

文章编号: 0253-2239(2010)05-1223-06

基于差分群时延的磁场传感中光纤布拉格光栅结构影响的性能分析

苏 洋 彭 晖 冯 奎 徐俊华 李玉权

(¹ 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)

摘要 对基于差分群时延的磁场测量方法中光纤布拉格光栅(FBG)结构的影响进行了分析。利用耦合模理论和传输矩阵法仿真,分析了均匀 FBG 的长度和折射率调制系数对传感系统测量范围和灵敏度的影响。同时改变 FBG 制作结构,研究了啁啾光栅、相移光栅和切趾光栅的差分群时延性能。并对各种光栅结构的差分群时延峰值大小进行了理论和实验比较。对均匀光栅和相移光栅的实验比较测量表明,采用相移光栅结构可以明显提高传感测量系统的灵敏度,实验数据和理论吻合较好。

关键词 传感器; 光纤布拉格光栅; 差分群时延; 灵敏度; 相移光栅

中图分类号 TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1223

Effect of Grating Structure on Magnetic Field Sensor Exploiting Differential Group Delay in Fiber Bragg Gratings

Su Yang Peng Hui Feng Kui Xu Junhua Li Yuquan

(¹ *Laboratory of Optical Fiber Communication, Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China*)

Abstract The characteristics of grating structure in magnetic field measurements based on differential group delay of fiber Bragg gratings (FBG) are analyzed. Theoretical simulations are realized using the coupled-mode theory and transfer matrix method. The effects of grating parameters (physical length, index modulation) of uniform FBG on measurement range and sensitivity are analyzed. The impacts of chirped, phase-shifted and apodized gratings on the wavelength dependency of differential group delay are also monitored. The experimental measurements are conducted on FBG inscribed by means of the phase mask technique. The experiments demonstrate that the phase-shifted gratings can obviously improve the sensitivity of sensor system which match well with the simulations.

Key words sensors; fiber Bragg gratings; differential group delay (DGD); sensitivity; phase-shifted grating

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)作为一种成熟的全光纤器件,由于其本身具有的体积小,插入损耗低,易于与其他光纤器件集成等特点,在光纤通信和光纤传感领域中有着非常重要的应用,目前主要利用波长偏移量进行温度传感和应力传感^[1~3]。而近来的研究表明,光参数中的偏振特性也会对外界变量敏感,Caucheteur^[4~6]利用光栅中的双折射效应引起的偏振特性的改变进行了横向力的测量。Peng 等^[7]提

出了利用光纤光栅的偏振相关损耗(PDL)测量磁场的方法,受磁场作用,左右旋圆偏振光经过光栅后透射谱发生变化,从而引起偏振特性的改变,由此可以测量磁场大小。在这种测量方案中,灵敏度是系统实现的关键。

本文利用了 FBG 的透射差分群时延(DGD)进行磁场传感研究,利用传输矩阵方法理论分析了磁场与 DGD 值之间的单调递增关系,研究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

收稿日期: 2009-08-12; 收到修改稿日期: 2009-10-21

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,博士,讲师,主要从事光传感技术方面的研究。E-mail: qieziyangyang@163.com

响。并比较了啁啾光栅、相移光栅和切趾光栅的差分群时延谱性能。

2 理论分析

对于均匀 FBG, 其群时延定义为^[8]

$$\tau = \frac{n_{\text{eff}} \kappa^2 \sinh(aL) \cosh(aL) - \alpha \sigma^2 L}{c \frac{\alpha \kappa^2 \cosh^2(aL) - \alpha \sigma^2}{\kappa^2 \sinh^2(aL) - \alpha \sigma^2}}$$

其中 $\alpha = \sqrt{\kappa^2 - \sigma^2}$, $\kappa = \pi \delta_n / \lambda$, $\sigma = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) +$

$\frac{2\pi \delta_n}{\lambda}$, n_{eff} 为光栅的有效折射率, $\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda$ 为光栅的布

