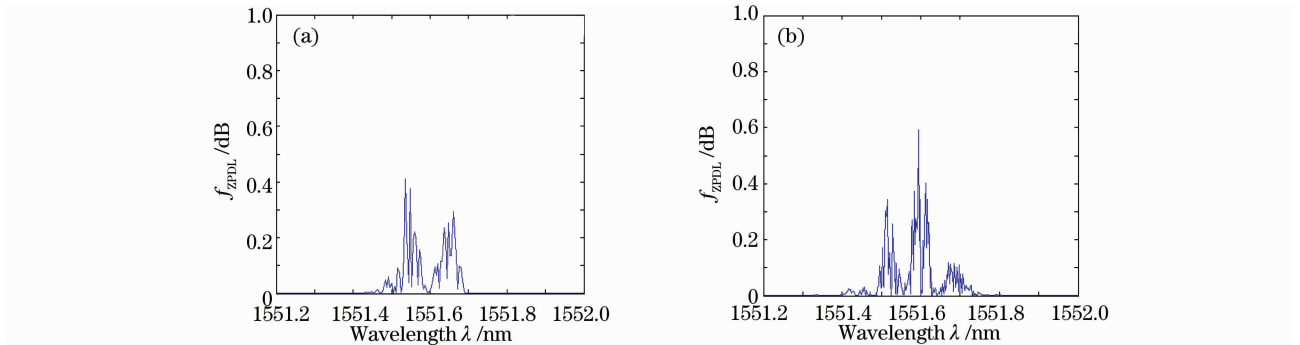


图 2 不同结构 FBG 的固有偏振相关损耗。(a) 均匀光栅;(b) 相移光栅

Fig. 2  $f_{\text{IPDL}}$  of different FBG. (a) uniform grating; (b) phaseshift grating

从图 2 可以看出,由于光栅结构的不同,光栅固有偏振相关损耗的谱形是不同的,相移光栅的峰值要稍大于均匀光栅。结合本实验室光栅制作条件,利用相位掩模板单边照射法分别制作了均匀光栅和相移光栅,并利用光矢量分析仪(OVA)实测均匀光栅和相移光栅固有的偏振相关损耗,如图 3 所示。

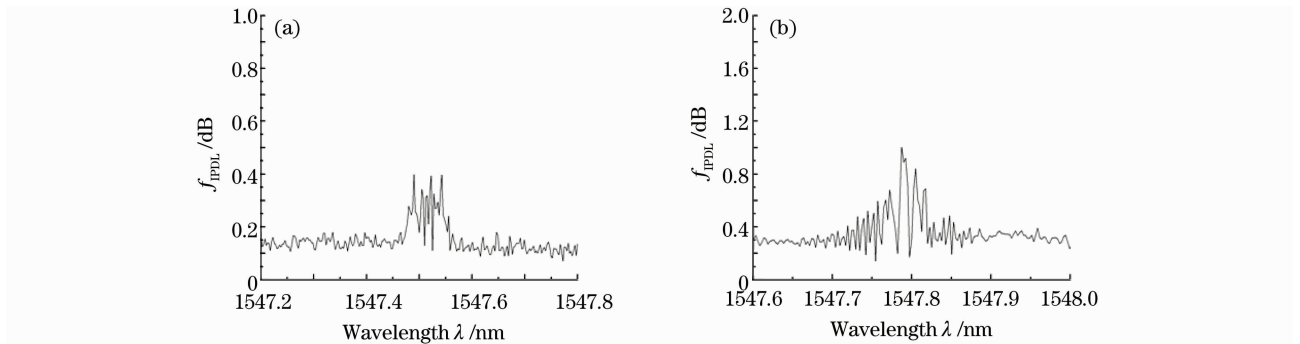


图 3 实测 FBG 固有偏振相关损耗。(a) 均匀光栅;(b) 相移光栅

Fig. 3 Measurement of  $f_{\text{IPDL}}$  of FBG. (a) uniform grating; (b) phaseshift grating

