

基于偏振效应的传感测量中光栅透射谱性能影响分析

苏 洋 冯云海 冯 奎

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 从原理上分析了光栅透射谱对偏振相关损耗测量的灵敏度、测量范围和检测难易度等多个性能指标的影响机理, 并利用传输矩阵法对各种光栅结构的传感性能进行了比较分析。为了降低检测误差, 利用分立层剥重构算法分析了透射功率谱为级联三角形的光栅结构。为基于光栅偏振特性的传感测量中光栅结构的选择提供了参考。

关键词 光栅; 光栅传感; 透射谱; 偏振相关特性; 分立层剥算法

中图分类号 TP212.14

OCIS 280.4788 060.3735 260.1440 050.2770

文献标识码 A

Effect of Transmission Spectrum of Grating in Sensors Based on Polarization Properties of Fiber Gratings

Su Yang Feng Yunhai Feng Kui

(School of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract The influence of transmission spectrum on the sensor characteristics including sensitivity, dynamic range and detecting is discussed, and the comparisons of sensor characteristics are realized using the transfer matrix method. In order to decrease the detecting error, the fiber grating with cascaded triangular transmission spectrum is designed by using discrete layer peeling (DLP) algorithm. Some design principles of grating structures in sensors based on the polarization dependent properties of the fiber grating are provided.

Key words gratings; grating sensors; transmission spectrum; polarization dependent properties; discrete layer peeling algorithm

1 引 言

光纤光栅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轴向应力传感^[1~3]。而当光纤布拉格光栅(FBG)受到横向均匀分布的压力时, 由于光纤的变形导致折射率发生变化, 并产生线双折射, 即横截面内两个不同方向上的折射率变化会因为光弹系数的不同而有所差异^[4]。2007年 Caucheteur 等^[5,6]提出了利用均匀光栅的偏振相关特性进行横向应力的测量。在这些基于光栅中传输光的偏振特性传感方法中, 光栅作为关键器件, 其结构对测量性能具有重要影响。本文从原理上分析了各种光栅结构在灵敏度等性能指标上优劣的原理, 对各种光栅结构的传感性能进行了比较分析, 为基于光栅偏振特性的传感测量中光栅结构的选择提供了参考。

2 理论基础

当光在光纤光栅中传输时, 如果是理想的光栅, 那么不同偏振态的入射光将有着一样的透射谱。当光栅中存在双折射时, 两个本征模折射率之间存在 Δn 的差值, 即 x, y 方向的有效折射率分别为 $n_{\text{eff},x} = n_{\text{eff}} + \Delta n/2$ 和 $n_{\text{eff},y} = n_{\text{eff}} - \Delta n/2$ 。那么从光栅的布拉格波长 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ 可以看出, 不同的折射率将会有不同的传输特性, 对应

收稿日期: 2010-04-16; **收到修改稿日期:** 2010-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(60871075), 中国博士后科学基金(20090451500)和解放军理工大学通信工程学院学员创新基金资助课题。

作者简介: 苏 洋(1980—), 女, 博士, 讲师, 主要从事光信息传感方面的研究。E-mail: qieziyangyang@163.com

着两个不同的布拉格中心波长 $\lambda_{B-x(y)}$, 因此其透射谱就会演变成两个相互偏移的 T_x 和 T_y , 中心波长间隔为 $\Delta\lambda_B = 2\Delta n$.

偏振相关损耗(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

$$f_{PDL}(\lambda) = 10\lg[P_{\max}(\lambda)/P_{\min}(\lambda)]. \quad (1)$$

式中 P_{\max} 和 P_{\min} 分别为通过光纤布拉格光栅的最大和最小光功率。分析表明最大最小值总是等于本征值 T_x 或 T_y ^[7], 因此 FBG 的 PDL 可以写为

$$f_{PDL}(\lambda) = 10\lg[T_x(\lambda)/T_y(\lambda)]. \quad (2)$$

可以看出, 此时的 PDL 值就完全取决于两种本征态传输谱 (dB 形式) 之间的差值。典型的双折射存在时的透射谱和 PDL 谱如图 1(a) 所示。图中, 波长 A 点对应的 PDL 即为相应的两个透射谱的差值。双折射使两个透射谱发生波长偏移, 从而产生 PDL, 因此可以用 PDL 的变化来衡量双折射的大小。研究表明, 在一定范围内, PDL 的峰值大小与双折射成正比^[5,6], 超过此范围之后, PDL 峰值趋于饱和, 仿真如图 1(b) 所示。因此可通过测量 PDL 峰值来测量外界压力、磁场等引起的各种双折射, 从而感知外界参量^[7]。