拉格中心波长, Λ 为光栅周期, δ_n 为折射率调制系数, ν

为条纹可见度。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, 称之为磁致圆双折射 $\Delta n^{[8]}$ 。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 $n_{\text{eff},r} = n_{\text{eff}} - \Delta n/2$ 。而加在光纤上的磁场引起的折射率变化为 $(n_{\text{eff},l} - n_{\text{eff},r}) = VB\lambda / \pi^{[9]}$ 。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 $8 \times 10^{-5} \text{ rad}/(\text{G} \cdot \text{m})$, 这个效应是比较微弱的。此时, 上式给出的群时延就变成了 τ_l 和 τ_r 。差分群时延是左旋和右旋圆偏振光之间的群时延差, 即 $\Delta\tau = |\tau_l - \tau_r|$ 。

图 1 为当磁场改变时的 DGD 随波长的变化谱, 参数设置 $L=20 \text{ mm}$, $\delta_n = 5 \times 10^{-5}$, 可以看到, 均匀光栅 DGD 谱具有两个对称的峰值, 仿真条件下当磁场值小于 90 T 左右时, DGD 峰值幅度随磁场单调增加, 而当 B 超过 90 T 时, 幅度趋向饱和。

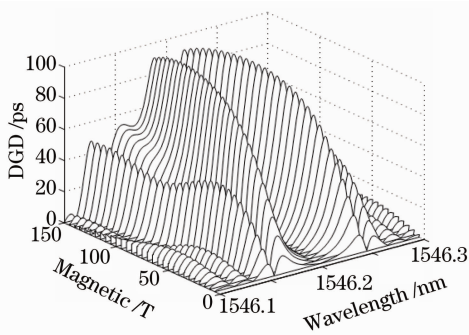


图 1 透射 DGD 谱与磁场的关系

Fig. 1 DGD spectrum in transmission versus magnetic field

3 均匀 FBG 物理参数对 DGD 谱的影响

DGD 峰值的演变会受到光栅物理参数, 例如长度和折射率调制系数的影响。图 2 为在不同的光栅长度下 DGD 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 mm , 磁场变化范围为 $0 \sim$

500 T 。从图 2 中可以看出, 对于所有的曲线, 在磁场相对较小, 的时候, DGD 峰值随磁场大小单调递增, 在达到某个值后都有一个单调递减部份, 最后趋向某个平稳的饱和值。光栅长度对 DGD 峰值具有较大影响, 光栅长度越长, DGD 峰值越大, 也就是系统灵敏度越高; 而单调递增范围略有降低, 在仿真条件下, 对于 10 mm 长的 FBG, DGD 峰值线性范围约为 150 T , 而对 25 mm 长的 FBG 线性范围约为 80 T 。

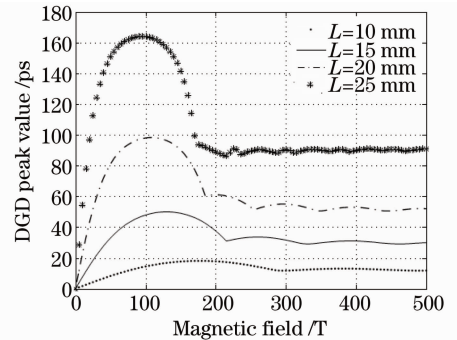


图 2 不同光栅长度下 DGD 峰值与磁场的关系

Fig. 2 DGD spectrum in transmission versus magnetic field

仿真计算得到, 对于 10 mm 长的光栅, DGD 峰值对磁场的灵敏度约为 $0.00017 \text{ ps}/\text{mT}$ 的量级; 对于 25 mm 长的光栅, 灵敏度约为 $0.00576 \text{ ps}/\text{mT}$ 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 33 倍左右, 这证明长度对灵敏度的影响比较明显。

图 3 为光栅长度恒定为 10 mm , 折射率调制深度以步长 5×10^{-5} 从 5×10^{-5} 变化到 2×10^{-4} 时, DGD 峰值与磁场的关系。同样 DGD 峰值在一定范围内呈单调递增关系, 超过范围后趋向某饱和值。调制深度越大, 灵敏度越高。经计算比较, 对于一段 10 mm 的 FBG, 当调制深度从 5×10^{-5} 增加到 2×10^{-4} 时 DGD 峰值的灵敏度每特斯拉增长约 17 倍。而对于 20 mm