由于光栅制作中啁啾和切趾等相位误差的存在<sup>[13,14]</sup>,实际测量固有偏振相关损耗包含了测量链路中存在的损耗,因此与仿真结果有一定差别,但可以看出不同光栅结构之间的差别比较明显。光栅致双折射是无法根本消除的,目前主要是通过双边照射的光栅制作法和对光纤进行载氢处理,来降低光栅制作过程中引入双折射的大小。

#### 4 双折射对磁场测量的影响

在磁场测量系统中,当光栅中存在线双折射时,描述其性质的琼斯矩阵可以写为<sup>[15]</sup>

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $A = \cos(\Delta/2) + j \cos \phi \sin(\Delta/2)$ ,  $B = \sin \phi \sin(\Delta/2)$ ,  $(\Delta/2)^2 = (\delta/2)^2 + \theta^2$ ,  $\sin \phi = 2\theta/\Delta$ ,  $\cos \phi = \delta/\Delta$ ,  $\delta$  为线双折射在 2 个偏振本征模之间引入的相位延迟,  $\theta$  为法拉第旋转的角度。

定义入射光的偏振方向与光纤主轴( $x$  轴)的夹角为起偏角,起偏角为  $\varphi$  时,入射光的琼斯矢量为

$$\mathbf{J}_i = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix}. \quad (8)$$

受法拉第效应和线性双折射影响后,线偏振光的琼斯矢量变为

$$\mathbf{J}_o = \mathbf{J} \cdot \mathbf{J}_i = \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta/2) \cos \varphi - \sin \phi \sin(\Delta/2) \sin \varphi + j \cos \phi \sin(\Delta/2) \cos \varphi \\ \cos(\Delta/2) \sin \varphi + \sin \phi \sin(\Delta/2) \cos \phi - j \cos \phi \sin(\Delta/2) \sin \varphi \end{bmatrix}. \quad (9)$$

输出光琼斯矢量与起偏角  $\varphi$  的关系如图 4 所示,起偏角  $\varphi$  为  $45^\circ$  和  $135^\circ$  时,线偏振光在  $x, y$  轴上的分量相同。由此可知,受线双折射影响后,随起偏角不同输出光的偏振态变化为椭圆偏振光,而且随输入线偏振光偏振角度和双折射大小的不同,椭圆偏振光的椭圆率发生变化,因此磁场产生的偏振相关损耗也不相同。

将入射光按照双折射轴分解为左旋和右旋圆偏振光

$$\mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix} = \cos \varphi \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + j \sin \varphi \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} = \frac{\cos \varphi}{2} \left( \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} \right) + \frac{j \sin \varphi}{2} \left( \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} \right), \quad (2)$$

式中令  $\mathbf{E}_{XL} = \frac{\cos \varphi}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{E}_{XR} = \frac{\cos \varphi}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{E}_{YL} = \frac{j \sin \varphi}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{E}_{YR} = \frac{-j \sin \varphi}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$ , 这 4 个电场分量对应的折射率

分别为  $n_{XL} = n_x - \frac{\Delta n}{2}$ ,  $n_{XR} = n_x + \frac{\Delta n}{2}$ ,  $n_{YL} = n_y - \frac{\Delta n}{2}$ ,  $n_{YR} = n_y + \frac{\Delta n}{2}$ , 其中  $n_x$  和  $n_y$  定义与(3)式相同,相应的光栅透射率分别为  $t_{XL}, t_{XR}, t_{YL}, t_{YR}$ 。各电场分量的输出结果可写为

$$\mathbf{E}_{XL,o} = t_{XL} \mathbf{J} \mathbf{E}_{XL}, \mathbf{E}_{XR,o} = t_{XR} \mathbf{J} \mathbf{E}_{XR}, \mathbf{E}_{YL,o} = t_{YL} \mathbf{J} \mathbf{E}_{YL}, \mathbf{E}_{YR,o} = t_{YR} \mathbf{J} \mathbf{E}_{YR}. \quad (11)$$

