

高灵敏温度自补偿折射率传感器的研究

何其睿, 葛海波, 刘 睿
(西安邮电大学 电子工程学院, 710061)

摘要: 测量折射率时为同时达到高灵敏度和温度补偿的测量效果, 提出一种环境折射率 (RI) 传感器。传感部分基于重叠级联结构的长周期光纤光栅 (LPFG), 通过寻找特定的光栅周期, 使一阶 9 次、11 次包层模的损耗峰分别向一短一长两个波长方向漂移, 以其相对漂移量来解调折射率。仿真结果表明, 该传感器与普通的温度补偿折射率传感器相比, 折射率灵敏度明显提高, 在生物、化工领域有较好的实用价值。

关键词: 重叠级联长周期光纤光栅; 折射率传感; 温度自补偿; 高灵敏度

中图分类号: TP212.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)02-0031-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.02.009

Research on temperature self compensated high sensitivity refractive index sensor

HE Qirui, GE Haibo, LIU Rui
(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: This paper puts forward such a kind of environmental optical fiber refractive index (RI) sensor which the sensing system is based on the overlapping cascade long-period fiber grating, and it can provide temperature self compensation during measurement. Though finding specific grating period, it can make the resonant wavelength of loss peak which was coupled out by the cladding mode including order 9 and order 11 in the cascade, and the drifting of wavelength that has an opposed direction with the changes of outside refractive index, demodulating the index of refraction with their relative drift. The emulation shows that, making comparison with the normal sensor of temperature compensation refractive index, the sensitivity of refractive index has an obvious improvement, so it has a better practicability.

Key words: overlap cascaded long period fiber grating; refractive index sensing; temperature self compensation; high sensitivity

0 引言

折射率传感是目前光纤传感的热门议题, 折射率的测量在医学和生物化工领域有着重要用途。而提高灵敏度、避免温度带来的波长干扰, 一直是实际测量折射率时的两个关键指标。因为单种光纤光栅在测量折射率时, 参数难免受温度影响, 干扰测量结果, 所以有学者提出的传感器多采用对折射率和温度敏感度

不同的两种甚至多种不同的光纤光栅进行测量, 并通过计算矩阵关系得到各自的灵敏度^[1,2]。为改变敏感度, 科研人员还采用包括熔融和腐蚀在内的光纤制作方式, 但其传感能达到的折射率灵敏度一般只在 100~400nm/RIU (Refractive Index Unit), 且制作难度较大, 不利于推广使用。为此, 本文提出一种高灵敏温度自补偿折射率传感方法, 传感原理为用两个损耗峰的波长漂移的相对值解调折射率, 传感部分是两个光栅周期不同的长周期光栅 (LPFG) 重叠构成的级联光纤光栅。

收稿日期: 2017-09-14。

基金项目: 陕西省自然科学基金项目 (2011JM8038) 资助。

作者简介: 何其睿 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤通信与光纤传感。

1 重叠级联 LPFG

重叠级联 LPFG 截面示意图如图 1 所示,两个 LPFG 在同一区域重叠存在。经 Sumetsky 等人研究,光在其间传输时,纤芯基模经过两个不同周期的光栅,同时与在包层中传输的两种包层模产生耦合,出现多个不同谐振波长的损耗峰。其探测外界折射率的原理是,当包层外环境的折射率 n_3 发生变化时,裸露在测量环境中的两个包层模的有效折射率 n_{eff}^{cl} 会随之改变,导致对应损耗峰的谐振波长漂移。不同于相移级联 LPFG 的梳状光谱,这种重叠级联 LPFG 可以通过设计光栅参数使两个损耗峰突显出来^[3];另外,还可以通过寻找 LPFG1 和 LPFG2 的特定光栅周期,使两个阶次的包层模对应的损耗峰分别随折射率向短波和长波方向漂移,根据谐振波长相对的漂移量,检测出外界折射率。