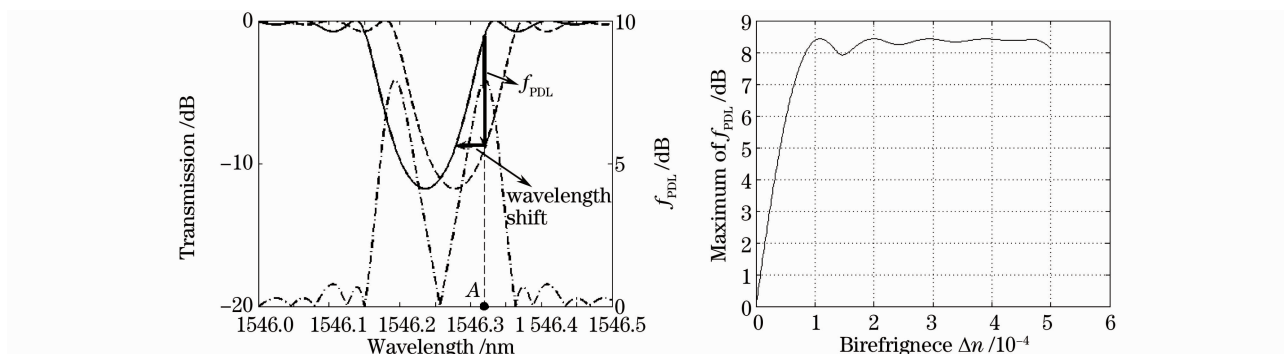


图 1 (a) 双折射存在时的透射谱和 PDL 谱, (b) PDL 峰值与双折射大小的关系

Fig. 1 (a) Transmission and PDL spectrum at certain birefringence, (b) PDL peak values versus birefringence

3 透射谱对 PDL 性能的影响

PDL 的谱型以及峰值大小对于传感测量的灵敏度、动态范围等有重要影响。从(2)式可以看到, PDL 取决于透射谱 T_x 和 T_y , 在同等双折射情况下, 透射谱的特性将影响 PDL 的大小和谱形。

3.1 灵敏度

灵敏度的大小表现为在同等双折射(即波长位移)条件下, 对应的 PDL 的大小。在图 1 可见, 在波长位移确定的情况下, 透射谱的斜率对 PDL 有很大影响。图 2 为两个透射谱斜率与 PDL 谱的关系, 可见 PDL 峰值分别位于两个透射谱的最大斜率处。在同等波长位移的情况下, PDL 大小将取决于透射谱的斜率。如相移光栅, 其优越的 PDL 灵敏度特性^[8,9]正是得益于其透射谱中间有一个高斜率的透射峰, 如图 3 所示。