因此,受双折射的影响后,FBG 测量系统输出的偏振相关损耗为

$$f_{PDL} = \left| 10 \lg \frac{\mathbf{E}_{XL,o}^2 + \mathbf{E}_{YL,o}^2}{\mathbf{E}_{XR,o}^2 + \mathbf{E}_{YR,o}^2} \right|. \quad (12)$$

对上述理论分析进行仿真,选择光栅长度  $L=0.02$  m, 直流折射率调制  $D_c=0$ , 光栅周期  $\Lambda=535$  nm, 交流折射率调制  $A_{x,y}=1 \times 10^{-4}$  的均匀光栅。

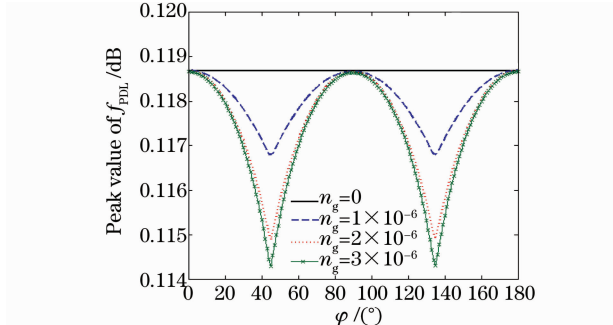


图 5 不同双折射时  $f_{PDL}$  峰值与起偏角的关系

Fig. 5 Peak value of  $f_{PDL}$  versus initial polarizing angles at different linear birefringence

固定磁场大小为 0.2 T, 在光栅固有双折射  $n_g$  大小为  $(0 \sim 3) \times 10^{-6}$  时, 仿真起偏角  $\varphi$  为  $0 \sim \pi$  时  $f_{PDL}$  峰值的变化曲线如图 5 所示。可以看出, 光栅固有双折射为 0 时, 系统输出的偏振相关损耗的峰值随起偏角大小没有发生变化, 而双折射不为 0 时,  $f_{PDL}$  峰值随起偏角做周期性的变化。当  $\varphi$  为  $45^\circ$  和  $135^\circ$  时受双折射的影响为  $10^{-3}$  量级, 在可以忽略的范围之内。因此, 在弱双折射光栅中, 起偏角的影响可以忽略。但在光栅制作过程中, 光栅致双折射会随激光器照射时间的增加而变大, 这时需要确定最佳的偏振方向克服双折射的影响。当起偏角  $\varphi$  为  $0^\circ, 90^\circ$  和  $180^\circ$  时系统受双折射影响较小。图 6 仿真了在  $\varphi=90^\circ$  时不同线

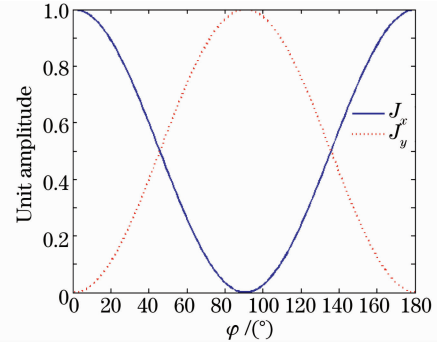


图 4 不同起偏角时输出光的琼斯矢量

Fig. 4 Jones vector for different initial polarizing angles

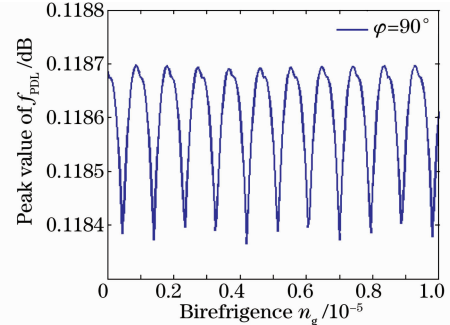


图 6 固定起偏角时  $f_{PDL}$  峰值与双折射的关系

Fig. 6 Peak value of  $f_{PDL}$  versus linear birefringence at fixed initial polarizing angle

