

文章编号: 0253-2239(2010)04-1020-06

# 相移光栅磁场传感方案交叉敏感分析

冯奎 朱勇 苏洋 彭晖

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要** 通过相移光栅的偏振相关损耗(PDL)进行磁场测量是一种较为新颖的磁场测量方法,可用于对脉冲交变强磁场的测量。交叉敏感问题是光纤光栅传感中的关键问题。忽略光栅固有双折射,利用传输矩阵法对磁场传感原理进行了推导与仿真,理论分析了温度、轴向应力和压力等对相移光栅透射窗口的影响,并对相应的PDL峰值变化进行了数值仿真。理论和实验表明,透射窗口峰值的波长随温度和轴向应力呈线性变化,PDL谱线发生横向平移,磁场传感系统不受影响。压力的变化改变了光栅的折射率分布,产生应力双折射,PDL谱线发生不规则变化,对磁场测量结果产生严重影响。

**关键词** 磁场测量;相移光栅;偏振相关损耗;交叉敏感

**中图分类号** TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103004.1020

## Analysis of the Cross Sensitivity of Magnetic Field Sensor with Phase-Shifted Grating

Feng Kui Zhu Yong Su Yang Peng Hui

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

**Abstract** The measurement of magnetic field through the polarization dependent loss (PDL) of phase-shifted grating is a more novel approach. It can be used to measure the pulse alternating strong magnetic field. The key issue of fiber grating sensor is the cross-sensitive. Ignoring the inherent birefringence of gratings, the principle of magnetic field sensing is derived and simulated by transfer matrix method. The influence of the temperature, axial stress and pressure on the transmission window of phase-shifted grating is theoretical analyzed, and the corresponding changes of the PDL peak value are simulated. The results show that the wavelength of transmission window peak value changes linearly with temperature and axial stress, PDL spectrum horizontal lines shift, and the result of magnetic field measurement will not be affected. The refractive index changed with pressure causes the irregular change of PDL spectrum, having a serious impact on the magnetic field measurement.

**Key words** magnetic field measurement; phase-shifted grating; polarization dependent loss; cross sensitivity

### 1 引言

现代电磁环境是各种电磁能量共同作用的复合环境,既有自然电磁干扰源,又有强烈的人为干扰源。为研究电磁场的特性及防护手段,必须对电磁场进行实时监测,瞬变电磁场或电磁脉冲的监测则是电磁环境研究的核心内容。传统的电磁场监测方法主要依赖于电学手段,其敏感单元主要是各种类型的天线,在监测脉冲强磁场时,其馈线容易感应产生强的涌浪电流,会导致监测终端设备的损毁<sup>[1]</sup>。

光纤光栅凭借其尺寸小、质量小和抗干扰能力强

等特点,在磁场测量领域有着广泛应用<sup>[2,3]</sup>。基于相移光栅偏振效应的磁场测量方法,通过对光的偏振特性的监测,实现对脉冲强磁场的测量,方案不受感应电流的影响,具有测量范围大,灵敏度高等优点。

交叉敏感问题是相移光栅磁场传感器在实际应用中亟待解决的关键问题。本文从相移光栅磁场测量方案的原理出发,对温度、轴向应力和压力等因素对光栅特性的影响进行了理论分析,仿真分析外界因素对传感方案性能的影响。利用相位掩模法制作相移光栅,实验结果与理论分析基本吻合。

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-09-29

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

## 2 磁场传感原理

### 2.1 光纤光栅偏振相关损耗

由 Faraday 效应可知,线偏振光在光纤光栅中传播,受磁场的影响后,偏振光的振动方向会发生旋转。旋转角度与光纤光栅的 Verdet 常数有关,它的大小受光源波长和环境温度变化的影响,石英光纤在1550 nm 波长附近的 Verdet 常数大约为  $1 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ 。由磁场引起的左旋和右旋圆偏振光折射率之差为

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

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。

光纤光栅偏振相关损耗(PDL)定义为两个偏振模之间的差分损耗,它体现了光栅对不同偏振态的敏感度。表示为<sup>[4]</sup>

$$L_{\text{PD}}(\lambda) = |10 \lg(T_L(\lambda)/T_R(\lambda))|. \quad (2)$$

对光栅内只有一个相位突变的相移光栅来说,可将其看成由两个均匀子光栅级联而成,两子光栅之间光波长的相位发生突变。利用传输矩阵理论<sup>[5]</sup>,对 PDL 谱线进行数值模拟。

