

文章编号: 0253-2239(2006)02-0264-5

# 一种新型温度自补偿高灵敏度折射率计\*

饶云江<sup>1,2</sup> 莫秋菊<sup>1</sup> 朱 涛<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 重庆大学光电工程学院, 重庆 400030  
<sup>2</sup> 电子科技大学通信与信息工程学院, 成都 610015)

**摘要:** 基于高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的新型超长周期光纤光栅(ULPFG), 提出了一种可实现温度自补偿的新型高灵敏度折射率计。理论与实验表明, 新型超长周期光纤光栅不同闪耀阶次谐振峰对外界折射率与温度变化的灵敏度各自不同, 特别是, 该光栅存在对外界折变不敏感的谐振峰, 测量中除了可以利用该峰实现温度同时测量外, 还可以补偿另一个测量折变的谐振峰因温度变化带来的测量误差。该折射率计具有制作简单、成本低、强度高, 灵敏度高优点, 当外界折射率在 1.43~1.45 范围内变化时, 其折射率测量灵敏度可达每单位折射率 240 nm, 在实际工业应用中具有较大的潜在实用价值。

**关键词:** 导波与光纤光学; 光纤传感器; 折变测量; 超长周期光纤光栅; CO<sub>2</sub> 激光脉冲

中图分类号: TB1 文献标识码: A

## A Novel-High Sensitivity Refractive Index Sensor with Temperature Self-Compensating

Rao Yunjing<sup>1,2</sup> Mo Qiuju<sup>1</sup> Zhu Tao<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> College of Opto-Electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030  
<sup>2</sup> School of Communication and Information Engineering, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610015)

**Abstract:** Based on the novel ultra-long-period fiber grating (ULPFG) written by the high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses, a new high-sensitivity refractive index sensor with temperature self-compensating is proposed. The theoretical and experimental results show that different shining order resonant peaks of the ULPFG have different temperature and refractive index sensitivities. Especially, it is found that there appears one resonant peak of ULPFG insensitive to the refractive index, which offers the potential application for simultaneous temperature measurement and can compensate the measurement errors induced by temperature change when other resonant peaks are measured. This refractive index sensor is simple, with a low cost, good strength and high sensitivity, when the surrounding refractive index varies in the range of 1.43~1.45, the refractive index measurement has a sensitivity of 240 nm/per unit refractive index, which has great potentials in industry applications.

**Key words:** guided wave and fiber optics; optical fiber sensor; refractive index measurement; ultra long-period fiber grating; CO<sub>2</sub> laser pulse

## 1 引 言

液体折射率测量在工业中有着广泛的应用, 其测量方法有很多种, 从最成熟的阿贝测量仪到光纤光栅测量法<sup>[1]</sup>, 都是朝着更实用、更简单、更灵敏、更强的环境适应能力等方向发展。因此如何在恶劣的

环境下实现折射率测量并能避免其它参量干扰的测量方法便成为人们研究的一个重要方向, 比如液体温度的变化对液体折射率测量的交叉影响等。显然阿贝测量仪不能在恶劣的环境下使用, 并且其成本非常高; 光纤光栅测量法的提出, 为解决在恶劣环境

\* 教育部重点基金(104210)和重庆市自然科学基金(8415)资助课题。

作者简介: 饶云江(1962~), 男, 云南宝山人, 重庆大学和电子科技大学教授, 主要从事光纤通信及传感方面的研究。

E-mail: yjrao@cqu.edu.cn

收稿日期: 2005-04-19; 收到修改稿日期: 2005-07-21

下使用提供了出路,但单纯使用普通周期的光纤光栅测量<sup>[2]</sup>并不能解决温度串扰的问题。近年来关于解决折射率测量过程中的温度串扰问题有不少报道,但用光纤光栅的弯曲特性来补偿温度串扰的方法<sup>[3]</sup>实现起来较为复杂,用紫外光写入法在双包层光纤中写入级联光栅的方法<sup>[4]</sup>成本较高。为解决上述问题,本文提出了一种基于高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的新型超长周期光纤光栅(ULPFG)<sup>[5]</sup>的新型简单的折射率计。该折射率计不仅能解决折射率测量中的温度串扰问题,而且具有制作简单,成本低,强度高,灵敏度高的优点。