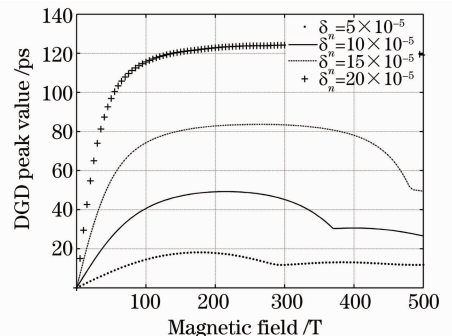


图 3 不同折射率调制系数下 DGD 峰值与磁场的关系

Fig. 3 Evolution of DGD peak values as function of magnetic field for different refractive index modulations

长的 FBG, 则灵敏度每特斯拉增长约 44 倍。可见, 调制深度和长度的增加可以明显改变光栅的灵敏度, 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 非均匀光栅的 DGD 谱

对于磁场传感系统来说, 如何改善系统的灵敏度是一个值得深入的问题。对于均匀 FBG, 可以通过增加光栅长度和折射率调制系数来增加灵敏度。而改变光栅折射率变化分布也会对灵敏度产生重要影响。非均匀光栅主要有啁啾光栅、切趾光栅和相移光栅等。将采用传输矩阵法分析各种非均匀光栅的 DGD 谱以及对磁场测量系统灵敏度的影响。光栅长度设置为 10 mm, 折射率调制系数为 10^{-4} , 磁场强度为 3 T。

图 4 和图 5 分别为均匀光栅和啁啾光栅透射谱和 DGD 谱, 啁啾系数为 10^{-8} ; 图 6 为高斯型切趾光栅透射谱和 DGD 谱, 光栅分布的半峰全宽为 $2L/3$; 图 7 为升余弦切趾光栅透射谱和 DGD 谱; 图 8 为相移光栅的透射谱和 DGD 谱, 相移量为 π , 相移位置为 $L/2$ 。

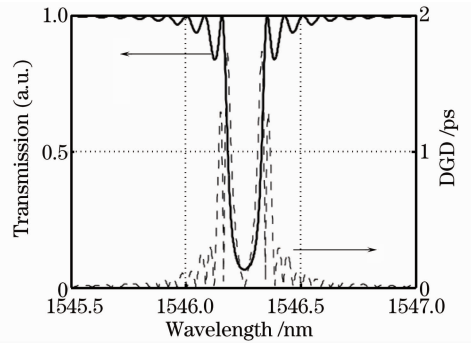


图 4 均匀光栅的透射谱和 DGD 谱

Fig. 4 Transmission and DGD spectrum of uniform grating

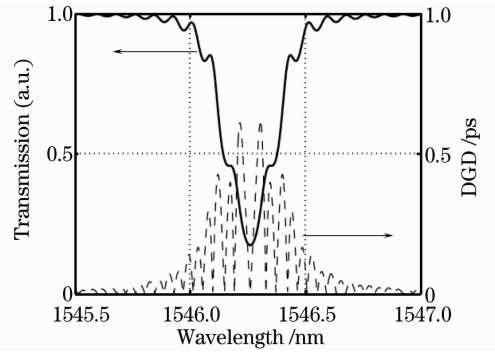


图 5 啁啾光栅的透射谱和 DGD 谱

Fig. 5 Transmission and DGD spectrum of chirped grating

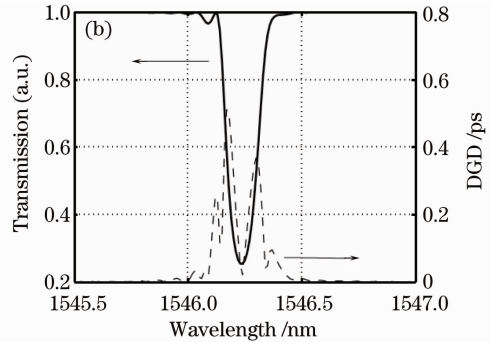
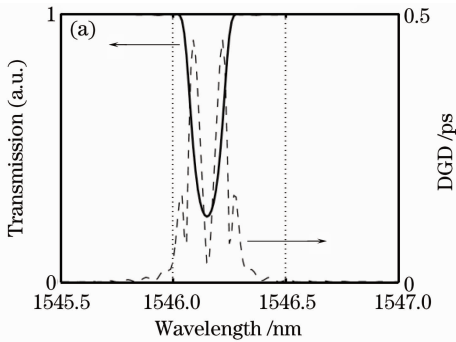