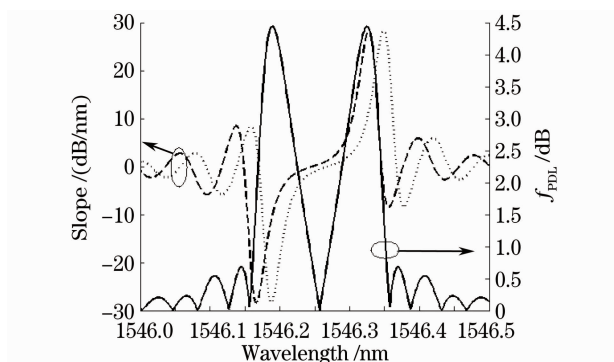


图 2 均匀光栅透射谱斜率与 PDL 谱

Fig. 2 PDL and slope spectrum of uniform grating

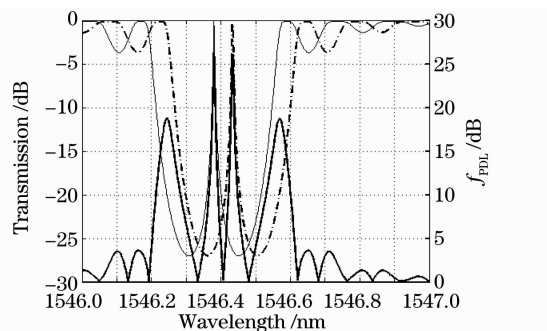


图 3 相移光栅的透射谱与 PDL 谱

Fig. 3 PDL and transmission spectrum of phase-shifted grating

3.2 动态范围

图4仿真了不同双折射条件下,PDL谱的变化趋势。可以看到,在双折射较小时,PDL随双折射单调递增,但是当双折射增加到一定程度后,峰值出现饱和,几乎没有变化,这就决定了测量的动态范围。PDL峰值与双折射之间的关系见图1(b),可以看到在仿真参数条件下,双折射的最大测量范围约为 1×10^{-4} 。超出这个范围以外,PDL峰值将趋于饱和。

从透射谱的谱型可以解释测量范围。假设透射谱谱宽为 $\Delta\lambda$,PDL是两个透射峰之间的差值,当中心波长随着双折射发生变化时,两个透射谱之间的位置也在不断的偏移,直至完全分开,如图5所示。从PDL的左半部分分析,在整个过程中两个透射谱差距最大的地方在于 T_x 的第一个零点和 T_y 的峰值相交的地方,即两者中心波长相差 $\Delta\lambda/2$ 的地方,此时它们各自平移了 $\Delta\lambda/4$,PDL的峰值就是透射谱的深度,如图5(b)所示。超过这个范围后, T_x 边带和 T_y 峰值相遇,就会出现图1(b)所示的饱和区开始时的小波动。波动的大小取决于边带,如果透射谱的边带抑制度很好,那么饱和值的波动就比较小,比如切趾光栅的特点就是边带抑制比很好,那么PDL峰值与双折射关系图中饱和区就比较平稳。

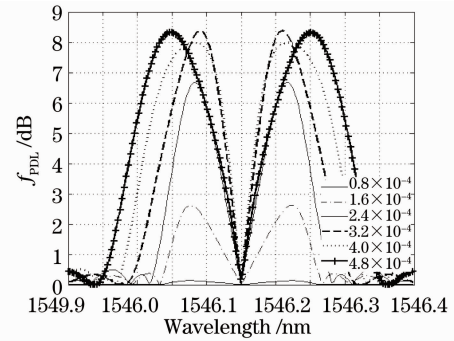


图4 PDL谱随双折射大小的变化

Fig. 4 PDL spectrum for different birefringences

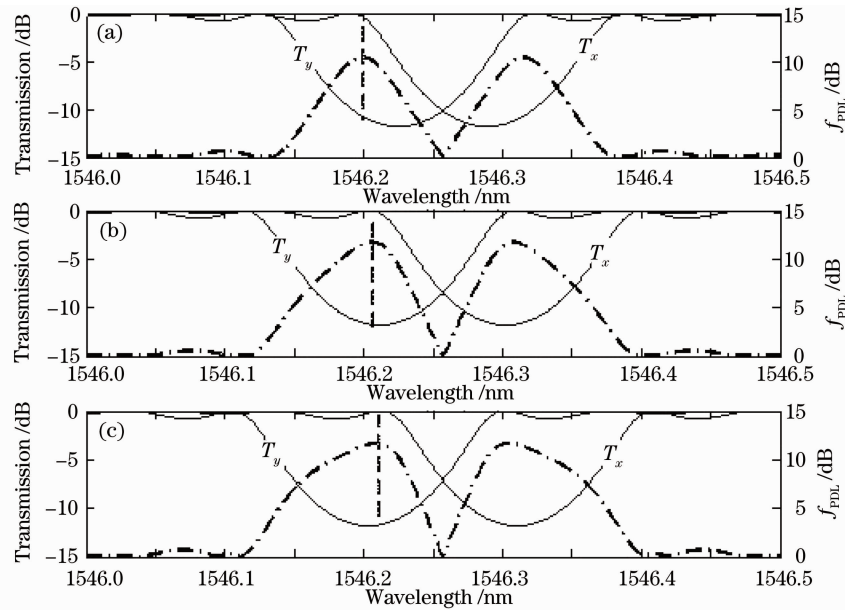


图5 PDL与透射谱差值之间的关系

Fig. 5 Relationship between PDL spectrum and the difference of eigen modes transmission spectrum