## 2 理论分析

普通长周期光纤光栅(LPFG)<sup>[6~8]</sup>的周期范围一般在几十到几百微米之间,而超长周期光纤光栅其周期可达数毫米,由于超长周期光纤光栅的周期往往是普通长周期光纤光栅周期的几倍甚至十几倍,较之普通的长周期光纤光栅,超长周期光纤光栅中出现了前向高阶闪耀模与纤芯基模所耦合的谐振峰,根据耦合模理论,若不考虑纤芯与包层折射率改变对光栅谐振波长的影响,用有效折射率来表示高阶模的相对相位匹配条件为

$$\lambda_D^{N,m} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m})\Delta/N, \quad (1)$$

其中  $\lambda_D^{N,m}$  为光栅谐振峰波长,  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  与  $n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$  分别表示纤芯基模及  $N$  阶闪耀模  $m$  次包层模的有效折射率,  $\Delta$  为光栅周期,  $N$  表示闪耀模阶数。当  $N > 1$  时,所对应的模式称为高阶闪耀模。对于普通周期的长周期光纤光栅,  $N = 1$ ; 而对于超长周期光纤光栅则是  $N \geq 1$ 。由(1)式可看出:光栅的谐振波长  $\lambda_D^{N,m}$  是与闪耀模阶数  $N$  成反比的。

图1为用高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲在普通光纤(康宁 SMF-28)中写入周期为 3 mm 的超长周期光纤光栅

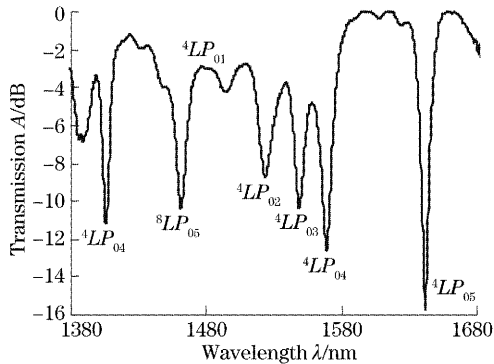


图1 光栅谱图

Fig. 1 Spectra of ultra long-period fiber grating (ULPFG)

的透射谱。图中  ${}^N\text{LP}_{0m}$  表示  $N$  阶闪耀模  $m$  次包层模与纤芯基模同向耦合的谐振峰。考虑纤芯与包层折射率改变对光栅谐振波长的影响,并忽略光纤材料色散的影响<sup>[9]</sup>,新型超长周期光纤光栅的相位匹配条件可写为

$$\lambda_{\text{res}}^{N,m} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}) \frac{\Delta}{N} \times \left[ 1 + \frac{(\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}) d\lambda_D^{N,m}/d\Delta}{(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m})^2} \right], \quad (2)$$

其中  $\lambda_{\text{res}}^{N,m}$  为谐振波长。由(2)式可以看出:在基模与  $N$  阶闪耀模  $m$  次包层模有效折射率差改变很小的情况下,谐振峰波长  $\lambda_D^{N,m}$  将主要取决于  $\Delta$  与  $N$ 。由于高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的超长周期光纤光栅其折射率改变主要发生在光纤包层,而不是在纤芯,所以较紫外光法写入的超长周期光纤光栅,  $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$  将占主要地位,所以光栅的谐振峰更容易受到外界环境如温度、弯曲、扭曲及折射率变化的影响。由(2)式,再结合玻璃的热学性质,可求出超长周期光纤光栅的温度特性表达式:

