

doi:10.3788/gzxb20174602.0206001

长周期光纤光栅检测混合油的折射率

毕卫红¹, 邢云海¹, 周昆鹏^{1,2}, 付兴虎¹, 付广伟¹

(1 燕山大学 信息科学与工程学院, 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

(2 内蒙古民族大学 物理与电子信息学院, 内蒙古 通辽 028000)

摘要:为了检测柴油煤油混合油的折射率特性,利用耦合模理论分析长周期光纤光栅折射率传感特性,建立长周期光纤光栅中心波长、透射谱峰值损耗与混合油品中柴油含量的关系。结果表明:在混合油中,随着柴油含量的增加,长周期光纤光栅波长发生蓝移,当柴油含量达到使混合油折射率等于包层折射率时,中心波长漂移最大,柴油含量每改变 1%,中心波长平均漂移 0.622 7 nm;柴油含量继续增加,混合油折射率大于包层折射率时,光栅中心波长基本保持不变,但是峰值损耗逐渐增大,带宽减小,之后柴油含量每增加 1%,峰值损耗线性增加 0.154 6 dB。该方法在检测混合燃料各组分含量具有潜在的应用前景。

关键词:长周期光纤光栅;耦合模;混合油品;柴油含量;折射率

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)02-0206001-7

Measurement of the Refractive Index of the Mixed Oil Kerosene Based on Long Period Fiber Grating

BI Wei-hong¹, XING Yun-hai¹, ZHOU Kun-peng^{1,2}, FU Xing-hu¹, FU Guang-wei¹

(1 School of Information Science and Engineering, The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

(2 School of Physics and Electronic Information, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China)

Abstract: In order to detect the characteristics of refractive index of the oil mixed kerosene and diesel, the sensitive features of refractive index of long period fiber grating were analyzed by using the coupled-mode theory, the relationship between the content of diesel oil and the long period fiber grating's resonant wavelength and transmitted intensity was obtained. The result shows that when the diesel oil of the mixed oil increases, the long period fiber grating resonance wavelength blue-shifts. And when the concentration of diesel oil reaches a certain concentration that the refractive index of the solution is equal to the cladding refractive index, the resonance wavelength will shift to the maximum. As the concentration of diesel changes 1%, the average shifts of resonance wavelength reaches 0.622 7 nm. As the diesel oil increases sequentially, the refractive index of mixed oil exceeds the cladding refractive index, and the resonant wavelength does not change basically, the shape changes greatly with the bandwidth decreasing and the peak loss increasing. And with the concentration of diesel oil increasing unceasingly, the peak loss increase and bandwidth diminishes. As the concentration of diesel changes 1%, the peak loss reaches 0.154 6 dB. So the long period fiber grating has a potential application prospect in the detection of mixed fuel concentration.

Key words: Long Period Fiber Grating (LPFG); Coupled mode; Mixed oil; Diesel concentration; Refractive index

OCIS Codes: 060.2370; 050.2770; 060.2310; 060.2300; 060.2340

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61475133, 61575170)、河北省科技计划项目(Nos. 14273301D, 15273304D, 16273301D, 16213902D)资助

第一作者:毕卫红(1960-),女,教授,博士,主要研究方向为光纤传感与光电检测技术. Email: whbi@ysu.edu.cn

收稿日期:2016-08-17; **录用日期:**2016-09-30

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

随着社会的发展,资源浪费、环境污染日益严重,然而石油类能源不可再生,节能减排是现阶段节约资源、保护环境的必然要求.乙醇汽油、乙醇柴油、柴油汽油等新型混合燃料在不影响汽车性能的前提下,能够提高燃料的质量,减少污染物的排放,同时还能节约石油燃料资源^[1].但混合燃料中各组分含量不当不仅会影响发动机性能及使用寿命^[2],而且还会对内燃机超细微粒排放造成很大的影响^[3].因此对混合燃料各组分含量进行严格检测具有十分重要的意义.

