

doi:10.3788/gzxb20184701.0106001

基于少模光纤长周期光栅叠栅的折射率传感特性

刘强, 毕卫红, 付兴虎, 薛艳茹, 付广伟, 金娃

(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)

摘 要: 为了克服折射率测量过程中温度交叉敏感的影响, 提出并制备了一种少模光纤长周期光栅传感器. 该传感器利用 CO₂ 激光器在少模光纤上先写入周期为 654 μm 、长度为 30 mm 的长周期光栅, 然后用旋转平台将光纤旋转 180°, 再写入相同长度周期为 819 μm 的长周期光栅制作而成, 其传输光谱在 1 487.2 nm 和 1 533.0 nm 处出现两个由不同模式耦合形成的谐振峰, 通过监测两个谐振峰差值的变化减少温度串扰, 实现折射率的测量. 实验结果表明: 两个谐振峰差值在折射率 1.333 3~1.376 6 范围内的灵敏度为 143 nm/RIU, 在温度 20~70 °C 范围内的灵敏度为 -0.002 5 nm/°C, 温度灵敏度远低于折射率灵敏度, 具有对温度不敏感的特性. 与传统光纤传感器相比, 该传感器具有温度干扰小, 折射率灵敏度高等优势, 并且尺寸较小、结构紧凑, 可在工业、水利、医学等领域广泛应用.

关键词: 少模光纤; 长周期光纤光栅; 折射率传感; 温度; 交叉敏感

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)01-0106001-7

Refractive Index Sensing Characteristic of Superimposed Long Period Gratings on Few Mode Fiber

LIU Qiang, BI Wei-hong, FU Xing-hu, XUE Yan-ru, FU Guang-wei, JIN Wa

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

Abstract: In order to avoid the temperature cross-sensitivity during refractive index measurement, a sensor based on a superimposed long period gratings fabricated in few mode fiber was proposed. The superimposed long period grating was inscribed under the CO₂ laser irradiation as following: first, a long period fiber grating with a period of 654 μm and length of 30 mm was inscribed, then the few mode fiber was rotated 180° to inscribe second long period fiber grating with a period of 819 μm and the same length. Two resonance dips at 1 487.2 nm and 1 533.0 nm appeared in the transmission spectrum, which were formed by coupling between different guided modes. The difference of two resonance dips increases with the refractive index while is constant with temperature increase, which can eliminate temperature cross-sensitivity during refractive index measurement. The experimental results show the temperature sensitivity of the sensor is -0.002 5 nm/°C in 20~70 °C temperature range and the refractive index sensitivity of 143 nm/RIU in 1.333 3~1.376 6 refractive index range. The temperature sensitivity of the sensor is much lower than the refractive index sensitivity, which means that it is insensitive to temperature. Compared with traditional optical fiber sensors, the sensor has the advantages of small temperature cross-sensitivity, high refractive index sensitivity, small size and compact structure, and it can be widely used in industry, water conservancy, medicine and other fields.

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos.61475133, 61575170, 61675176, 61605168, 61640408), 河北省应用基础研究计划重点基础研究项目 (No.16961701D), 河北省自然科学基金 (No.F2016203392), 河北省高等学校科学技术研究基金 (No.QN2016078), 秦皇岛科学技术项目 (No.201601B050), 燕山大学校内博士基金 (No.B1011)

第一作者: 刘强 (1981-), 男, 副研究员, 博士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: ysu2006@ysu.edu.cn

导师 (通讯作者): 毕卫红 (1960-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: whbi@ysu.edu.cn

收稿日期: 2017-07-28; **录用日期:** 2017-10-10

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

Key words: Few mode fiber; Long period fiber grating; Refractive index sensing; Temperature; Cross-sensitive