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}^{N,m}}{dT} = \lambda_{\text{res}}^{N,m} \cdot N \times \frac{(d\lambda_{\text{res}}^{N,m}/d\Delta)(\alpha + \xi_{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \xi_{\text{cl}} n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m})}{(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m})^2}, \quad (3)$$

其中  $\alpha$  是光纤的热膨胀系数,  $\xi_{\text{co}}$  和  $\xi_{\text{cl}}$  是纤芯及包层的热光系数,由(3)式可以看出,由于超长周期光纤光栅谐振峰的  $N$  要比普通长周期光纤光栅的  $N$  ( $N = 1$ ) 大,所以超长周期光纤光栅高阶闪耀膜谐振峰的灵敏度要比普通长周期光纤光栅温度灵敏度高,另外,由于不同阶数闪耀模  $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$  不同,所以不同阶次谐振峰温度灵敏度也会不同。

超长周期光纤光栅的外界折射率特性可由下式表示<sup>[10]</sup>:

$$\frac{d\lambda}{dn_e} = \frac{d\lambda}{dn_{\text{eff}}^{N,m,\text{cl}}} \cdot \frac{dn_{\text{eff}}^{N,m,\text{cl}}}{dn_e} = -\frac{\Delta}{N} \frac{dn_{\text{eff}}^{N,m,\text{cl}}(n_{\text{cl}}, n_e)}{dn_e}, \quad (4)$$

其中  $n_e$  与  $n_{\text{cl}}$  分别是外界与光纤包层折射率。由(4)式可看出,新型超长周期光纤光栅的折射率特性主要取决于谐振峰的闪耀模阶数及包层模次数,折射率灵敏度与  $N$  成反比。

试验中,假设所选择作传感的两个谐振峰漂移分别为  $\Delta\lambda_1$  与  $\Delta\lambda_2$ , 它们的温度灵敏度分别是  $\xi_1$  与  $\xi_2$ , 外界折射率灵敏度分别是  $\sigma_1$  与  $\sigma_2$ , 外界折射率与温度变化分别为  $\Delta n$  与  $\Delta T$ , 则它们之间的关系可用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = [\Delta n \quad \Delta T] \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_2 \\ \xi_1 & \xi_2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

求解(5)式,可得经温度补偿后的外界折射率变化公式为

$$\Delta n = \frac{\Delta\lambda_1 \xi_2 - \Delta\lambda_2 \xi_1}{\sigma_1 \xi_2 - \sigma_2 \xi_1}. \quad (6)$$

### 3 实验及结果

实验分别研究了新型超长周期光纤光栅两个波长相差较远的谐振峰的温度特性与折射率特性。实验装置如图2所示,包括温度实验装置图及折射率实验装置图。所研究的两个谐振峰分别为图1中所示的 $^8LP_{04}$ 和 $^4LP_{05}$ 谐振峰,它们的谐振波长分别是1406 nm和1642 nm(以下对两谐振峰简称1406 nm峰和1642 nm峰)。

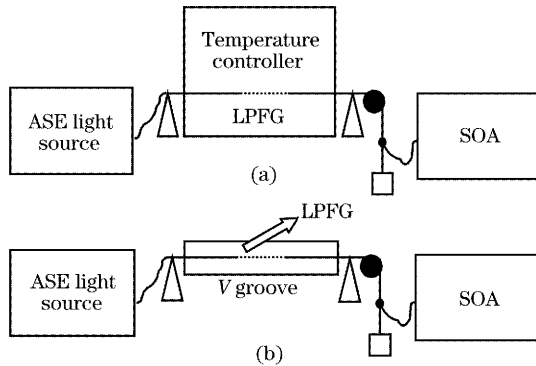


图2 实验装置图。(a)温度实验,(b)折射率实验  
Fig. 2 Experimental setup. (a) Temperature experiment, (b) refractive index experiment