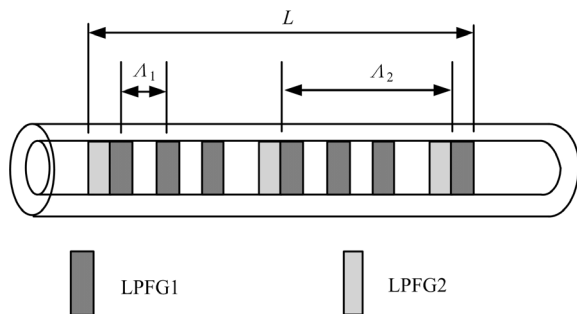


图 1 重叠级联 LPFG 结构示意图

2 理论分析

对于单模 LPFG,主要是一阶包层模与纤芯模的耦合较深^[4],谐振波长 λ 的位置为:

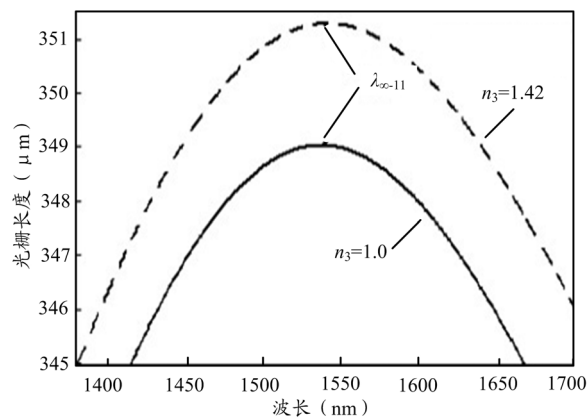
$$\lambda = (n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl-i}) \Lambda \quad (1)$$

由式(1)可知, λ 取决于纤芯模的有效折射率 n_{eff}^{co} 、一阶 i 次包层模的有效折射率 n_{eff}^{cl-i} 和光栅周期 Λ 。

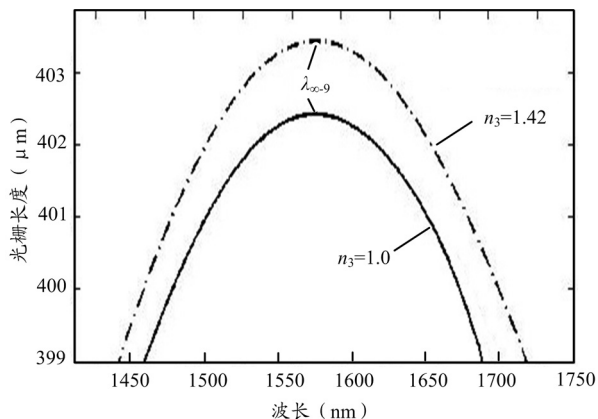
测量环境折射率时,初始的 n_{eff}^{co} 和 n_{eff}^{cl} 由光纤结构和参数决定,对于固定结构的光纤,波长 λ 与周期 Λ 之间存在一个关系曲率 k ^[5]。

$$k = \frac{d\lambda}{d\Lambda} = \frac{(n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl})^2}{n_1 - n_2} \quad (2)$$

其中, n_1 和 n_2 分别代表纤芯模和包层模的折射率,这是一个二次函数,以 Corning SMF-28 单模光纤的参数为模型, $n_1=1.4681$, $n_2=1.4653$ 。文献[6]用二层光纤模和三层光纤模的特征方程解得其纤芯模和 11 次包层模



(a) 一阶 11 次包层模



(b) 一阶 9 次包层模

图 2 两个阶次包层模的谐振波长和光栅周期关系

有效折射率分别为 $n_{eff}^{co}=1.461313$, $n_{eff}^{cl-11}=1.460667$ 。图 2 为包层外环境折射率 n_3 在 1.00 和 1.42 情况下仿真出的 11 次、9 次包层模的谐振波长和光栅周期的关系图。

由图 2 可看出,两个关系图的变化规律大致相同,阶次谐振波长都会随着光栅周期和环境折射率的改变产生漂移,且都存在一个极值点,从极值点开始,漂移方向反转。把在 1540nm 左右的极值点定义为 11 次包层模的拐点 $\lambda_{\infty-11}$,可以看出,距拐点越近,对应谐振波长从 $n_3=1.0$ 到 $n_3=1.42$ 的漂移量越大,即敏感度越高;9 次包层模的拐点 $\lambda_{\infty-9}$ 比 1540nm 要高,在 1560nm 左右。综上所述,如果选择两个谐振波长 λ_1 和 λ_2 分别满足 $\lambda_1 < \lambda_{\infty-9}$, $\lambda_2 > \lambda_{\infty-11}$,会使两个损耗峰随环境折射率向一短一长两个波长方向漂移,用谐振波长的相对漂移量 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ 测量折射率,可以获得更高的敏感度。