OCIS Codes: 060.2370; 050.2770; 060.2310; 060.2300

0 引言

光纤传感器相比传统传感器具有体积小、抗电磁干扰、结构简单、成本较低等优点,能对各种环境参数进行测量.近年来,折射率传感器在工业、医学、生物等领域受到广泛关注,其主要有长周期光栅结构^[1-2]、微纳布拉格光栅结构^[3-4]、侧边抛磨结构^[5-6]、马赫-曾德结构^[7-8]、法布里-珀罗结构^[9-10]等.这些结构都存在温度和折射率交叉敏感的问题,限制了其在折射率测量方面的应用.为了避免温度对折射率测量的影响,王婷婷等^[11]提出了基于微椭球形法布里-珀罗结构传感器,折射率灵敏度为 37.1 nm/RIU,温度灵敏度为 0.001 6 nm/°C,但传感器制作复杂、折射率灵敏度低.张信普等^[12]提出长周期光栅与马赫-曾德干涉仪级联的传感器,折射率灵敏度为 183.44 nm/RIU,温度灵敏度为 0.009 nm/°C,但存在级联结构传感尺寸大、温度灵敏度高的问题.苏耿华等^[13]利用保偏光纤和长周期光栅级联同时测量温度和折射率,利用传感矩阵解调后折射率和温度灵敏度分别为 15 nm/RIU、1.2 nm/°C,但系统复杂、解调困难、折射率灵敏度低.

少模光纤(Few Mode Fiber, FMF)是一种纤芯中能传输几种模式的新型特种光纤,具有模式限制能力强、传导模式数量少的特点.FMF 除用于通信领域外,还可用于光纤传感器件与激光器的制作,具有巨大的应用优势.

本文提出一种基于叠栅结构的少模光纤传感器,利用 CO₂ 激光器在 FMF 同一位置上刻制两个不同周期的长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG),其传输光谱中出现两个不同模式耦合形成的谐振峰,理论和实验分析传感器对外界折射率和温度的响应特性,通过观测两个谐振峰差值的变化,避免折射率测量过程中温度交叉敏感的问题.该传感器集成度高、尺寸较小、解调简单.

1 传感器工作原理

传感器结构如图 1,利用 CO₂ 激光器在 FMF 两侧写入不同周期的长周期光栅,使传感器透射光谱中出现两个不同模式耦合形成的谐振峰.

根据耦合模理论,LPFG 的相位匹配条件为^[14]

$$\lambda_{\text{res}} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{h}}) \Delta \quad (1)$$

式中, λ_{res} 为长周期光栅谐振波长, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 为纤芯基模有效折射率, $n_{\text{eff}}^{\text{h}}$ 为高阶模有效折射率, Δ 为光栅周期.

当环境温度变化时,由于热光效应和热膨胀效应,光纤各模式有效折射率和光栅周期发生改变,光栅谐振波长对温度灵敏度可表示为^[15]

$$K_T = \lambda_{\text{res}} \gamma (\alpha + \Gamma_{\text{temp}}) \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\frac{d\lambda_{\text{res}}}{d\Delta}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{h}}} \quad (3)$$

$$\Gamma_{\text{temp}} = \frac{\xi_{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \xi_{\text{h}} n_{\text{eff}}^{\text{h}}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{h}}} \quad (4)$$

式中, γ 为描述波导色散的系数, α 为热膨胀系数, $\xi_{\text{co}} = \frac{1}{n_{\text{eff}}^{\text{co}}} \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{dT}$ 、 $\xi_{\text{h}} = \frac{1}{n_{\text{eff}}^{\text{h}}} \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{h}}}{dT}$ 分别为基模和高阶模的热光系数.

当外界折射率发生变化时,会使光纤各模式有效折射率发生改变,谐振波长对折射率的灵敏度可表示为^[16]

$$K_R = \lambda_{\text{res}} \gamma \Gamma_{\text{sur}} \quad (5)$$

$$\Gamma_{\text{sur}} = - \frac{U_m^2 \lambda_{\text{res}}^3 n_{\text{sur}}}{8\pi r_{\text{cl}}^3 n_{\text{cl}} (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{h}}) (n_{\text{cl}}^2 - n_{\text{sur}}^2)^{3/2}} \quad (6)$$

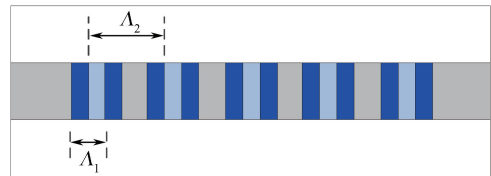


图 1 传感器结构

Fig.1 Scheme of the sensor

式中, U_m 是第一类一阶贝塞尔函数的第 m 个根, r_{cl} 为光纤外包层半径, n_{cl} 为光纤外包层折射率, n_{sur} 为环境折射率.

2 实验分析及讨论

2.1 传感器制备

将 FMF 两端与单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF) 熔接, 栅区去除涂覆层后一端固定在旋转平台上, 另一端悬挂 7 g 砝码, 使用 CO_2 激光脉冲对光纤侧面进行曝光. CO_2 激光器最大输出功率为 10 W, 脉冲频率为 10 kHz, 光斑聚焦半径为 $50 \mu m$; 实验中使用的光源是 Golight 公司生产的 OS-1650 型光源, 输出的光谱范围为 $1440 \sim 1570 \text{ nm}$; 观测光栅光谱的光谱仪为日本横河公司的 AQ6317C 型光谱分析仪.