首先研究其温度特性,用宽带放大自发辐射(ASE)光源作输入,将写好的超长周期光纤光栅绷直,放入温度控制器(SDJ402)中,光栅表面不作任何处理,直接将光栅一端固定好,一端悬挂与制作光栅时所悬挂重物质量相同的重物,悬挂重物的目的是为了保证在试验过程中光栅始终是绷直的,但重物的重量应尽量保证光栅内部不产生拉应力。使温度从20℃升至100℃,用光谱分析仪(SOA, ADVANTESTQ8384)观察超长周期光纤光栅谐振峰的波长及幅值变化情况,并记录下数据,最后分析得出超长周期光纤光栅其1406 nm和1642 nm谐振峰波长及幅值改变随温度变化的关系,如图3所示。由图3可见,超长周期光纤光栅两谐振峰波长均随温度升高而向长波方向线性漂移,但两谐振峰的温度灵敏度不同,1642 nm峰的温度灵敏度为0.08 nm/℃,而1406 nm峰的温度灵敏度为

0.04 nm/℃。

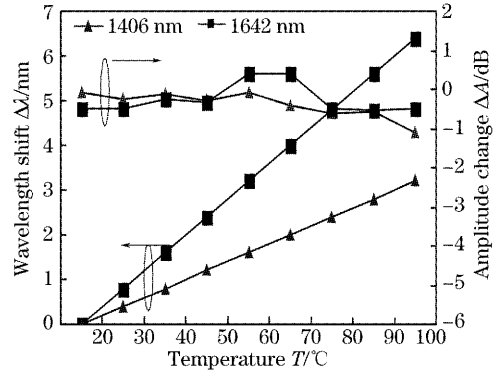


图3 温度变化对超长周期光纤光栅谐振峰的影响  
Fig. 3 Effect of temperature change on the ultra long-period fiber grating (ULPFG) resonant peaks

再对新型超长周期光纤光栅的折射率特性作研究,实验用的光栅为温度实验中用过的光栅,将光栅绷直,表面不作任何处理,光栅一端固定好,一端悬挂与制作光栅时所悬挂重物质量相同的重物,悬挂重物的目的与温度试验悬挂重物的目的相同。将光栅分别浸入装有不同浓度的糖水溶液与甘油水溶液的V形槽中,不同浓度的糖水溶液是用50 ml的纯净水分别溶入20 g、40 g、60 g、80 g及100 g糖配成的,糖的溶解度大约为200 g/l,所以100 g糖溶在50 ml水中已达到饱和,此时糖溶液的浓度从0%变化到66.6%的饱和溶液,其折射率变化范围大约是1.33~1.45。不同浓度的甘油水溶液是由纯净水分别与甘油按体积1:4、2:3、3:2、4:1混合,及纯净甘油构成的。甘油水溶液的体积浓度从0%变化到100%,其折射率变化范围大约是1.33~1.47。溶液的折射率与其浓度大致是成线性关系的,用插值的方法可大概估计出所配的糖水溶液及甘油水溶液的折射率,最后用光谱分析仪(SOA, ADVANTESTQ8384)观察光栅谐振峰的变化情况。试验中所使用的超长周期光纤光栅其包层折射率大约为1.46。实验分别记下光栅在空气、纯净水、各浓度的糖水及甘油水溶液中的光谱,如图4和图5所示。可以看出,在从空气到饱和糖水溶液中,1406 nm峰波长几乎没有漂移,幅值也没有改变。而1642 nm峰的中心波长却随着糖水浓度的改变即外界折射率的改变而灵敏地发生漂移,在从纯净水到饱和糖水溶液中,即在1.33~1.45的折射率变化范围内,其波长漂移量约为9 nm,而且在越靠近包层折射率的地方其漂移量越大,而其幅值却基本没有改变。