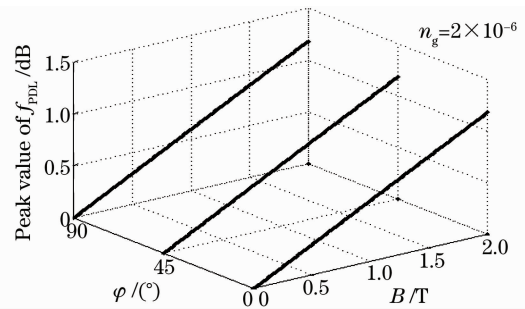


图 7 固定线双折射时  $f_{PDL}$  峰值与磁场的关系

Fig. 7 Peak value of  $f_{PDL}$  versus magnetic field at fixed linear birefringence

双折射下  $f_{\text{PDL}}$  峰值的变化,  $f_{\text{PDL}}$  峰值随着双折射的增加发生变化, 在  $\varphi=90^\circ$  时, 变化量在  $10^{-4}$  量级左右, 这种微弱变化通常可以忽略, 因此选择入射光为双折射轴方向的线偏振光, 以减少双折射的影响。

在线双折射固定条件下, 对起偏角  $\varphi$  为  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  和  $90^\circ$  时  $f_{\text{PDL}}$  峰值随磁场变化进行仿真, 结果如图 7 所示。可以看出, 当双折射和起偏角固定时,  $f_{\text{PDL}}$  峰值与磁场之间的线性关系并未改变。结合图 6 可知, 在不同的线双折射条件下,  $f_{\text{PDL}}$  峰值与磁场的线性关系仍然不变, 改变的只是幅值的轨迹。

## 5 结 论

从 FBG 磁场测量原理出发, 对 FBG 中线双折射引起的固有偏振相关损耗进行了仿真分析, 制作均匀光栅和相移光栅, 实测结果与仿真结果基本吻合。FBG 中固有双折射大小和线偏振光的起偏角对磁场测量性能产生一定影响。通过理论分析与仿真验证, 选择水平或者垂直方向等对双折射不敏感的偏振光作为系统输入光源, 可以在很大程度上减小双折射的影响, 提高磁场测量的精确度和灵敏度。

## 参 考 文 献

- 1 Qiao Xueguang, Jia Zhenan, Fu Haiwei *et al.*. 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, 傅海威等. 光纤光栅温度传感理论与实验[J]. *物理学报*, 2004, **53**(2): 494~497
- 2 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
- 3 C. Caucheteur, S. Bette, R. Garcia-Olcina *et al.*. Transverse force sensor exploiting the birefringence effect in uniform fiber Bragg gratings[C]. *SPIE*, 2007, **6585**: 65850C
- 4 A. D. Kersey, M. J. Marrone. Fiber Bragg grating high-magnetic-field probe[C]. *SPIE*, 1994, **2360**(9): 53~56
- 5 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
- 6 Zhang Hucheng, Li Yuquan. Magnetic field sensor based on fiber Bragg grating[J]. *Journal of 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
- 7 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
- 8 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**(s2): 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**(s2): 219~222
- 9 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
- 10 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 11 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
- 12 P. Lu, D. Grobncic, S. J. Mihailov. Characterization of the birefringence in giber Bragg gratings fabricated with an ultrafast-infrared laser[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(3): 779~786
- 13 Feng Kui, Zhu Yong, Su Yang *et al.*. The influence of phase error to the measurement performance for electromagnetic sensor[J]. *Optical Communication Technology*, 2009, **33**(9): 50~52  
冯 奎, 朱 勇, 苏 洋等. 相位误差对光栅磁场传感器性能影响分析[J]. *光通信技术*, 2009, **33**(9): 50~52
- 14 Chen Peng, Wang Rong, Pu Tao *et al.*. Fabrication of super-narrow bandwidth grating filter based on phase error correction[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2076~2082  
陈 鹏, 王 荣, 蒲 涛等. 基于相位误差补偿技术的超窄带光栅滤波器的制作[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2076~2082
- 15 W. J. Tabor, F. S. Chen. Electromagnetic propagating through materials possessing both Faraday rotation and birefringence; experiments with ytterbium orthofemte[J]. *J. Appl. Phys.*, 1969, **40**(7): 2760~2764