首先写入周期 Λ_1 为 $654 \mu m$, 长度为 30 mm 的长周期光栅 LPFG-1, 光谱如图 2(a), 出现谐振峰 λ_{res1} , 通过旋转平台将光纤旋转 180° , 对光纤另一侧进行曝光, 写入周期 Λ_2 为 $819 \mu m$ 、长度为 30 mm 的长周期光栅 LPFG-2, 出现谐振峰 λ_{res2} , 最终得到的 FMF 叠加光栅的光谱如图 2(b).

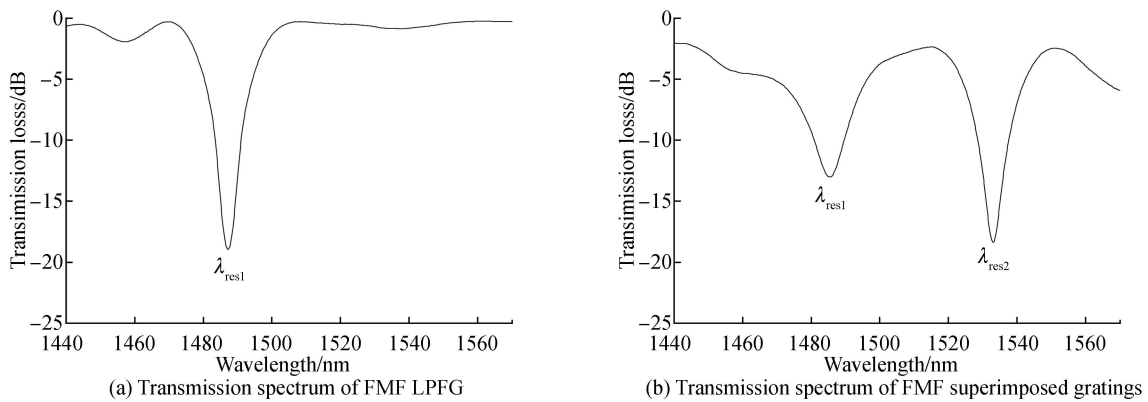


图 2 光栅传输光谱

Fig.2 Transmission spectrum of grating

由图 2 可知, FMF 长周期叠加光栅先后在波长为 1487.2 nm 和 1533.0 nm 处出现谐振峰; 光纤旋转后, 写入光栅 LPFG-2 时, 光栅 LPFG-1 谐振峰强度有所下降, 波长无明显变化. 谐振峰下降的原因是写入 LPFG-2 后, 光纤轴向折射率分布调制更加复杂, 降低了 LPFG-1 调制的可见度.

先后写入的 LPFG-1 和 LPFG-2 两个长周期光栅分别满足相位匹配条件. 实验中所用 FMF 为纤芯、内包层和外包层的三层结构, 仅能传输 LP_{01} 和 LP_{11} 模式, 仿真中所用光纤参数为: 纤芯半径为 $2 \mu m$, 折射率为 1.464; 内包层半径为 $4.5 \mu m$, 折射率为 1.465; 外包层半径为 $62.5 \mu m$, 折射率为 1.4605. 采用有限元仿真软件进行计算, 得到 FMF 中的 LP_{01} 模式分别与 LP_{11} 、 LP_{13} 模式有效折射率差在不同波长处的计算结果如图 3.

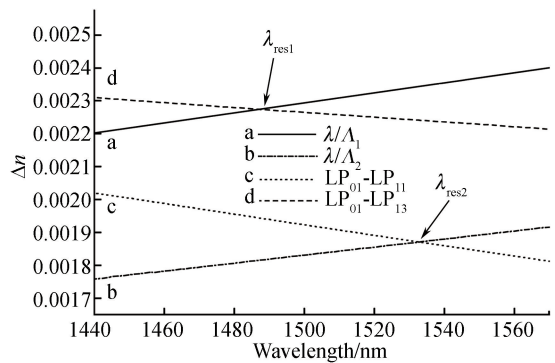


图 3 有效折射率差与波长关系

Fig. 3 Relationship between effective refractive index difference and wavelength

由图 3 可以看出, 周期为 $\Lambda_1 = 654 \mu m$ 的光栅 LPFG-1 在 1487 nm 附近的谐振峰 λ_{res1} 是由 LP_{01} 和 LP_{13} 耦合形成; 周期为 $\Lambda_2 = 819 \mu m$ 的光栅 LPFG-2 在 1533 nm 附近的谐振峰 λ_{res2} 是由 LP_{01} 和 LP_{11} 耦合产生. 谐振峰的理论计算波长和实验结果有一定误差的原因是光纤仿真模型参数和实际光纤参数有一定误差、激光器旋转平台旋转 180° 后光纤非严格水平状态等因素造成.