由于测量折射率时外界温度是不确定的(如生物体内、矿井下),而光纤光栅温度变化时会产生热光效

应和热膨胀效应, 常常会引起纤芯模有效折射率 n_{eff}^{co} 、包层模有效折射率 n_{eff}^{cl} 和光栅周期 Λ 的变化, 从而影响波长漂移, 导致测量结果的偏差^[7]。设重叠级联 LPFG 的损耗峰波长漂移量 $\Delta\lambda_s$ 由折射率和温度两部分引起。

$$\Delta\lambda_s = \Delta\lambda_n + \Delta\lambda_T \quad (3)$$

其中, $\Delta\lambda_n$ 为环境折射率引起的漂移量, $\Delta\lambda_T$ 是由温度变化引起的漂移量。 $\Delta\lambda_T$ 与纤芯模的有效热光系数 ξ^{co} 、包层模的有效热光系数 ξ^{cl} 及光栅的热膨胀系数 α 有关:

$$\Delta\lambda_T = [n_{eff}^{co}(1 + \xi^{co} \Delta T) - n_{eff}^{cl}(1 + \xi^{cl} \Delta T)](1 + \alpha \Delta T)\Lambda - \lambda_T \quad (4)$$

由于模拟用的 Corning SMF-28 单模光纤的 ξ^{co} 和 ξ^{cl} 要比 α 大两个数量级, 热光效应贡献的波长漂移量约占 95%, 远大于热膨胀效应^[8], 这是影响折射率传感信息准确性的主要因素, 因此计算中可以不计热膨胀系数产生的波长漂移。而重叠级联 LPFG 可以认为是纤芯模被两个光纤光栅分别耦合到两个包层模中, 同一个纤芯模有效热光系数相等, 两个被选取的相邻包层模有效热光系数相近度达 10^{-79} , 由式(4)可知, 两个包层模的 $\Delta\lambda_T$ 也会相近, 漂移方向同向。根据式(3), 用两个损耗峰波长 $\Delta\lambda_{s1}$ 、 $\Delta\lambda_{s2}$ 的相对漂移量 $\Delta\lambda = \Delta\lambda_{s1} - \Delta\lambda_{s2}$ 解调出的折射率可以自动补偿温度漂移 $\Delta\lambda_T$ 。

3 结果仿真

下面对重叠级联 LPFG 透射谱仿真, 根据标准耦合模理论^[10,11], 经过长度为 z 的光栅后纤芯模、9 次、11 次包层模的能量 A_c 、 A_9 、 A_{11} 分别为:

$$\begin{cases} A_c(z) = \cos(\tau z) \\ A_9(z) = -\frac{\kappa_9}{\tau} \sin(\tau z) \\ A_{11}(z) = -\frac{\kappa_{11}}{\tau} \sin(\tau z) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\tau^2 = \kappa_9^2 + \kappa_{11}^2$, κ_9 和 κ_{11} 分别是两个阶次包层模与纤芯模的耦合常数, 其值除与纤芯折射 $n(z)$ 成正比外, 还与两个光栅折射率的调制函数峰值 Δn_1 和 Δn_2 的积分成正比。 $\Delta n_1 = 1.1 \times 10^{-4}$, $\Delta n_2 = 0.9 \times 10^{-4}$ 。图 1 中的重叠级联 LPFG 的纤芯折射率 $n(z)$ 沿轴向分布为:

$$n(z) = n_1 + \sum_{i=1}^2 \Delta n_i + \Delta n_i \sin\left(2\pi \frac{z}{\Lambda_i}\right) + \Delta n_2 \sin\left(2\pi \frac{z}{\Lambda_2}\right) \quad (6)$$