如果希望动态范围比较大,则需要到达饱和峰值之前两本征透射谱能够平移更大的波长范围,即需要更大的 $\Delta\lambda$ 。图6仿真了两个同等透射深度、谱宽不同的光栅其PDL峰值对双折射的响应情况,可以看到透射谱宽度较大的光栅对应的动态范围也更大,同时由于透射深度相同,因此它们的饱和值是趋于一致的。根据动态范围与透射谱带宽的关系,当两透射谱波长间隔为 $\Delta\lambda/2$ 时,达到饱和,此时折射率变化为 $\Delta n = \Delta\lambda / (4\Lambda)$ 即为测量范围。

3.3 峰值带宽

前面的研究中发现双折射引起的偏振相关损耗峰值所对应的波长往往只具有对称的两个峰值,而且峰值波长点是变化的,在利用波长扫描法检测PDL峰值时,很容易因为波长步长过大,不能正确得到PDL峰值,产生测量误差。因此设想设计光栅结构,使其PDL峰值具有一定的带宽,这样可以用单一波长进行检测,还可减少测量误差,减轻后续检测的难度。

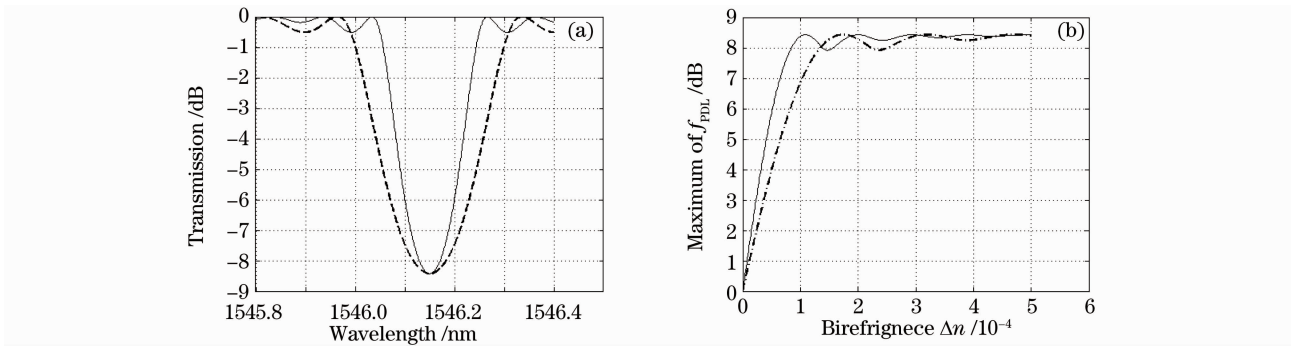


图 6 不同宽度的透射谱(a)和相应动态范围(b)

Fig. 6 Transmission spectrum with different bandwidths (a) and corresponding dynamic range (b)

如果期望 PDL 峰值恒定,那么需要透射谱的差值在一定的波长范围内保持恒定,即透射谱斜率恒定。图 7(a)、(b)是透射谱为理想三角形、斜率不同的两根光栅的透射谱和对应的 PDL 谱。可以看到,在 PDL 谱中,其峰值保持有一定的带宽。在透射强度不变的情况下增加斜率,PDL 峰值增加,但峰值带宽降低。还可以制作级联三角形谱的光栅,如图 7(c)所示,以进一步增加 PDL 谱峰值宽度的范围。下一步的工作就是重构出具有目标透射谱特性的光栅结构。