2.2 折射率传感实验及分析

将制备好的光纤传感器用 AB 胶固定粘牢在载波片上, 两端分别连接到光源和光谱仪上, 实验装置如图 4. 每次测量时将不同浓度的甘油溶液滴在传感头上, 直至传感器完全浸没在溶液中, 测量其传输光谱, 然后

用蒸馏水将样品池清洗多次,排除上一组残液的影响,之后再行下一个浓度的测量.

实验通过配置不同浓度的甘油溶液表征不同折射率,用阿贝折射仪测得其折射率范围为 1.333 3~1.376 6,不同折射率液的传输光谱如图 5.

由图 5 可知,当折射率由 1.333 3 变化到 1.376 6 时, λ_{res1} 由 1 481.2 nm 漂移到 1 474.0 nm, λ_{res2} 由 1 532.6 nm 漂移到 1 531.4 nm,透射光谱随折射率的变大整体向短波方向漂移,将数据进行拟合,得到如图 6 所示的折射率灵敏度曲线, λ_{res1} 灵敏度 K_{R1} 为 -170.54 nm/RIU , λ_{res2} 灵敏度 K_{R2} 为 -27.53 nm/RIU .

由式(2)和式(5)可知, γ 的正负决定了温度和折射率灵敏度的正负,光栅周期与 λ_{res1} 、 λ_{res2} 关系如图 7,随着周期增加, λ_{res1} 和 λ_{res2} 变大,即 $d\lambda_{res1}/d\Lambda_1$ 、 $d\lambda_{res2}/d\Lambda_2$ 均为正值,由定义可知, γ_1 、 γ_2 均大于 0.当外界折射率小于光纤外包层折射率时,由式(6)可知,对于 λ_{res1} 和 λ_{res2} , Γ_{sur} 均小于 0,所以 K_{R1} 、 K_{R2} 小于 0,即随着环境折射率的变大, λ_{res1} 和 λ_{res2} 向短波方向漂移.两个谐振峰灵敏度不同的主要原因是: λ_{res1} 是由纤芯基模 LP_{01} 和包层模式 LP_{13} 耦合形成, λ_{res2} 是由纤芯基模 LP_{01} 和高阶纤芯模式 LP_{11} 耦合产生, LP_{01} 模和 LP_{11} 模均在纤芯中传输,受外界折射率变化影响较小,而 LP_{13} 是包层模式,受外界折射率影响较大,因此 K_{R1} 大于 K_{R2} .

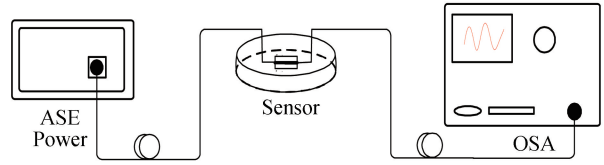


图 4 折射率传感实验装置示意
Fig. 4 Schematic diagram of refractive index sensing experiment device

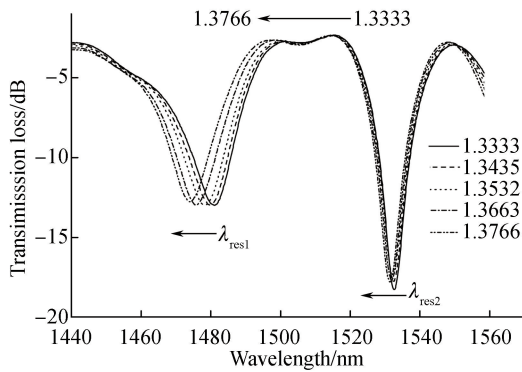


图 5 不同折射率所对应的传输光谱
Fig.5 Transmission spectra with different refractive index

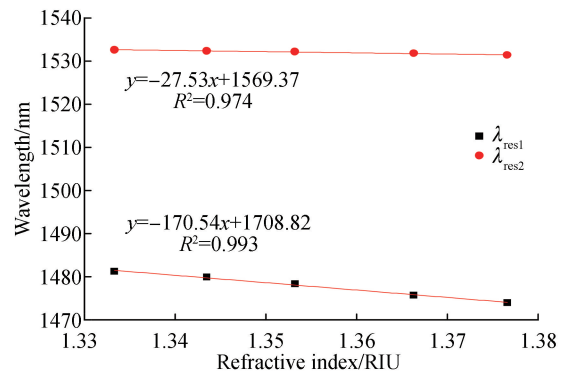


图 6 波长漂移与折射率之间的关系
Fig.6 Relationship between wavelength shift and refractive index