图 6 高斯切趾光栅的透射谱和 DGD 谱。(a)交流切趾;(b)交流与直流切趾

Fig. 6 Transmission and DGD spectrum of Gaussian-apodized gratings. (a)ac apodized; (b)ac and dc apodized

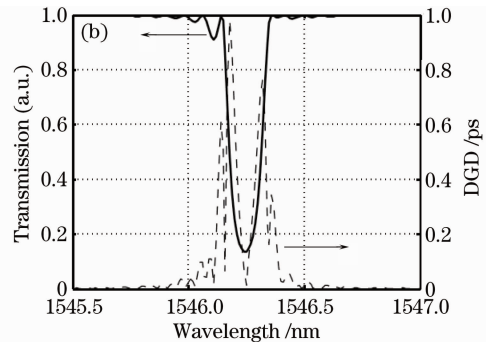
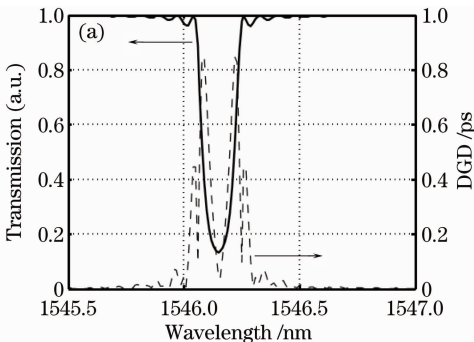


图 7 升余弦切趾光栅的透射谱和 DGD 谱。(a)交流切趾;(b)交流与直流切趾

Fig. 7 Transmission and DGD spectrum of Raised-cosine-apodized gratings. (a)ac apodized; (b)ac and dc apodized

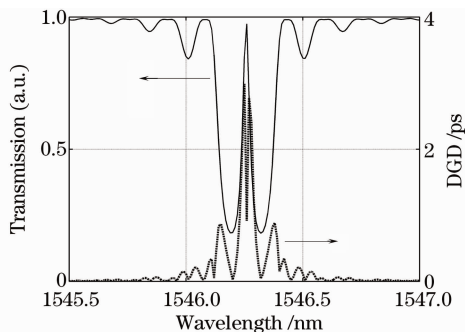


图 8 相移光栅的透射谱和 DGD 谱

Fig. 8 Transmission and DGD spectrum of phase-shifted grating

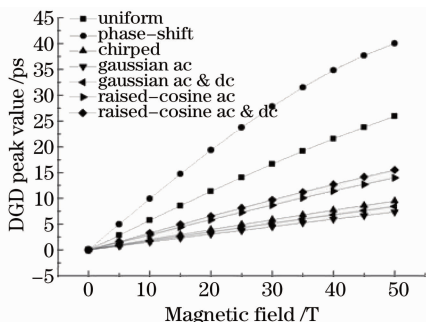


图 9 各种光栅结构下磁场与 DGD 峰值的关系

Fig. 9 DGD peak values versus magnetic field of different grating structures

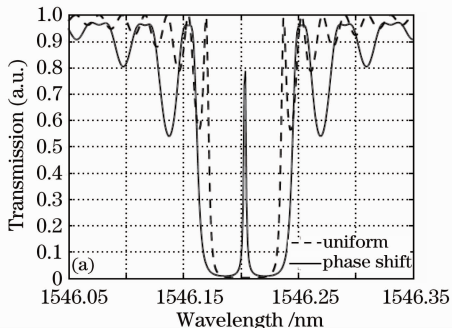
从上述仿真可以看出,与均匀光栅相比,啁啾光栅 DGD 谱型比较宽,如果进一步增加啁啾系数, DGD 谱将更为杂乱,而峰值低于均匀光栅。切趾光栅中,交流切趾透射谱平坦,边带抑制好,而交流直流同时切趾时,短波长方向产生谐振,长波长方向