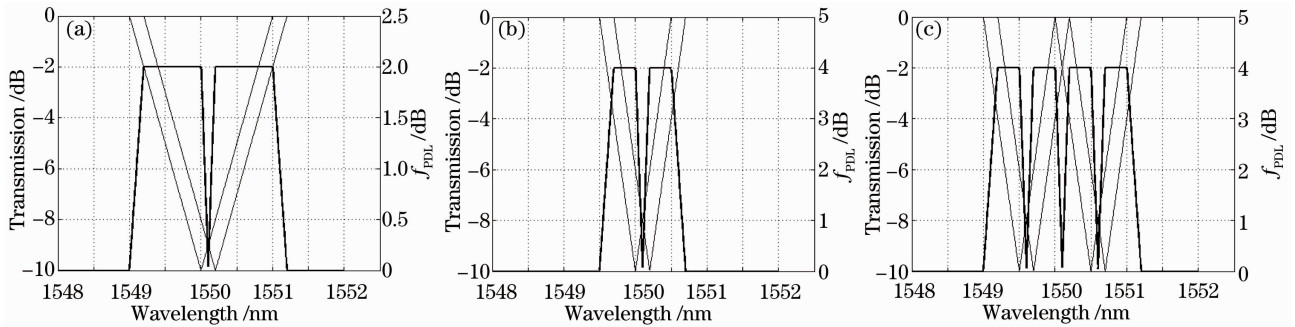


图 7 (a)、(b)斜率不同的三角形透射谱光栅和(c)级联三角形透射谱

Fig. 7 (a), (b) Triangular shape transmission spectrum with different slopes and (c) cascaded triangular transmission spectrum

4 光栅的重构

光纤光栅的重构是指从光栅的性质得到其结构参数。分立剥层算法(DLP)是目前最为常用的重构算法,它能够快速、方便、准确地对各种光栅目标频谱响应进行重构^[10,11],基于离散的光纤光栅模型,把光栅看成 N 段等间隔 $\Delta = L/N$ 的复数反射镜,相邻复数反射镜间是一段传输区域,如图 8 所示。 $R_j(z, \delta)$, $S_j(z, \delta)$ 分别为第 j 个反射点的前向和后向传输光, ρ_j 表示反射镜的复反射系数($j = 1, 2, \dots, N$)。

由于通常均匀光栅中的直流分量为 0,则传输矩阵 T 可写为

$$T = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma\Delta) + i \frac{\delta}{\gamma} \sinh(\gamma\Delta) & \frac{q}{\gamma} \sinh(\gamma\Delta) \\ \frac{q^*}{\gamma} \sinh(\gamma\Delta) & \cosh(\gamma\Delta) - i \frac{\delta}{\gamma} \sinh(\gamma\Delta) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $q(z) = -j \frac{\pi A c(z)}{2 n_0 \Lambda} \exp[-j\varphi(z)]$ 是光栅耦合系数^[9],包含光纤光栅折射率调制幅度 $A c(z)$ 和相位 $\varphi(z)$ 的全部信息,而复反射系数 ρ_j 是 $q(z)$ 的函数^[11]。

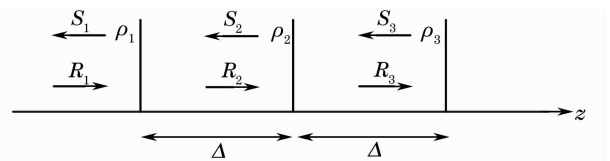


图 8 光纤光栅离散模型

Fig. 8 Discretemodel of fiber grating

$$\rho = -\tanh(|q|\Delta) \frac{q^*}{|q|}, \quad (4)$$

这就把光栅的结构参数和光栅的各个层的反射系数 ρ_j 联系到一起。因此,光栅重构主要就是从频谱响应中推算出复反射系数 ρ_j ,再通过(4)式得到耦合系数 $q(z)$,然后通过(3)式就能得到光栅折射率调制幅度 $Ac(z)$ 和相位 $\varphi(z)$ 的全部信息。