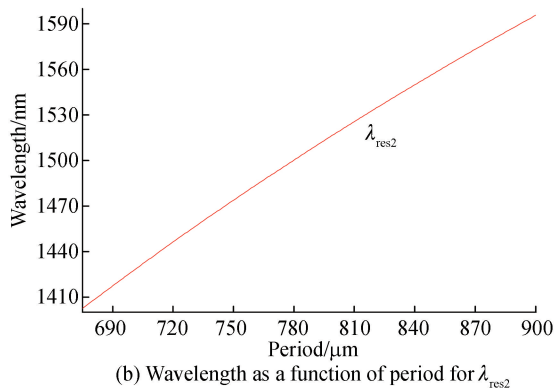
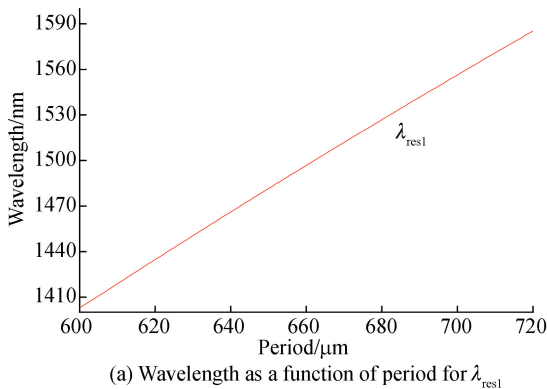


图 7 不同模式谐振波长随周期的变化

Fig.7 Resonant wavelength of different modes coupling as a function of period

由实验结果可知, λ_{res1} 折射率灵敏度大于 λ_{res2} 折射率灵敏度,随着折射率变大,两个谐振峰差值 $\lambda_{res2} - \lambda_{res1}$ 变大,对不同折射率时的谐振峰差值进行拟合,得到如图 8 所示的折射率灵敏度曲线,其灵敏度为 143 nm/RIU .

2.3 温度传感实验及分析

将制备好的光纤传感器处于平直状态,固定在载物片上并放入温控箱内,两端分别连接宽带光源和光谱仪,实验装置如图 9.

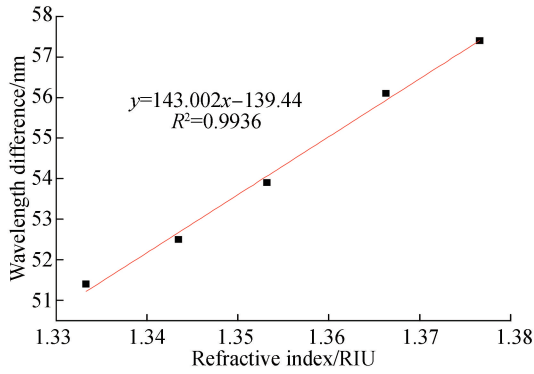


图 8 谐振峰差值漂移与折射率之间的关系

Fig.8 Relationship between the difference of two resonance dips shift and refractive index

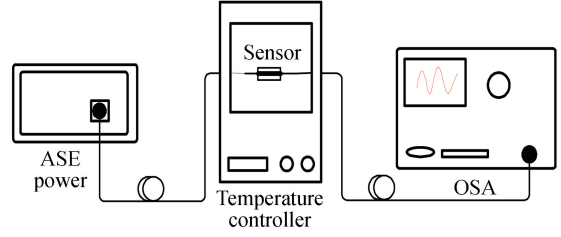


图 9 温度传感实验装置示意

Fig.9 Schematic diagram of temperature sensing experiment device

温控箱温度从 20 °C 升温到 70 °C,每隔 10 °C 测量一次,温度稳定后,测量其传输光谱,得到不同温度下传感器传输光谱如图 10.