透射率在光栅长度为 $z=L$ 时的表示为:

$$T = \left| \frac{A_c(L)}{A_c(0)} \right|^2 \quad (7)$$

为便于观察透射谱, 我们选择 $A_c(L)$ 时的 L 作为光栅长度, 此时的 $L=2.89\text{cm}$, 以两段 Corning SMF-28 单模光纤的参数为标准, $n_1=1.4681$, $n_2=1.4653$, $n_{eff}^{co}=1.461313$, $n_{eff}^{cl-11}=1.4606671721$, $n_{eff}^{cl-9}=1.4613135665$; LPFG1 光栅周期 Λ_1 取 $401.52\mu\text{m}$, 使 9 次包层模谐振波长落在 1540nm 处; LPFG2 光栅周期 Λ_2 取 $348.07\mu\text{m}$, 使 11 次的谐振波长落在 1560nm 处。用 Matlab 仿真出重叠级联 LPFG 透射谱, 如图 3 所示。

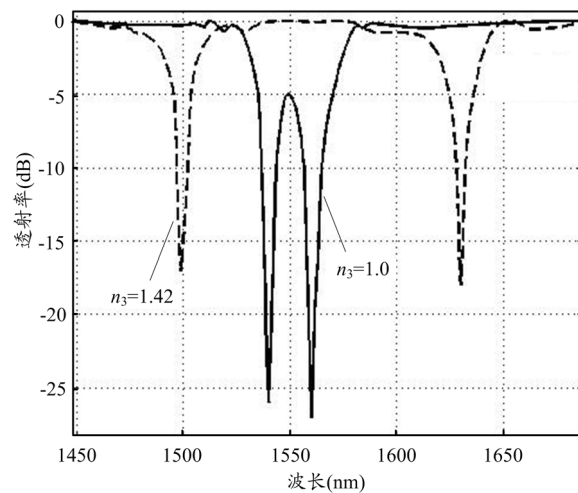


图 3 两个环境折射率下的透射谱

可以看出, 包层外环境折射率 n_3 从 1.0 变化到 1.42 时, 两个损耗峰分别向短波长和长波长漂移, 符合之前的结论。图 4 为两个谐振波长的相对漂移量 $\Delta\lambda = \lambda_{s11} - \lambda_{s9}$ 随环境折射率变化的关系图。

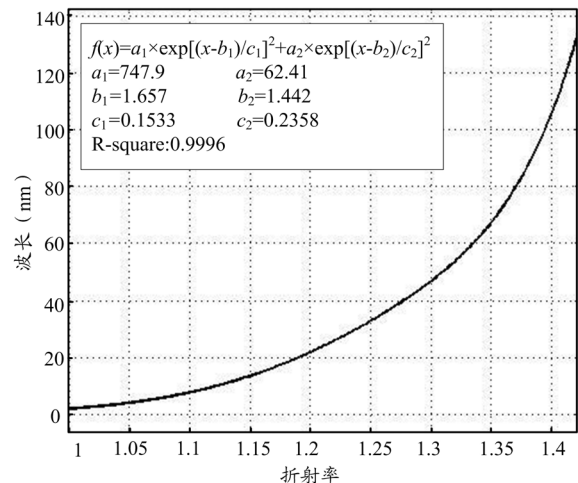
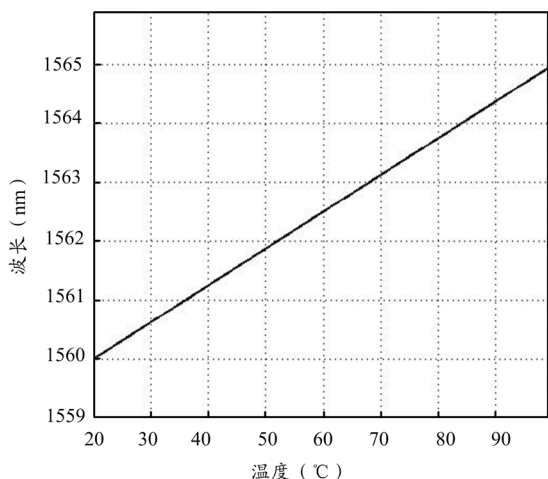
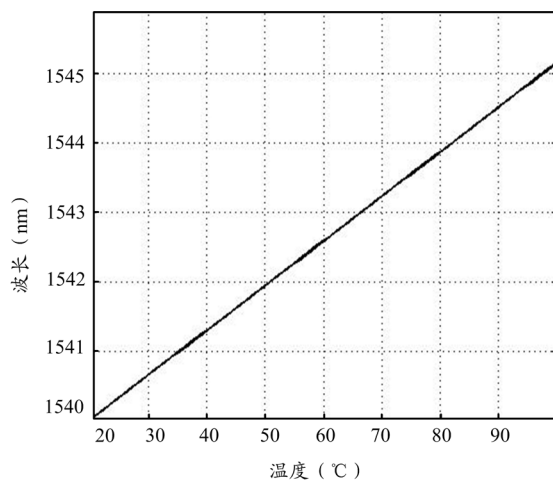