利用上述 DLP 算法对理想的级联三角形光栅进行重构。得到重构光栅的耦合系数如图 9(a)所示,根据耦合系数采用传输矩阵法对重构光栅进行仿真,得到重构结果、理想谱和物理可实现谱的比较如图 9(b)所示,可见重构结果与理想谱吻合较好,在谱峰值处有微小误差。对于重构出的光栅结构,对其施加一定的双折射,得到分裂的两个本征透射谱和相应的 PDL 谱如图 9(c)所示,得到的 PDL 谱具有相对比较平坦的峰值。

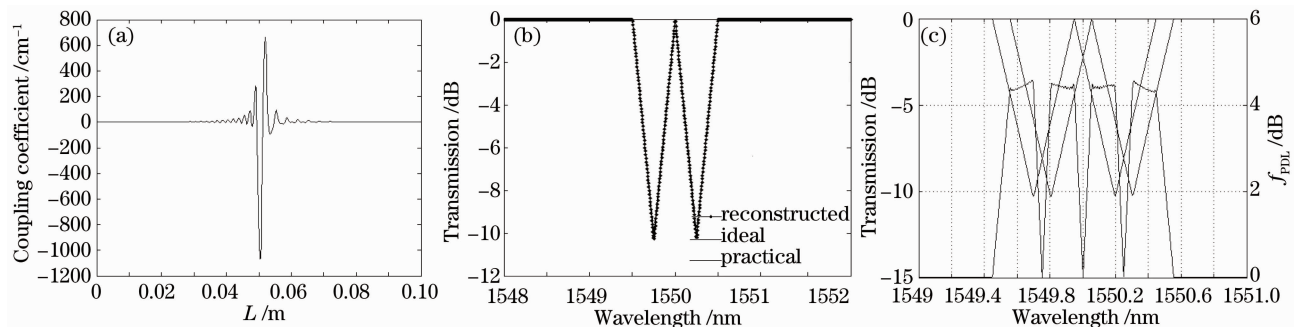


图 9 (a)重构耦合系数,(b)重构结果,(c)重构光栅的 PDL 谱

Fig. 9 (a) Plots of the (real) coupling coefficient reconstructed from a cascaded triangular transmission spectrum using DLP method, (b) comparison of ideal, practical and reconstructed transmission spectrums, (c) PDL spectrum of reconstructed grating

5 结 论

从基本原理出发,分析了基于偏振相关损耗进行传感测量时,透射谱对 PDL 测量的灵敏度、测量范围、峰值带宽等性能的影响原因。结果表明,PDL 灵敏度受透射谱斜率影响,动态范围受透射谱带宽影响,而具备峰值带宽则需要斜率的单一性。利用传输矩阵法对各种光栅结构的传感性能进行了比较分析。利用分立层剥离重构算法分析了透射功率谱为级联三角形的光栅结构。本研究为基于光栅偏振特性的传感测量中光栅结构的选择和设计提供了参考。

参 考 文 献

- Alan D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1662
- Jiang Desheng, He Wei. Review of applications for fiber Bragg grating sensors[J]. *Journal of 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 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
- Yong Wang, Changqing Xu. Spun FBG sensors with low polarization dependence under transverse force[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(7): 477~479
- 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 Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(13): 966~968
- 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
- 8 Su Yang, Peng Hui, Feng Kui *et al.*. Effect of grating structure on magnetic field sensor exploiting differential group delay in fiber Bragg gratings[J]. *Acta optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1223~1228
苏洋, 彭晖, 冯奎等. 基于差分群时延的磁场传感中布拉格光栅结构影响的性能分析[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1223~1228
- 9 Feng Kui, Zhu Yong, Su Yang *et al.*. Analysis of the cross sensitivity of magnetic field sensor with phase-shifted grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1020~1025
冯奎, 朱勇, 苏洋等. 相移光栅磁场传感方案交叉敏感分析[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 1020~1025
- 10 Johannes Skaar, Ligang Wang, Turan Erdogan. On the synthesis of fiber Bragg gratings by layer peeling[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(2): 165~173
- 11 Ricardo Feced, Michalis N. Zervas, M. A. Muriel *et al.*. An efficient inverse scattering algorithm for the design of nonuniform fiber Bragg gratings[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(8): 1105~1115