由图 10 可知,随着温度的升高, λ_{res1} 由 1 485.6 nm 漂移到 1 487.4 nm, λ_{res2} 由 1 533.0 nm 漂移到 1 534.7 nm,透射光谱随温度的升高整体向长波方向漂移,将数据进行拟合,得到如图 11 所示的温度灵敏度曲线, λ_{res1} 和 λ_{res2} 的漂移与温度变化呈线性关系, λ_{res1} 灵敏度 K_{T1} 为 0.035 4 nm/°C, λ_{res2} 灵敏度 K_{T2} 为 0.032 9 nm/°C.

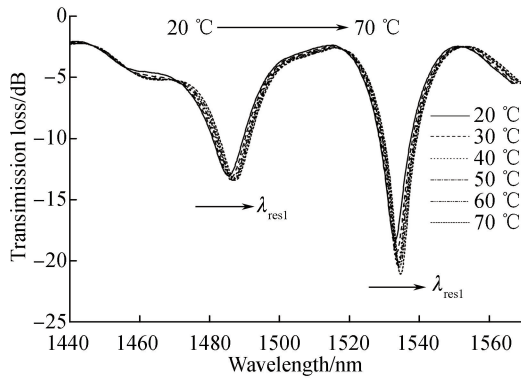


图 10 不同温度所对应的传输光谱

Fig.10 Transmission spectra with different temperature

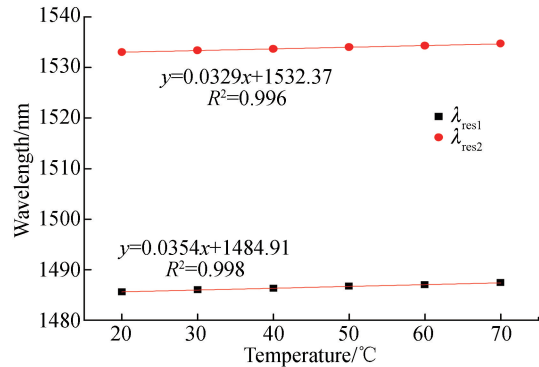


图 11 波长漂移与温度的关系

Fig.11 Relationship between wavelength shift and temperature

由文献[17]可知,光纤纤芯热光系数、包层热光系数和光纤热膨胀系数分别为 $6.45 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、 $6.34 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、 $5.5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$,热光系数比热膨胀系数大一个数量级,热膨胀的影响忽略不计,式(2)简化为

$$K_T = \lambda_{res} \gamma \Gamma_{temp} \quad (7)$$

λ_{res1} 和 λ_{res2} 的温度灵敏度表达式分别为

$$K_{T1} = \lambda_{res1} \gamma_1 \Gamma_{temp1} \quad (8)$$

$$K_{T2} = \lambda_{res2} \gamma_2 \Gamma_{temp2} \quad (9)$$

将不同温度下的光纤参数代入到模型中,可得到波长为 1 485.6 nm 时,LP₀₁、LP₁₃ 模式有效折射率随温度变化的曲线如图 12(a),拟合后曲线斜率分别为 $9.418 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、 $9.281 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;波长为 1 533.0 nm 时,LP₀₁、LP₁₁ 模式有效折射率随温度变化的曲线如图 12(b),拟合后曲线斜率分别为 $9.408 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、 $9.267 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.曲线斜率为 $\frac{dn_{eff}^{co}}{dT}$ 、 $\frac{dn_{eff}^h}{dT}$,由式(4)可知 Γ_{temp1} 、 Γ_{temp2} 大于 0,因 γ_1 、 γ_2 大于 0,由式(8)、(9)可知, K_{T1} 、 K_{T2} 均大于 0,所以,随着温度的升高, λ_{res1} 和 λ_{res2} 向长波方向漂移.