图 4 折射率与波长漂移关系图



(a) 一阶9次包层模



(b) 一阶11次包层模

图5 两个阶次的包层模在不同温度下谐振波长变化关系

由图4可以看出,当包层外环境折射率由1.0变化到1.42时,损耗峰的相对漂移量 $\Delta\lambda$ 最大增至131nm,且增长速度越来越快。定义图4中波长与折射率的比值为最终的折射率传感灵敏度,仿真结果表明,随包层外测量环境变化,其值从21nm/RIU变化至1454nm/RIU。在1.3~1.42折射率区间,对应灵敏度变化比较明显,为363~1454nm/RIU。用识别范围精细到1pm的光谱仪识别波长,则在环境折射率范围1.3~1.42间的测量精度可达 10^{-6} ~ 10^{-7} 。

图5是式(4)模拟出的温度与谐振波长的线性关系。模拟温度变化范围为20℃~100℃,仿真参数如下:纤芯模有效热光系数 $\xi^{\text{co}}=6.448\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,9次包层模有效热光系数 $\xi^{\text{cl-9}}=6.359\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,11次包层模有效热光系数 $\xi^{\text{cl-11}}=6.364\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

可以看出当温度由20℃变化到80℃时,两个谐振

波长分别产生了5.143nm和5.002nm的温漂(温度引起的谐振波长漂移量),5nm的波动在测量低环境折射率时会带来最大0.76RIU的误差,这个误差较大。但两个温漂很接近,用谐振波长相对漂移量 $\Delta\lambda=\lambda_2-\lambda_1$ 来解调折射率,温漂被缩小到了0.141nm,相比补偿前缩小了3个单位,误差为0.006RIU,在大多数工业测试环境下可以达到较理想的温度自补偿效果。

4 结束语

以上我们经过对重叠级联LPFG的一阶9次和11次包层模的包层外环境折射率敏感特性的研究,并设计了两段LPFG的光栅周期,使其在一定范围内可以对外界环境折射率进行高灵敏度的测量。用所设计的光纤光栅测量环境折射率,环境折射率越高,灵敏度越高,环境折射率在1.3~1.42时有363~1454nm/RIU的灵敏度,且可以自动补偿温度,补偿后的误差不超过0.006RIU,在工业和生物领域有较好的实用前景和利用价值。

参考文献:

- [1] 严金华. 同时测量折射率和温度的光纤传感器[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008(10): 1697-1699.
- [2] 何如双, 钱梦, 胡雪芳, 等. FBG滤波的级联LPFG温度和折射率传感装置[J]. 光子学报, 2016(1): 63-67.
- [3] SUMETSKY M, RAMACHANDRAN S. Multiple mode conversion and beam shaping with superimposed long period gratings[J]. Optics express, 2008, 16(1): 402-412.
- [4] 王莉. 基于长周期光纤光栅理论的折射率测量系统研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2003.
- [5] SHU X, ZHANG L, BENNION I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2): 255.
- [6] 马龙. 重叠级联长周期光纤光栅理论及应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [7] 梁丽丽. 基于长周期光纤光栅的液体温度传感器的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- [8] 周景会, 孙浩, 杨坤, 等. 具有温度自校准功能的光纤折射率传感器[J]. 应用光学, 2015(1): 140-144.
- [9] 张自嘉, 施文康, 高侃, 等. 热光系数与长周期光纤光栅的温度灵敏度研究[J]. 光学技术, 2004(5): 525-528.
- [10] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. Lightwave Technology, Journal of, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [11] LI Q. Coupled-local-mode theory and study of optical properties of a Gaussian fiber grating[J]. JOSA A, 1999, 16(6): 1312-1325.