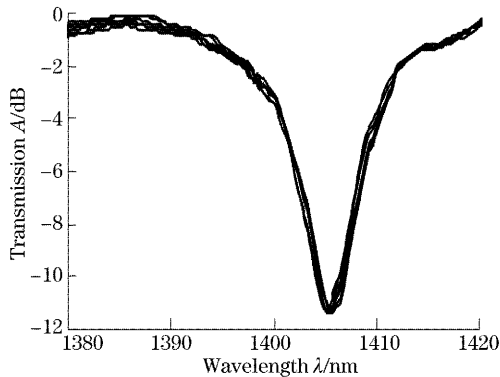


图 4 不同浓度糖水溶液中 1406 nm 峰谱图

Fig. 4 Spectra of 1406 nm resonance in sugar solutions with different concentrations

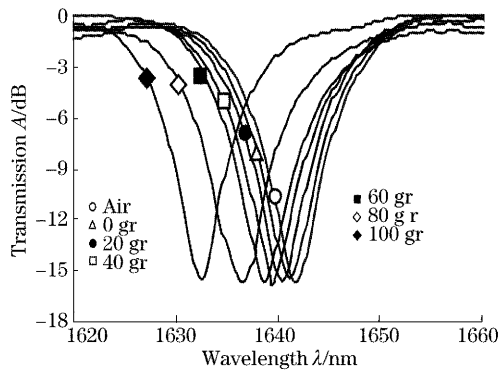


图 5 不同浓度糖水溶液中 1642 nm 峰谱图

Fig. 5 Spectra of 1642 nm resonance in sugar solutions with different concentrations

再用甘油水溶液作实验,得出的结果与蔗糖水溶液中的结果相似,但有一点不同的是,由于试验中所用的纯净甘油的折射率大约为 1.47,大于实验中光栅包层的折射率(1.46),所以,当将光栅浸入折射率约为 1.47 的纯净甘油中时,其波长与幅值均发生很大的改变,所以此折射率计只适用于测量小于光栅包层折射率值的折射率。

总结糖水溶液与甘油水溶液折射率实验的数据可得出:在 1.33~1.45 折射率范围内,1406 nm 与 1642 nm 两谐振峰的幅值都没有发生改变,其波长漂移与外界折射率变化的关系如图 6、图 7 所示。由图 6 可看出:在 1.33~1.45 折射率范围内,1406 nm 谐振峰的波长几乎没有发生漂移。而在图 7 中,由于在整个 1.33~1.45 折射率范围内,1642 nm 谐振峰波长漂移与折射率变化的关系不是线性的,所以分别用了三段直线来拟合不同折射率段的波长漂移情况,由图 7 可看出,当外界折射率越靠近光栅包层折射率时,1642 nm 谐振峰漂移得越快,其测量灵敏度也越高,在 1.43~1.45 折射率范围内,其灵敏度达

到了每单位折射率 240 nm。

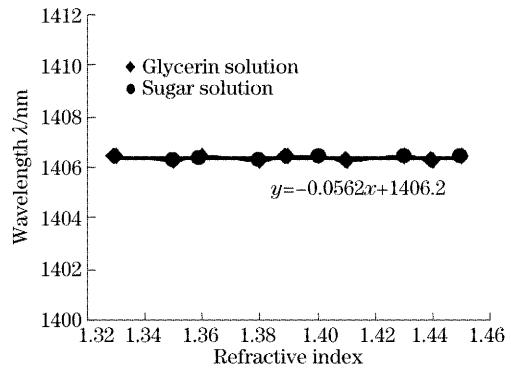


图 6 1406 nm 峰漂移及折射率关系图

Fig. 6 Relationship between wavelength shift and refractive index of 1406 nm resonance