长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)具有非常显著的折射率敏感特性,已被广泛应用到很多领域.如李堃^[4]等将 LPFG 粘贴在可变体机翼的表面实现机翼表面温度的高精度实时监测;ELSTER J L^[5]等把 LPFG 安装在飞机上实现了飞行环境的气压和空气湿度的实时监测;在石油类碳氢化合物检测领域,毕卫红^[6]等利用 LPFG 检测了乙醇汽油、乙醇柴油等成品油中乙醇的含量;FALATE R^[7]等利用 LPFG 检测了空气中丁烷和丙烷的混合物及水环境中烃类物质.除此之外,张斌^[8]、胡兴柳^[9]等多位学者将 LPFG 用于液体浓度检测领域,分别实现了 NaClO₃ 饱和点的测量和溶液折射率的在线实时检测.然而,目前采用 LPFG 检测混合油中柴油含量的报道很少.

本文以耦合模理论为依据分析了 LPFG 的折射率传感特性,并将其用于柴油煤油混合油中柴油含量的检测,实验验证了 LPFG 检测柴油含量的可行性.

1 测量原理

光在 LPFG 中传播时,由于纤芯的不均匀性,会发生振幅或相位的扰动,其中特定波长的光被耦合到包层中消散掉,无后向反射光^[10-11].特定波长表示为^[12]

$$\lambda = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}}) \Lambda \quad (1)$$

式中, λ 为 LPFG 中心波长; $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 表示纤芯基模有效折射率; $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 表示一阶 m 次包层模的有效折射率. $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 由 LPFG 的纤芯半径 a_1 、纤芯折射率 n_1 和包层折射率 n_2 确定, $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 由纤芯和包层的半径 a_1 、 a_2 以及纤芯、包层和外界环境的折射率 n_1 、 n_2 和 n_3 确定, Λ 为 LPFG 的周期.参量 a_1 、 a_2 、 n_1 、 n_2 、 Λ 保持不变,式(1)中 λ 仅由外界环境折射率 n_3 决定.当待测油品中柴油含量变化,使得 n_3 变为 n'_3 时,得到 LPFG 中心波长漂移量和外界环境折射率的关系表达式为^[13]

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_0 = \frac{U_{\infty}^2 \Lambda}{n_2 a_2^3 k^3} \left(\frac{1}{\sqrt{n_2^2 - n_3^2}} - \frac{1}{\sqrt{n_2^2 - n_3'^2}} \right) \quad (2)$$

式中, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, U_{∞}^2 为 0 阶第一类贝塞尔函数 J_0 的 m 阶根.

取周期 $\Lambda = 440 \mu\text{m}$, 中心波长 $\lambda = 1560 \text{ nm}$, 纤芯半径 $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$, 包层半径 $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$, 纤芯折射率 $n_1 = 1.4606$, 包层折射率 $n_2 = 1.455$ 的长周期光栅,在初始外界环境为空气($n_3 = 1$)时,根据式(2)仿真光栅中心波长漂移大小与外界折射率 n'_3 的关系如图 1.

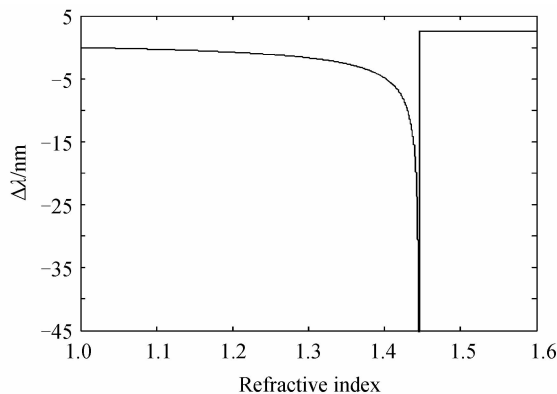


图 1 光栅中心波长漂移大小与外界折射率的关系

Fig. 1 Relationship between resonance wavelength shift and surrounding refractive index

由式(2)、图1可知,外界环境折射率 $n'_3 < n_2$ 时,随着 n'_3 增大,LPFG 中心波长非线性地向短波长方向漂移(蓝移),当 n'_3 越与包层折射率相近时中心波长漂移急剧增加;当 n'_3 与包层折射率 n_2 相等时,中心波长漂移最大。