表 1 几种光栅 DGD 峰值的比较

Table 1 Comparison of different fiber grating

	Uniform	Chirped	Gaussian-apodized	Raised-cosineapodized	Phase-shifted
Simulation /ps	0.11585	0.040782	0.035092	0.06638	0.21162
Experiment /ps	10.4848	11.9858	9.4720	11.4223	17.4759

重点取相移光栅与均匀光栅进行比较。相移光栅长度为 40 mm,折射率调制系数为 5×10^{-5} 。



边带抑制好,对应的 DGD 谱也为不对称分布;对于 DGD 峰值,交直流同时切趾要优于单独交流切趾。相移光栅的 DGD 峰值最高。

图 9 比较了不同结构光栅的 DGD 峰值和磁场之间关系。仿真显示灵敏度性能最优的是相移光栅,均匀光栅次之,后面依次为升余弦同时切趾、升余弦交流切趾、啁啾光栅、高斯同时切趾和高斯交流切趾。可见,利用相移光栅可以大幅度提高传感灵敏度。如果进一步增加长度和折射率调制系数,相移光栅的灵敏度优越性可以更为凸显。

5 实验研究

利用相位掩模方法在载氢单模光纤中写入 FBG 光栅进行实验比较。实验利用磁光调制实验仪产生稳定磁场,光纤夹具固定光纤光栅使之与磁场方向平行,通过改变励磁强度来改变磁场强度的大小。利用光矢量分析仪(OVA)测量 FBG 的透射谱以及对应的 DGD 谱。

表 1 为几种光纤光栅的 DGD 峰值的理论值和实验值的比较,设计参数:磁场 200 mT,光栅长度为 10 mm,折射率调制系数为 10^{-4} 。理论值比较而言,相移光栅的 DGD 峰值最高,其次是均匀光栅。而在实验值中,均匀光栅的峰值不如啁啾光栅和升余弦切趾光栅,主要原因是所刻多种光栅的本征双折射和光致双折射各不相同。因此单纯从实验数据上横向看各光栅的 DGD 峰值并不能比较灵敏度的大小,要对其在不同磁场下的性能进行分析。

图 10(a)和(b)分别是是均匀光栅与相移光栅的在 200 mT 下的透射谱和 DGD 谱的仿真图。可见此

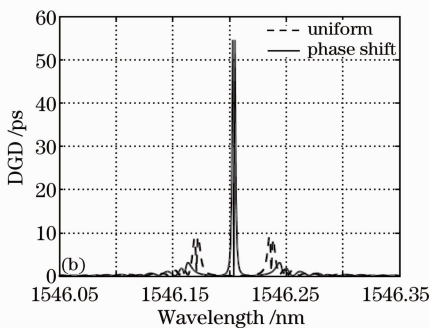


图 10 相移光栅和均匀光栅的透射谱和 DGD 谱的仿真图。(a)透射谱和(b)DGD

Fig. 10 Simulated (a) transmitted and (b) DGD spectrum of phase shifted grating and uniform grating