设计相移光栅参数,有效折射率  $n_{\text{eff}}$  为 1.45,光栅周期  $\Lambda$  为 535nm,折射率调制系数  $\delta_n^{-5}$ ,长度  $l$  为 4 cm,相移量  $\varphi$  大小为  $\pi/2$ ,根据(2)式得到 PDL 数值仿真结果如图 1 所示。图 2 是 PDL 输出与外加磁场关系的数值仿真图,在磁场小于 80 T 左右时,PDL 的幅值随外加磁场线性变化,当磁场大于 100 T 左右时,由于透射谱已经完全分裂,PDL 幅值趋于饱和。通常检测 PDL 幅值的最大值,以简化解调系统的设计。

### 2.2 电磁脉冲波形标准

强电磁脉冲源主要分为两类:自然电磁脉冲,包

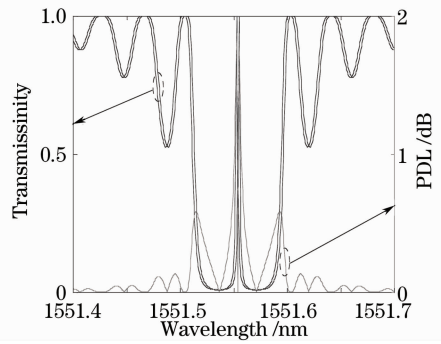


图 1 左(右)旋圆偏振光的透射系数与 PDL 谱  
Fig. 1 Transmission coefficient for two modes and PDL evolution with wavelength

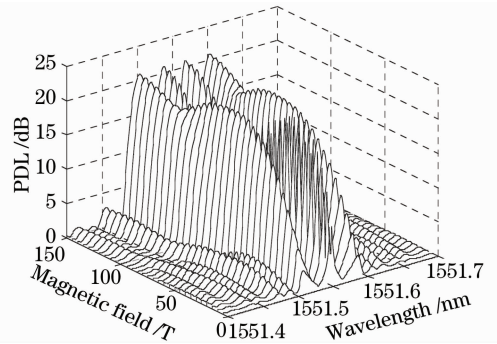


图 2 PDL 谱与磁场的关系

Fig. 2 PDL spectrum in transmission versus magnetic field

括雷电电磁脉冲、太阳“磁暴”等;人工制造的电磁脉冲武器,主要包括高功率微波武器、电磁炸弹及核电磁脉冲等。一般核爆电磁脉冲场强可以总结为简单的双指数解析函数表达式<sup>[6]</sup>

$$E(t) = E_0 K [\exp(-\beta t) - \exp(-at)], \quad (3)$$

式中  $E_0$  为峰值场强,  $k$  为修正系数,  $a, \beta$  为表征脉冲前后沿的参数。采用 Bell 实验室提出的参数标准进行仿真分析,  $a = 4.76 \times 10^8 / \text{s}$ ,  $\beta = 4 \times 10^6 / \text{s}$ ,  $K = 1.05$ ,  $E_0 = 50 \text{ KV/m}$ 。电磁脉冲波形及相应的 PDL 谱如图 3 所示,磁场测量系统能够实现对脉冲磁场的测量。

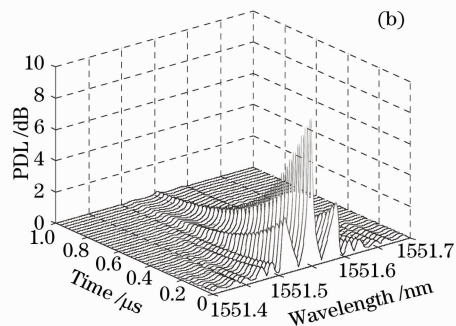
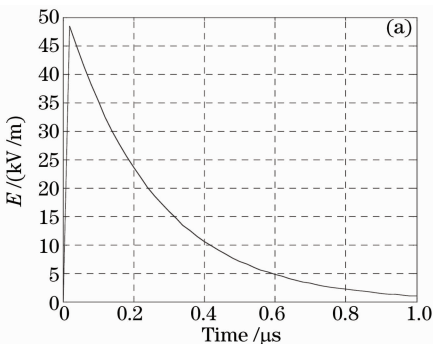