一旦 $n'_3 > n_2$,LPFG 中不存在离散的包层模,转为纤芯基模到辐射模的耦合^[14-15]。其耦合关系可由耦合方程^[16-17]表示为

$$\frac{dA_{co}}{dz} = j\delta_{co-co}A_{co} + j \int k_{co-ra}^{\xi} \exp(-2j\delta_{co-ra}^{\xi} z) A_{\xi}(\beta_{\xi}/\xi) d\beta_{\xi} \quad (3)$$

$$\frac{dA_{\xi}}{dz} = jk_{co-ra}^{\xi} \exp(j\delta_{co-ra}^{\xi} z) A_{co} \quad (4)$$

式中, A_{co} 为基模的慢变振幅, A_{ξ} 为辐射模慢变振幅, δ_{co-co} 是基模自耦合系数,对应于基模传输常量的增量, k_{co-ra}^{ξ} 表示基模到辐射模 $LP_{0\xi}$ 的耦合系数, δ_{co-ra}^{ξ} 表示相位失配因子,其中 k_{co-ra}^{ξ} 和 δ_{co-ra}^{ξ} 分别表示为^[17]

$$k_{co-ra}^{\xi} = \frac{\omega}{2} \epsilon_0 n_1 \Delta n \iint_{core} l_{yco} l_{y\xi} dr d\varphi \quad (5)$$

$$\delta_{co-ra}^{\xi} = \beta_{co} - \beta_{\xi} - \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (6)$$

式中 ω 表示光频, ϵ_0 表示真空介电常量, Δn 表示光栅纤芯折射率平均增量, l_{yco} , $l_{y\xi}$ 分别表示弱导近似条件下的基模和辐射模的横向电场(线偏振), β_{co} 是基模的传输常量。

式(3)和式(4)含有复杂积分项,很难直接求解,利用数值积分将辐射模积分化为离散求和的形式,离散结果为^[17]

$$\frac{dA_{co}}{dz} = j\sigma_{co-co}A_{co} + j \sum_{i=1}^n C_i k_{co-ra}^{\xi_i} \exp(-2j\delta_{co-ra}^{\xi_i} z) A_i(\beta_{\xi_i}/\xi_i) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{dA_{\xi_i}}{dz} \right] = \sum_{i=1}^n [j k_{co-ra}^{\xi_i} \exp(2j\delta_{co-ra}^{\xi_i} z) A_{ca}] \quad (8)$$

基于以上辐射模理论模型,计算上述相同参量的 LPFG 的辐射模的耦合,得到 LPFG 在不同折射率时的透射谱,如图2。光栅透射损耗与外界折射率的关系如图3。

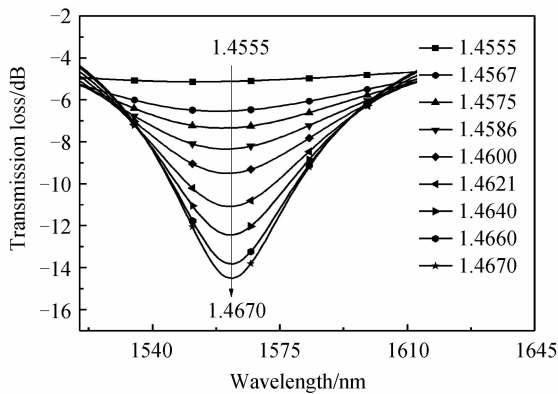


图2 外界折射率大于包层折射率的光栅透射谱
Fig.2 The transmission spectrum of the LPFG with the external refractive index greater than the cladding index

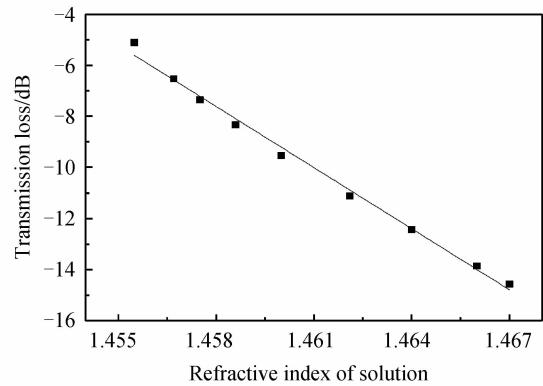


图3 透射损耗与外界折射率的关系
Fig.3 The relationship between transmission loss and external refractive index