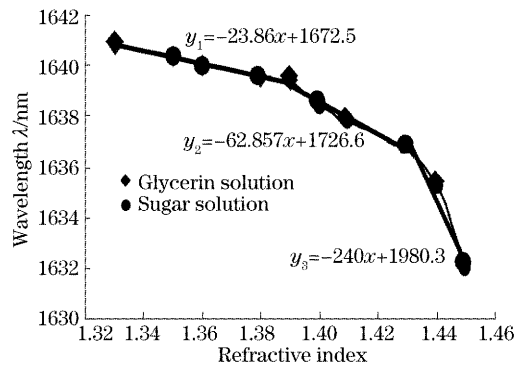


图 7 1642 nm 峰漂移及折射率关系图

Fig. 7 Relationship between wavelength drift and refractive index of 1642 nm resonance

综合以上实验可知,新型超长周期光纤光栅各个谐振峰的温度灵敏度及折射率灵敏度不同,特别的,折射率灵敏度存在有的谐振峰很灵敏,有的谐振峰却极不灵敏的现象,这种特性就为光纤光栅折射率测量同时进行温度自补偿提供了应用基础。实际应用中,可以利用高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的新型超长周期光纤光栅,其中一个对外界折变敏感的谐振峰来实现液体折射率的测量,而用另外一个对外界折变不敏感的谐振峰进行温度测量,再根据作温度测量谐振峰的温度特性来补偿折变测量的误差。这种测量方法在工业应用中具有较大的潜在应用价值。

## 4 结 论

这种基于高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的新型超长周期光纤光栅外界折射率特性的折射率计与基于布拉格光纤光栅或常规周期长周期光纤光栅的折射率计相比,其优点在于它不仅能灵敏地测量折射率或浓度的变化,还可以在在一根光栅上同时补偿温度变

化对光纤光栅折射率测量的影响,而与其他温度自补偿动折射率测量方法相比,该折射率计制作简单、成本低,只需在普通单模光纤上制作单根光栅即可,且其强度好、灵敏度也很高,在 1.43~1.45 折射率范围内,其灵敏度达到了每单位折射率 240 nm。

### 参 考 文 献

- 1 A. Ladicicco, A. Cusano, G. V. Persiano *et al.*. Refractive index measurements by fiber Bragg grating sensor[C]. *Proc. IEEE*, 2003, **1**(22~24): 51~62
- 2 Joo Hin Chong, Ping Shum, H. Haryono *et al.*. Measurements of refractive index sensitivity using long - period grating refractometer[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**(1~6): 65~69
- 3 Mei Nar Ng, Zhihao Chen, Kin Seng Chiang. Temperature compensation of long-period fiber grating for refractive-index sensing with bending effect[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(3): 361~362
- 4 B. A. L. Gwandn, X. Shu, T. D. P. Allsop *et al.*. Simultaneous refractive index and temperature measurement using cascaded long-period grating in double-cladding fibre[J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(14): 695~696
- 5 Xuewen Shu, Lin Zhang, Ian Bennion. Fabrication and characterisation of ultra-long-period fibre gratings [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **203**(3~6): 277~281
- 6 Gao Kan, Fang Zujie. Method of measuring the waveguide dispersion factor and the thermo-optic coefficient of effective refractive index of long period fiber gratings [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(4): 553~556 (in Chinese)  
高 侃,方祖捷. 长周期光纤光栅波导色散因子和有效折射率热光系数的测量[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 553~556
- 7 Zheng Kai, Pei Li, Jian Shuisheng. Research on the characteristics of long-period fiber grating ultraviolet-written by amplitude mask[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 902~906 (in Chinese)  
郑 凯,裴 丽,简水生. 振幅掩膜紫外写入的长周期光纤光栅特性研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 902~906
- 8 Liu Yumin, Yu Chongyuan, Zhang Jiangzhong *et al.*. Optimization design of flat-band long-period grating[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(4): 200~202
- 9 V. Grubsky, A. Skorucak, D. S. Starodubov *et al.*. Fabrication of long-period fiber gratings with no harmonics [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1): 87~89
- 10 V. Bhatia. Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing[J]. *Opt. Exp.*, 1999, **4**(11): 457~466