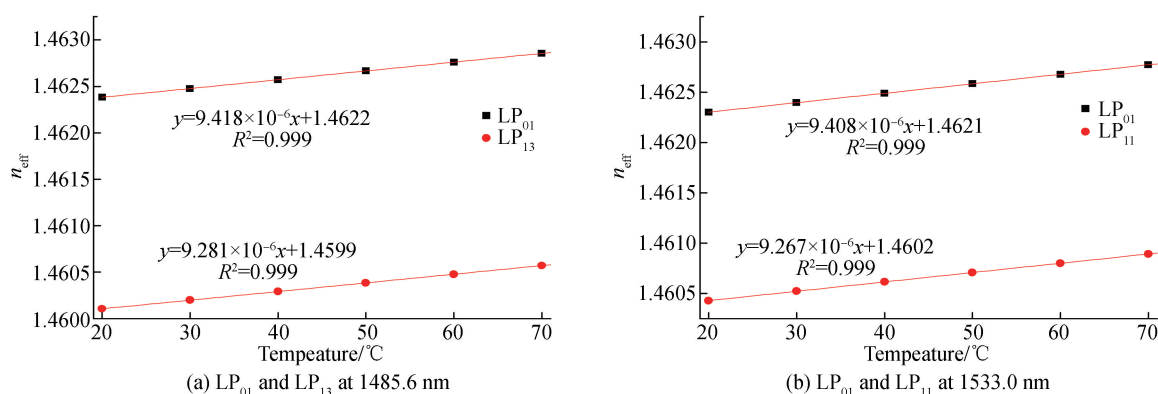


图 12 模式有效折射率随温度的变化

Fig.12 Mode effective refractive index as a function of temperature

λ_{res1} 和 λ_{res2} 温度灵敏度非常接近,采取波长相对变化的处理方法,可有效降低传感器温度灵敏度.对不同温度下的两个谐振峰差值进行拟合,得到如图 13 所示的温度灵敏度曲线,谐振峰差值温度灵敏度为 $-0.0025 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,远低于单一波长灵敏度,与折射率的影响相比,温度的影响可以忽略不计.

3 结论

本文利用 CO_2 激光器在少模光纤正反两侧分别写入不同周期的长周期光栅,制备了一种基于少模光纤叠栅结构的折射率传感器,研究了其折射率及温度传感特性,并通过分析两个谐振峰差值的变化,减少温度对折射率测量的影响.结果表明:当外界折射率变大时,两个谐振峰差值逐渐变大,在折射率 $1.3333 \sim 1.3766$ 范围内,灵敏度为 $143 \text{ nm}/\text{RIU}$;当温度升高时,两个谐振峰差值变化很小,在 $20 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,仅为 $-0.0025 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,相比折射率的影响,可认为其对温度不敏感.该传感器结构紧凑,尺寸较小,在工业、生物、水利等领域具有广泛的应用前景.

参考文献

- [1] BI Wei-hong, XING Yun-hai, ZHOU Kun-peng, *et al.* Measurement of the refractive index of the mixed oil kerosene based on long period fiber grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(2): 0206001.
毕卫红,邢云海,周昆鹏,等.长周期光纤光栅检测混合油的折射率[J].光子学报,2017,**46**(2):0206001.
- [2] JIANG Xiu-li, GU Zheng-tian, LING Qiang, *et al.* Optimal design and experiments of coated dual-peak resonance long-period fiber grating refractive index sensing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(5): 0505003.
蒋秀丽,顾铮先,凌强,等.镀膜双峰谐振长周期光纤光栅折射率传感的优化设计与实验[J].中国激光,2016,**43**(5): 0505003.
- [3] WANG La, ZHAO Hong-xia, DING Zhi-qun, *et al.* Research on the sensing characteristics of high sensitivity refractive index of micro/nano dual-FBG[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, **26**(7): 1284-1287.
王啦,赵洪霞,丁志群,等.微纳双FBG高灵敏度折射率传感特性研究[J].光电子·激光,2015,**26**(7):1284-1287.
- [4] ZHAO Hong-xia, CHENG Pei-hong, DING Zhi-qun, *et al.* Simultaneous measurement of temperature, refractive index and liquid level based on biconical fiber gratings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(10): 1010005.
赵洪霞,程培红,丁志群,等.双锥形光纤光栅实现温度、折射率和液位同时测量[J].中国激光,2016,**43**(10): 1010005.
- [5] GAN Huan-biao, CHEN Zhe, ZHANG Jun, *et al.* A high sensitive refractivity sensor based on side-polished multimode fiber[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, **26**(4): 633-638.
甘焕标,陈哲,张军,等.基于侧边抛磨多模光纤的高灵敏度折射率传感器[J].光电子·激光,2015,**26**(4): 633-638.
- [6] BAI Chun-he, LUO Yun-han, CHEN Zhe, *et al.* Characteristics of side-polished fiber in refractive index sensing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(10): 1182-1186.
白春河,罗云瀚,陈哲,等.基于侧边抛磨光纤倏逝场的折射率传感特性[J].光子学报,2013,**42**(10): 1182-1186.
- [7] ZHOU Meng-hui, DONG Xin-yong, YANG Jing-yi, *et al.* Thin-core fiber M-Z interferometer sensor for multi-