条件下均匀光栅的 DGD 峰值为约为 9 ps, 而相移光栅的 DGD 峰值有约 55 ps。

图 11(a) 和 (b) 分别为实验所得的均匀光栅和相移光栅的透射谱以及相对应的 DGD 谱。在

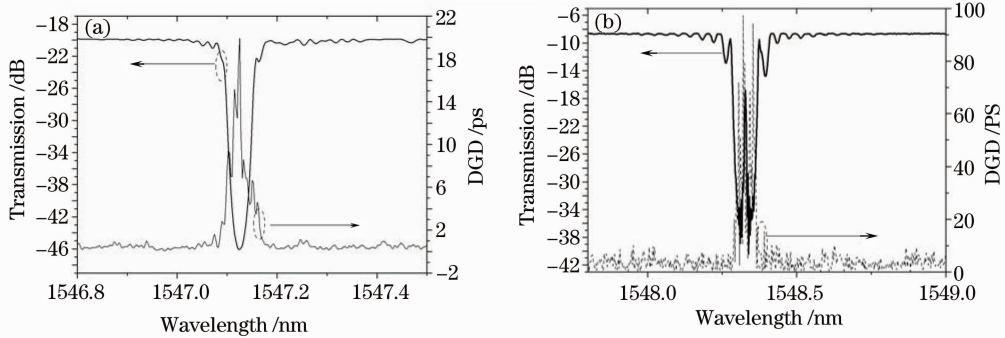


图 11 实验所得透射谱和相应的 DGD 谱。(a)均匀光栅;(b)相移光栅

Fig. 11 Transmitted spectrum and corresponding DGD spectrum in experiment. (a)uniform gratings; (b)phase shifted grating

图 12 给出了均匀光栅和相移光栅的 DGD 峰值随磁场变化的仿真值和实验测量值。可以看出在 0~300 mT 的范围内, DGD 峰值幅度单调递增, 变化趋势与理论仿真值一致。对测量值进行了线性拟合, 可见实验所得 DGD 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, 两组数据之间存在的间距分别约为 14 ps 和 40 ps。计算表明, 实验条件下的均匀光栅和相移光栅的灵敏度分别为 0.0496 ps/mT 和 0.3066 ps/mT, 可见相移光栅能够显著提高磁场传感系统的精度和灵敏度。

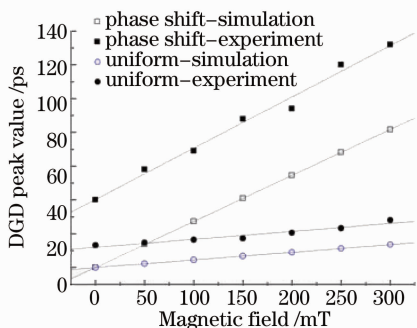


图 12 相移光栅和均匀光栅的 DGD 峰值与磁场的关系

Fig. 12 DGD spectrum versus magnetic field of phase shifted grating and uniform grating

6 结 论

分析了基于差分群时延的磁场测量方法中 FBG 结构的影响, 利用耦合模理论进行仿真, 验证了在一定的测量范围内 FBG 的 DGD 峰值随外加磁

200 mT 时, 均匀光栅和相移光栅的 DGD 峰值分别为 20 ns 和 95 ns 左右。实验数值高于理论仿真, 这是因为光栅存在着本征双折射和光致双折射^[10]。

场呈单调递增的关系。仿真分析了均匀 FBG 长度和折射率调制系数对磁场传感器系统测量范围和灵敏度的影响。长度越长, 折射率调制系数越大, 系统灵敏度越高。同时研究了啁啾光栅、相移光栅和切趾光栅的差分群时延性能, 其中相移光栅显示出了较好的性能。利用相位掩模方法制作了均匀光栅和相移光栅进行实验测量, 实验数据验证了采用相移光栅结构, 可以显著提高传感测量系统的灵敏度。

参 考 文 献

- Zhang Weigang, Tu Qinchant, Sun Lei *et al.*. Recent progress in theory, design and applications of fiber grating sensors[J]. *Prog. Phys.*, 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
- S. Bette, C. Caucheteur, M. Wuyilpart *et al.*. Spectral characterization of differential group delay in uniform fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(25): 9954~9960
- 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**: 65850C1~12
- C. Caucheteur, S. Bette, R. Garcia-Olcina. Transverse strain measurements using the birefringence effect in fiber bragg grating [J]. *IEEE Photon Technol. Let.*, 2007, **13**(19): 966~968
- 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 A. D. Kersey, M. J. Marrone. Fiber bragg grating high-magnetic-field probe[C]. *SPIE*, 1994, **2360**(9): 53~56
- 9 Liu Gongqiang, Yue zhiqiang, Shen defang. Magneto-optics[M]. Shanghai: 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
- 10 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