图 3 电磁脉冲标准波形(a)与相应光栅 PDL 谱(b)

Fig. 3 Electromagnetic pulse standard waveform (a) and PDL spectra versus time (b)

### 3 外界因素影响分析

#### 3.1 温度影响分析

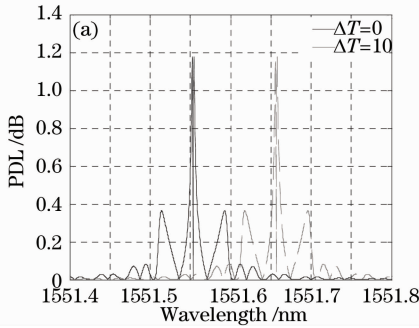
光纤光栅对外界温度具有很强的敏感性,而且光栅在温度传感器方面已经得到了广泛的应用<sup>[7]</sup>。温度主要通过热膨胀效应和热光效应影响光栅特性。假设外界温度变化  $\Delta T$ ,则热膨胀效应所引起的光纤光栅周期的变化  $\Delta\Lambda$  可以表示为<sup>[8]</sup>

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \alpha\Delta T, \quad (4)$$

式中  $\alpha$  为光纤材料的热膨胀系数。热光效应所引起的有效折射率的变化  $\Delta n_{\text{eff}}$  可以表示为

$$\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} = \xi\Delta T, \quad (5)$$

式中  $\xi$  为热光系数。温度变化将会导致光纤光栅布拉格波长随之线性变化,相移光栅透射窗口的位置



也相应发生变化,之间的关系可以表示为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T. \quad (6)$$

通常对于掺锗光纤  $\xi = 6.67 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,  $\alpha \approx 5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ 。从两个系数的取值可以看到,光栅波长的变化主要取决于热光效应,光栅周期的变化可以忽略,并且对于左旋和右旋圆偏振光产生了同样的效果。由此可知温度变化前后光栅的能量透射系数为

$$T'_{L(R)}(\lambda) = T_{L(R)}(\lambda - \Delta\lambda), \quad (7)$$

$$\Delta\lambda = \lambda'_B - \lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (8)$$

由(2)式可得

$$L'_{\text{PD}}(\lambda) = L_{\text{PD}}(\lambda - \Delta\lambda). \quad (9)$$

因此温度的变化只会使 PDL 谱在波长轴上平移,但不会影响 PDL 谱的形状。如图 4 所示,PDL 幅值和磁场仍然保持线性。

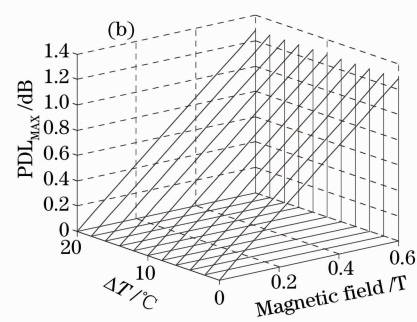


图 4 不同温度下的 PDL 谱(a)与 PDL 峰值随磁场变化(b)

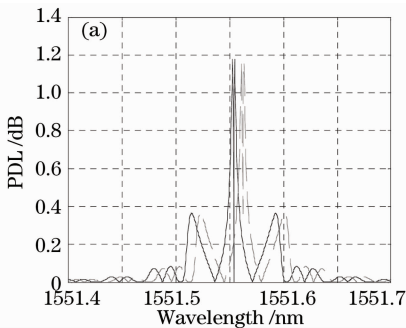
Fig. 4 PDL spectra (a) and the max value of PDL versus magnetic (b) at different temperature

#### 3.2 轴向应力影响分析

轴向应力是指沿着光纤光栅传播方向的应力分量。应力变化改变了光栅长度,导致光栅参数发生变化,同时,由于弹光效应的存在,使得光栅的折射率发生变化。此时轴向应力  $\epsilon$  引起的  $\lambda_B$  的相对变化为<sup>[9,10]</sup>

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\epsilon, \quad (10)$$

式中  $P_e$  为有效弹光系数,对于普通的石英光纤,  $P_e = 0.22$ 。



在应力变化后,光栅的有效折射率也改变,透射系数为

$$T'(\lambda) = T(\lambda - \Delta\lambda), \quad (11)$$

可以得到

$$L'_{\text{PD}}(\lambda) = L_{\text{PD}}(\lambda - \Delta\lambda), \quad (12)$$

与温度的影响类似,相移光栅透射窗口波长与应力变化成线性关系,PDL 谱线发生横向平移,如图 5 所示。图 5(a)给出了在恒定磁场下,应力变化所引起的输出变化,虚线为  $\epsilon = 10^{-5}$  N 时的 PDL 谱,与