由图2、图3可知,在外界折射率 $n'_3 > n_2$ 时,LPFG 中心波长重新回到原来位置,只是透射谱形状发生了变化,峰值损耗变小,带宽增大,随着 n'_3 的增大,峰值损耗增大,透射光谱越来越接近光栅原始光谱。这是因为,当 n'_3 较高时,光栅波导中传播常量近似解与 n'_3 无关,光栅中心波长近似不变,光栅中形成了类似于包层模的漏泄模式(Leaky mode),并且 n'_3 越大,从基模到漏泄模式的耦合越强,峰值损耗越大。

当柴油煤油混合油中柴油含量变化时,油品折射率发生改变,即 n'_3 发生变化,由图1和图2可知,这将引起 LPFG 透射谱变化,中心波长发生漂移或峰值损耗发生改变,通过检测中心波长的漂移量或中心波长处的峰值损耗,可以得到混合油中柴油含量。

2 实验与结果分析

实验原理如图 4. 实验中使用工作波长范围为 1 520~1 610 nm 的放大自辐射 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) 宽带光源. 长周期光栅中心波长为 1 560 nm, 周期为 440 μm . 将光栅两端粘贴在玻璃片上加以封装, 使光栅悬空与混合油充分接触, 实验过程中保持环境温度为 25 $^{\circ}\text{C}$, 使用 AQ6375 型光谱仪检测光栅输出光谱.



图 4 实验原理图

Fig. 4 The experimental principle block diagram

2.1 油品成分及其折射率的关系

实验室室温环境下, 按照 0 号柴油 (中国石油天然气股份有限公司) 和普通煤油 (恒信石油化工股份有限公司) 体积比为 1 : 10、2 : 10、...、7 : 10、8 : 10、9 : 10、10 : 10、10 : 9、...、10 : 1、10 : 0 配制 20 组柴油煤油混合油, 对应油中的柴油含量范围 ($V_{\text{柴}}/V_{\text{总}}$) 为 9.10%~100%. 使用阿贝折射率仪测量混合油的折射率, 其中前 8 组溶液折射率为 1.447 8~1.454 4, 都小于 LPFG 包层折射率; 后 12 组溶液折射率为 1.455 5~1.469, 均大于 LPFG 包层折射率. 因此, 得到的柴油含量与油品折射率关系如图 5.

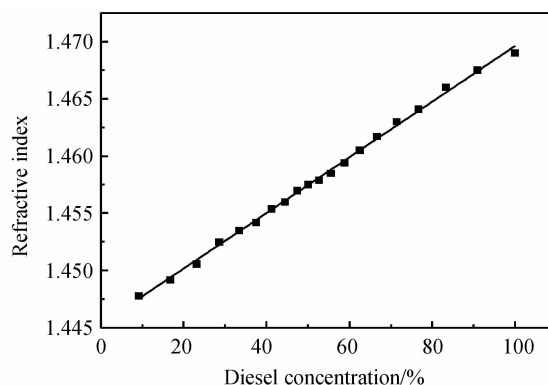


图 5 柴油含量与油品折射率的关系

Fig. 5 The relationship between the content of diesel and the refractive index of mixed oil

由图 5 可知, 随着柴油煤油混合油品中柴油含量的增大, 油品折射率线性增大. 由于 LPFG 具有较强的折射率敏感特性, 混合油品中柴油含量的变化极易引起光栅传输谱的变化, 因此 LPFG 可用来检测混合油中柴油的含量.

2.2 柴油含量检测实验

将封装好的长周期光栅置于不同混合油品中, 两端分别与光源、光谱仪相连, 测得折射率小于 LPFG 包层折射率的混合油的传输光谱如图 6. 从图 6 可以看出, 在混合油折射率小于 LPFG 包层的折射率时, 柴油含量增加, 即混合油折射率增大, LPFG 中心波长蓝移. 这是因为折射率的增加使得 LPFG 包层有效折射率增大, 而纤芯折射率不变, 结果纤芯与包层的有效折射率差变小, 由式 (2) 可知传输光谱向短波方向漂移.