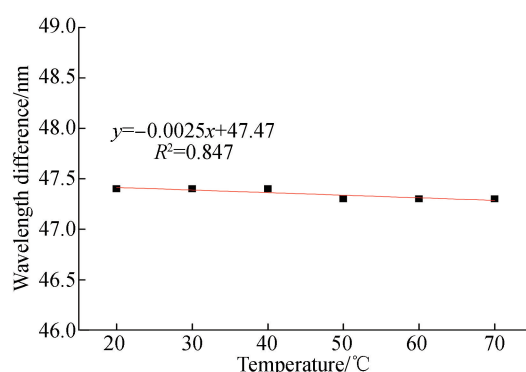


图 13 谐振峰差值漂移与温度的关系

Fig. 13 Relationship between the difference of two resonance dips shift and temperature

- parameter measurement[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2016, **27**(6): 587-592.
- 周孟晖,董新永,杨菁怡,等. 细芯光纤 M-Z 干涉传感器多参数测量研究[J]. *光电子·激光*, 2016, **27**(6): 587-592.
- [8] WANG Zhi-ping, GONG Hua-ping, XIONG Meng-ling, *et al.* Sensing characteristics of dual s-shape optical fiber structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(10): 1006002.
- 王志平,龚华平,熊梦玲,等. 双 S 型光纤结构的传感特性[J]. *光子学报*, 2016, **45**(10): 1006002.
- [9] ANDRE R M, WARREN-SMITH S C, BECKER M, *et al.* Simultaneous measurement of temperature and refractive index using focused ion beam milled fabry-perot cavities in optical fiber micro-tips[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(13): 261196.
- [10] NI Xiao-ling, FU Song-nian, ZHAO Zhi-yong. Thin-fiber-based fabry-perot cavity for monitoring microfluidic refractive index[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, **8**(3): 6803107.
- [11] WANG Ting-ting, GE Yi-xian, CHANG Jian-hua, *et al.* Refractive index sensing characteristic of a hybrid-Fabry-Perot interferometer based on an in-fiber ellipsoidal cavity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(24): 240701.
- 王婷婷,葛益娴,常建华,等. 基于椭圆封闭空气腔的光纤复合法布里-珀罗结构折射率传感特性研究[J]. *物理学报*, 2014, **63**(24): 240701.
- [12] ZHANG Xin-pu, XIE Ling-xiao, ZHANG Yang, *et al.* Optimization of long-period grating-based refractive index sensor by bent-fiber interference[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(31): 9152-9156.
- [13] SU Geng-hua, XU De-gang, SHI Jia, *et al.* A dual-parameter sensor for temperature and refractive index based on a sagnac loop composed of an LPFG and polarization maintaining fiber[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2017, **28**(1): 25-31.
- 苏耿华,徐德刚,石嘉,等. 基于保偏光纤和 LPFG 的 sagnac 环温度及环境折射率双参量光纤传感器研究[J]. *光电子·激光*, 2017, **28**(1): 25-31.
- [14] SHI Jia, SU Geng-hua, XU De-gang, *et al.* A dual-parameter sensor using a long-period grating concatenated with polarization maintaining fiber in sagnac loop[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, **16**(11): 4326-4330.
- [15] WANG Biao, ZHANG Wei-gang, BAI Zhi-yong, *et al.* CO₂-laser-induced long period fiber gratings in few mode fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(2): 145-148.
- [16] BISWAS P, BASUMALLICK N, BANDYOPADHYAY S, *et al.* Sensitivity enhancement of turn-around-point long period gratings by tuning initial coupling condition[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, **15**(2): 1240-1245.
- [17] CAO Hong-xing, BAI Yu-kun, LI Jing-hui, *et al.* Analysis of sensing characteristics of a long-period fiber grating based on two fiber analysis models[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(2): 0205001.
- 曹洪星,白育堃,李敬辉,等. 基于两种光纤介质模型的长周期光纤光栅传感特性分析[J]. *中国激光*, 2014, **41**(2): 0205001.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61475133, 61575170, 61675176, 61605168, 61640408), the Key Basic Research Project of Hebei Province (No. 16961701D), the Provincial Natural Science Foundation of Hebei (No. F2016203392), the Provincial College and University Science and Technology Research Foundation of Hebei (No. QN2016078), the Science and Technology Project of Qin Huangdao City (No. 201601B050), and Intramural Doctoral Foundation of Yanshan University (No. B1011)