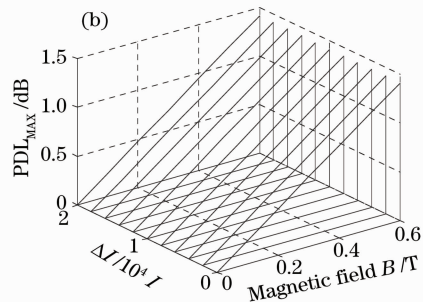


图 5 不同应力下的(a)PDL 谱与(b)PDL 峰值随磁场变化

Fig. 5 (a)PDL spectra and (b) the max value of PDL versus magnetic at different stress

实线相比谱的形状并无变化。图 5(b)可以看出 PDL 峰值与磁场的线性关系没有改变,不会影响磁场测量系统的输出值。

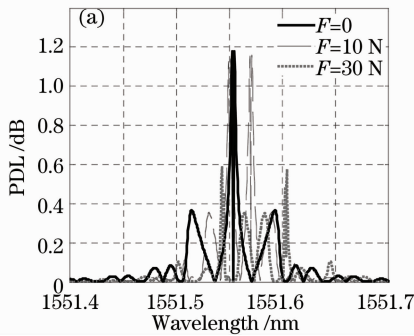
### 3.3 压力影响分析

只考虑光栅受均匀分布压力的情况。由于单个相位突变的相移光栅可以看作均匀光栅级联而成,故按照和均匀光栅相同的方法,分析相移光栅受压力影响。压力使得光纤发生变形,导致横截面内两个垂直方向上的折射率发生变化,即改变了光纤光栅的线双折射,使得光栅的透射谱发生改变。由文献[11]可知光纤光栅两端为自由端时,光纤所受  $z$  方向上的应力分量为 0,  $x$  和  $y$  方向上的折射率变化  $\Delta n_x, \Delta n_y$  可表示为

$$\Delta n_x = K_x F / D, \quad K_x = 7.73 \times 10^{-12} / \text{Pa},$$

$$\Delta n_y = K_y F / D, \quad K_y = -1.54 \times 10^{-12} / \text{Pa}, \quad (13)$$

式中  $D$  为光纤直径,普通单模光纤直径  $125 \mu\text{m}$ ,  $F$  为所受压力,单位为牛顿。忽略光纤固有的双折射,在光栅受外界压力时,左旋和右旋圆偏振光的透射能量谱可表示为



$$\begin{cases} T_L(\lambda) = T_{L,x}(\lambda) + T_{L,y}(\lambda) \\ T_R(\lambda) = T_{R,x}(\lambda) + T_{R,y}(\lambda) \end{cases}, \quad (14)$$

可将(2)式写为

$$L_{PD}(\lambda) = \left| 10 \lg \frac{T_{L,x}(\lambda) + T_{L,y}(\lambda)}{T_{R,x}(\lambda) + T_{R,y}(\lambda)} \right|, \quad (15)$$

固定磁场不变,由于压力引起的  $x$  轴与  $y$  轴的布拉格波长的变化分别为  $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$ , 因此

$$L'_{PD}(\lambda) = \left| 10 \lg \frac{T_{L,x}(\lambda + \Delta\lambda_1) + T_{L,y}(\lambda + \Delta\lambda_2)}{T_{R,x}(\lambda + \Delta\lambda_1) + T_{R,y}(\lambda + \Delta\lambda_2)} \right| \neq L_{PD}(\lambda + \Delta\lambda). \quad (16)$$

由上式可知,由于压力的作用,使输出的 PDL 谱不仅在波长轴上发生了移动,而且谱的形状也发生了不规则变化,严重影响了测量系统的准确度。仿真结果如图 6 所示,随着压力的变化, PDL 峰值和磁场的关系发生改变,压力均匀恒定加在光栅上时它们仍然保持线性关系,但是压力随机变化或者光栅受力不均匀时, PDL 谱形发生不规则变化,不利于磁场的测量,因此应当避免压力的影响。