进一步分析, 可以得到柴油含量与光栅透射谱中心波长变化的关系如图 7. 由图 7 可知, 柴油含量检测的实验结果与图 2 外界环境折射率小于包层折射率光栅中心波长漂移的理论分析结果一致, 即当油品折射率小于 LPFG 包层折射率时, 随着柴油含量增大, 光栅的中心波长向短波长方向漂移, 混合油折射率越接近 LPFG 包层折射率, 其光谱漂移量越大. 柴油含量每改变 1%, 中心波长平均漂移 0.622 7 nm.

利用上述实验方法, 检测折射率大于 LPFG 包层折射率的混合油的光栅透射谱, 得到的光栅传输谱如图 8.

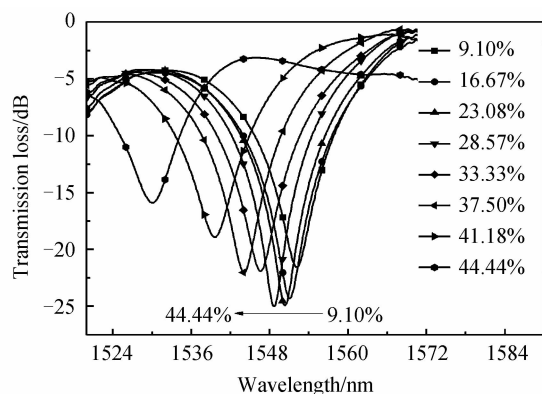


图6 柴油含量低的混合油的透射谱

Fig. 6 The transmission spectrum of mixed oil with less diesel oil

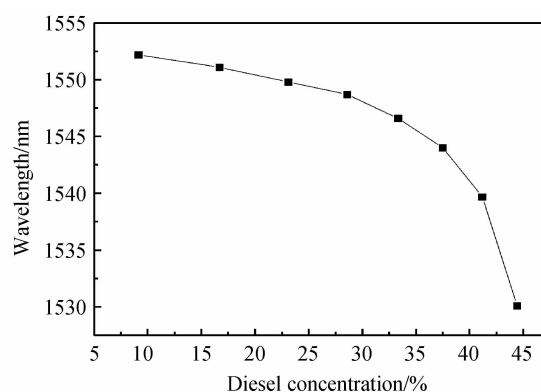


图7 柴油含量低的混合油品的实验结果

Fig. 7 The result of mixed oil with the less diesel oil

从图8可以看出,当混合油折射率大于LPFG包层折射率时,中心波长回到原波长位置,且随着混合油折射率增加,光栅透射谱损耗增大.这是因为外界油折射率大于LPFG包层的折射率时,LPFG包层的有效折射率发生了显著变化,逐渐改变纤芯与包层之间的全反射条件,导致纤芯基模与辐射模的耦合增大,使得透射谱峰值损耗增大.对以上实验结果进一步分析,得到后12组混合油中柴油含量与透射损耗的关系如图9.