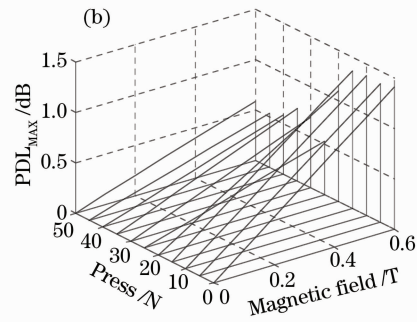


图 6 不同压力下的(a)PDL 谱与(b)PDL 峰值随磁场变化

Fig. 6 (a) PDL spectra and (b) the max value of PDL versus magnetic field at different press

## 4 实验验证

利用实验室的光栅制作平台,使用周期为  $535 \text{ nm}$  的相位掩模板,制作了长度为  $4 \text{ cm}$ ,调制深度为  $5 \times 10^{-5}$  的相移光栅。磁场测量过程中,利用磁光调制实验仪产生稳定磁场,光矢量分析仪(OVA)作为检测器,对磁场测量中受外界因素的影响进行验证。图 7 是在未加磁场时,OVA 所测得相移光栅的透射谱和 PDL 谱,图中 PDL 谱的值并不为零,而是杂乱无章。在光栅透射谱对应波长上 PDL 有明显的突出部分,这是由于光栅致双折射引起的<sup>[12,13]</sup>,其他不为零的部分主要是由光纤固有双折射引起的,可见双折射对测量系统会产生一定的影响<sup>[14]</sup>。

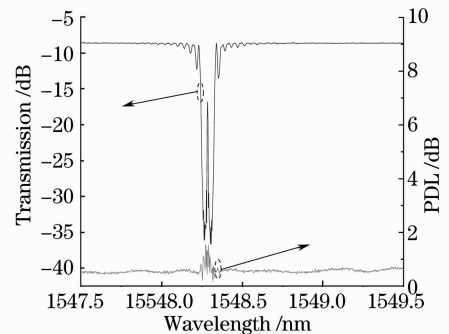


图 7 未加磁场时光栅的透射谱和 PDL 谱

Fig. 7 PDL spectra and transmission of phase-shifted grating with no magnetic field

产生一定的轴向应力作用;温度变化主要来自磁场发生器,磁场强度增大的同时,温度随之改变;利用



平板对光纤光栅均匀施加压力。图 8~10 分别给出了在磁场恒定时温度、应力和压力对 PDL 谱的影响情况,图中虚线为受到温度、应力和压力变化后的 PDL 谱。从中可以看出温度和应力的变化使得 PDL 谱发生平移,PDL 幅值保持不变;压力变化使 PDL 谱的形状发生变化,幅值也随之改变,与磁场成复杂的非线性关系。温度和应力变化加大了磁场测量方案的解调难度,而压力变化降低了磁场测量的准确度。