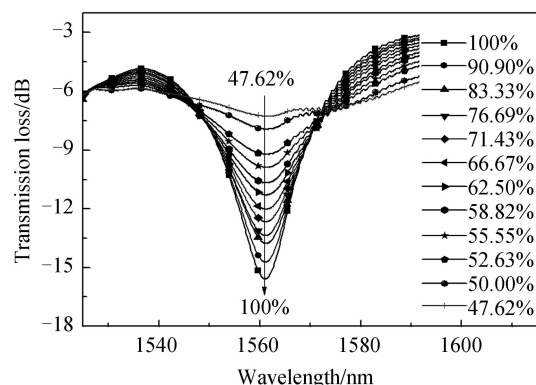


图8 柴油含量高的混合油的透射谱

Fig. 8 The transmission spectrum of mixed oil with more diesel oil

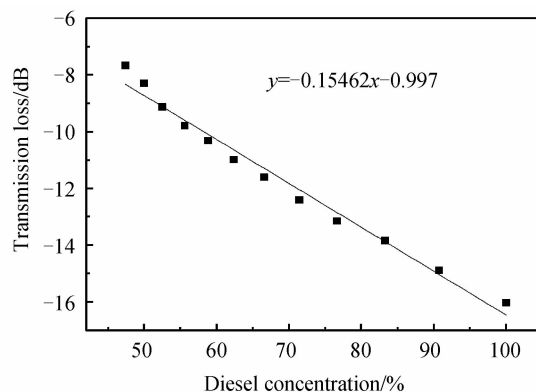


图9 柴油含量高的混合油品的实验结果

Fig. 9 The result of mixed oil with the more diesel oil

由图9可得,在混合油折射率大于LPFG包层折射率时,光栅透射谱峰值损耗随柴油含量增大而线性增大,实验结果与理论分析结果基本一致,灵敏度为0.1546 dB/%.因此可以通过光栅中心波长的漂移和透射谱峰值损耗检测混合油品中柴油含量.

实际应用中,温度对长周期光栅的影响不容忽视.外界温度升高时,LPFG中心波长随着温度升高向长波长方向线性漂移,温度降低时光栅中心波长随温度线性蓝移,升、降温过程中光栅透射谱峰值损耗基本保持不变^[18].因此,可以通过串联一个不同中心波长的参考长周期光栅,实现折射率和温度两个参量的分别测量,以解决温度交叉敏感的问题^[19].折射率和温度分别测量传感器的双参量矩阵为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 分别表示传感光栅和参考光栅的波长漂移量; A 、 B 表示参考光栅的折射率和温度灵敏度, C 、 D 表示测量点的折射率与温度灵敏度; Δn 和 ΔT 分别为外界环境折射率与温度的变化量.通过测量参考光栅的中心波长与测量点的波长漂移量,可得到传感光栅的波长与温度的变化量,实现折射率和温度两个参量的分别测量.

3 结论

本文基于耦合模理论研究了LPFG折射率传感特性,得到了LPFG透射谱与外界环境折射率的关系.

利用 LPFG 的折射率敏感特性检测混合油中柴油含量,得到柴油含量与 LPFG 中心波长漂移量、透射谱峰值损耗的关系.结果表明,当混合油折射率小于包层折射率时,随着柴油含量增加,光栅中心波长非线性蓝移,而且当混合油折射率越接近包层折射率时,中心波长漂移急剧增加,且柴油含量每改变 1%,中心波长平均漂移 0.622 7 nm;当柴油含量使混合油折射率大于包层折射率时,随着柴油含量增加,中心波长基本不变,透射谱透射损耗随柴油含量增大线性增大,柴油含量每增加 1%,透射损耗平均增大 0.154 6 dB.因此,利用长周期光栅能够检测混合油中柴油的含量.

参考文献

- [1] COSTA R C, SODRE J R. Hydrous ethanol vs. gasoline-ethanol blend: engine performance and emissions[J]. *Fuel*, 2010, **89**(2): 287-293.
- [2] HSIEH W D, CHEN R H, WU T L, *et al.* Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol - gasoline blended fuels[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(3): 403-410.
- [3] SUN Wan-chen, DU Jia-liang, GUO Liang, *et al.* The effects of gasoline/diesel blend fuels on the combustion and ultra-fine particulate emission of a compression ignition engine. [J]. *Automotive Engineering*, 2015, **37**(10): 1117-1122.
孙万臣, 杜家坤, 郭亮, 等. 汽油/柴油混合燃料对压燃式发动机燃烧及超细微粒排放的影响[J]. *汽车工程*, 2015, **37**(10): 1117-1122.
- [4] LI Kun, LIANG Da-kai, ZENG Jie, *et al.* Research of morphing wings surface temperature measurement system based on long-period fiber grating [J]. *Optical Technique*. 2011, **37**(1): 7-10.
李堃, 梁大开, 曾捷, 等. 基于长周期光纤光栅的可变体机翼翼表温度测试系统研究 [J]. *光学技术*, 2011, **37**(1): 7-10.
- [5] ELSTER J L, TREGO A, CATTERALL C, *et al.* Flight demonstration of fiber optic sensors[C]. SPIE, 2003, **50**(50): 34-42.
- [6] BI Wei-hong, CHEN Lian-sheng, ZHANG Hao, *et al.* Theoretical and experimental analysis on ethanol content detection in oil by long period fiber grating[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, **25**(10): 1895-1899.
毕卫红, 陈连生, 张浩, 等. 基于长周期光纤光栅的成品油中乙醇含量检测[J]. *光电子 • 激光*, 2014, **25**(10): 1963-1967.
- [7] FALATE R, KAMIKAWACHI R C, MULLER M, *et al.* Fiber optic sensors for hydrocarbon detection[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, **105**(2): 430-436.
- [8] ZHANG Bin, ZHU Hao-tian, HE Ru-shuang, *et al.* Measurement of saturation point of aqueous solution based on long period michelson interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0906006
张斌, 朱昊天, 何如双, 等. 基于长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪的溶液饱和点测量[J]. *光子学报*, 2014, **43**(9): 0906006
- [9] HU Xing-liu, LIANG Da-kai, WANG Yan, *et al.* The temperature-insensitive package of long period fiber grating pair used in liquid detection[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, **24**(10): 1895-1899.
胡兴柳, 梁大开, 王彦, 等. 应用于液体检测的级联长周期光纤光栅的温度减敏封装结构[J]. *光电子 • 激光*, 2013, **24**(10): 1895-1899.
- [10] ZHANG Ling, MIAO Fei, SUI Qing-mei, *et al.* Solution concentration sensing characteristics of LPFG written by femtosecond laser pulses[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, **23**(5): 897-901.
张玲, 苗飞, 隋青美, 等. 飞秒写制长周期光纤光栅的液体浓度测量实验研究[J]. *光电子 • 激光*, 2012, **23**(5): 897-901.
- [11] ERDOGAN T. Fiber grating spectra[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1277-1294.
- [12] CHEN Hai-yun, PENG Bao-jin, SI Jian-xiao, *et al.* Film sensor based on long-period fiber grating with reduced cladding[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(1): 0106003.
陈海云, 彭保进, 斯剑霄, 等. 薄包层长周期光纤光栅薄膜传感器特性研究[J]. *光子学报*, 2016, **45**(1): 0106003.
- [13] JIN Qing-li, HUANG Xiao-hong, YAN Li-feng, *et al.* Optimization of long-period fiber grating for refractive-index sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1201-1204.
金清理, 黄晓虹, 颜利芬, 等. 长周期光纤光栅折射率传感器的结构优化[J]. *光子学报*, 2011, **40**(8): 1201-1204.
- [14] LIANG Hui, ZENG Qing-ke, QIN Zi-xiong, *et al.* Sensitive of long period fiber grating to refractive index[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(1): 111-114.
梁辉, 曾庆科, 秦子雄, 等. 长周期光纤光栅的折射率敏感特性[J]. *应用光学*, 2011, **32**(1): 111-114.
- [15] LEE B H, LIU Y, LEES B, *et al.* Displacements of the resonant peaks of a long-period fiber grating induced by a change of ambient refractive index[J]. *Optics Letters*, 1997, **22**(23): 1769-1771.
- [16] STEGALL D B, ERDOGAN T. Leaky cladding mode propagation in long-period fiber grating devices[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, **11**(3): 343-345.
- [17] TONG Zhi, TAO Feng, WEI Huai, *et al.* Numerical analysis of coupling from core mode to radiation mode in long period fiber gratings[J]. *Acta Electronic Sinica*, 2003, **31**(1): 89-91.
童治, 陶锋, 魏淮, 等. 长周期光纤光栅中基模到辐射模耦合的数值分析[J]. *电子学报*, 2003, **31**(1): 89-91.

- [18] GUAN Shou-hua, YU Qing-xu, SONG Shi-de, *et al.* Theoretical and experimental study on temperature characteristic of long period fibre grating[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(3): 543-545.
关寿华, 于清旭, 宋世德, 等. 长周期光纤光栅温度特性的理论与实验研究[J]. *传感技术学报*, 2007, **20**(3): 543-545.
- [19] LU Shao-hua, XU Ou, FENG Su-chun, *et al.* Refractive index sensors based on long period fibre gratings[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2008, **23**(4): 35-38.
鲁韶华, 许鸥, 冯素春, 等. 基于长周期光纤光栅的折射率传感器[J]. *光电技术应用*, 2008, **23**(4): 35-38.