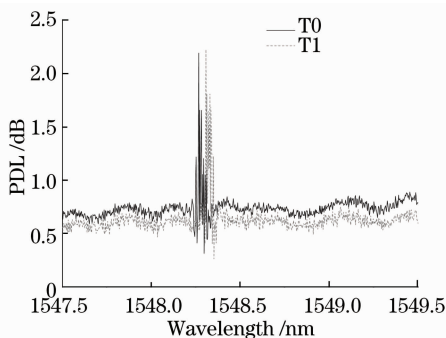


图 8 恒定磁场下温度对 PDL 谱的影响

Fig. 8 PDL spectra with different temperature under the same magnetic field

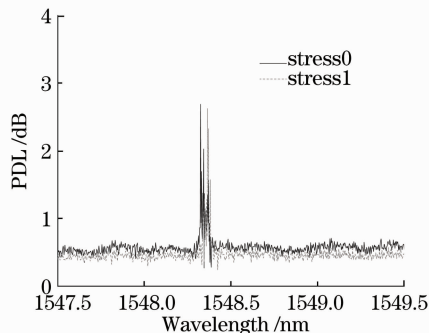


图 9 恒定磁场下应力对 PDL 谱的影响

Fig. 9 PDL spectra with different stress under the same magnetic field

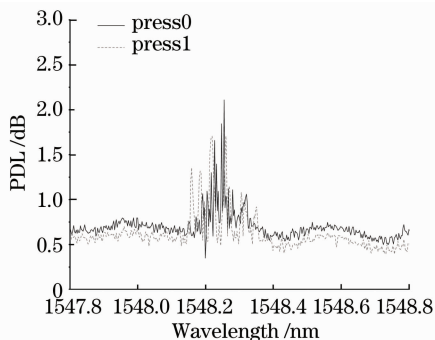


图 10 恒定磁场下压力对 PDL 谱的影响

Fig. 10 PDL spectrum with different press under the same magnetic field

## 5 结 论

基于偏振效应的相移光栅磁场测量方法原理,对磁场测量中的交叉敏感问题进行了理论分析与数值仿真。利用仪器仪表对温度、轴向应力和压力的影响进行了实验验证,实验结果与理论分析基本一致。该磁场测量方案对温度和应力不敏感,但是受压力影响较大,应对光纤光栅进行封装,以避免压力变化带来的不利影响。

## 参 考 文 献

- Jiang Zhipeng, Zhao Wei, Qu Kaifeng. Development and application of magnetic field measurement technology [J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2008, **45**(508): 1~6
- 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): 1~6
- 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. 光纤布喇格光栅磁场传感方案[J]. *激光与红外*, 1999, **29**(4): 238~242
- 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
- Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- Xie Yanzhao, Wang Zanji, Wang Qunshu *et al.*. High altitude nuclear electromagnetic pulse waveform standards a review[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(8): 781~787
- 谢彦召, 王赞基, 王群书等. 高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(8): 781~787
- Guan Baiou, H. Y. Tam, S. L. Ho *et al.*. Study on strain / temperature two parameters sensing with a single fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(4): 372~374
- 关柏鸥, H. Y. Tam, S. L. Ho 等. 单光纤光栅温度应变双参数传感研究[J]. *中国激光*, 2001, **28**(4): 372~374
- Qiao Xueguang, Jia Zhenan, Fu Haiwei. Theory and experiment about in fiber Bragg grating temperature sensing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(2): 0494~0497
- 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): 0494~0497
- Wu Xiaodong. Fiber Bragg Grating Strain Sensor Technology and Application Study[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. 18~21
- 吴晓冬. 光纤 Bragg 光栅应变传感技术及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. 18~21
- Zhang Ying, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun *et al.*. A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 89~91
- 张 颖, 刘志国, 郭转运等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 89~91
- 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

12 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): 2337~2339

13 Ge Tingwu, Lu Dan, Xu Kun. 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. 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

14 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

## 《中国激光》“激光分子影像诊断与治疗监控”专题 征 稿 启 事

随着光学成像技术、分子标记技术和基因组学/蛋白质组学的发展,激光分子影像已经成为光子学技术与生命科学和医学应用交叉的关键技术科学,发展十分迅猛。激光分子影像可在细胞和分子层面探索生命最小基本单元的功能、疾病发生发展的分子机理,可为疾病的早期诊断及其治疗进行无创、实时、靶向性的检测和监控提供有效手段;有望解决长期困扰人类健康与发展的重大关键难题,从而有效改善人类生存与生活质量。《中国激光》计划于**2010年10月正刊**(EI核心收录)上推出“激光分子影像诊断与治疗监控”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“激光分子影像诊断与治疗监控”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

### 征稿范围包括:

光学分子成像的新技术与新方法:主要包括荧光分子成像技术(FRET、FRAP、FCS等);光声成像(PAI);光学相干层析成像(OCT);激光散斑成像(LSI);微波热声成像(TAI);近红外光学漫射成像(DOT)以及太赫兹成像(THz)等。

光学分子探针与分子诊断:主要包括近红外高效光学分子探针;多模态复合纳米探针;蛋白质和多肽小分子光学探针;分子水平诊断光谱学研究(荧光、吸收、偏振和拉曼光谱等)以及基于纳米技术的高效基因检测、单分子识别等。

光学分子成像在疾病早期诊断和治疗监控中的应用:主要包括疾病早期诊断中的基础研究;肿瘤的光热、光化学治疗及其监控;低强度光子治疗技术及其机制;手术过程中的光学导航以及预后的无损伤光子学疗效评估与检测技术等。

### 特邀组稿专家:

邢 达 教授 华南师范大学

### 截稿日期: 2010年6月30日

投稿方式以及格式:可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“激光分子影像诊断与治疗监控”投稿),详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjj.htm>。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请咨询马浙编辑,E-mail: CJL@siom.ac.cn;电话:021-69918427。