

文章编号:1004-4213(2011)08-1201-4

长周期光纤光栅折射率传感器的结构优化

金清理, 黄晓虹, 颜利芬, 王振国, 张耀举

(温州大学 物理与电子信息工程学院, 浙江 温州 325035)

摘 要: 为了提高长周期光纤光栅对环境介质折射率的传感灵敏度, 提出一种长周期光纤光栅的周期和包层半径的结构优化. 基于长周期光纤光栅的耦合模理论, 分析了长周期光纤光栅的周期和包层半径的大小分别与环境介质折射率传感灵敏度的关系, 讨论了长周期光纤光栅的周期和包层半径对折射率传感的影响以及控制光栅周期与包层半径对折射率传感的重要性. 为使优化的长周期光纤光栅具有实用性, 谐振波长设计在 1.55 μm 的常规波长范围, 经过多次模拟实验, 提出最佳优化参量为: $\Lambda = 380 \mu\text{m}$, $r_{\text{cl}} = 17 \mu\text{m}$, 对环境介质折射率从 1.26~1.38 不同值的实验测试, 折射率传感灵敏度达到 0.000 12, 长周期光纤光栅的结构优化获得理想的预期效果.

关键词: 长周期光纤光栅; 折射率传感器; 光栅周期; 包层半径; 结构优化

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114008.1201

0 引言

近几年, 长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)器件在通信和传感器领域的使用日趋活跃, 如在生物传感, 气体探测, 温度、浓度和应力测量等^[1-5]领域的实践和应用. 折射率是溶液或气体其浓度含量的重要参量, 检测溶液或气体的浓度, 通过测量折射率再计算浓度是常用的方法之一. 用光纤器件测量折射率^[6-7]的方法很多, T. Mazingue 等提出用多模干涉耦合器^[8]测量气体的折射率, 文献[9]提出光晶体微腔结构用作折射率传感器, 文献[10]基于透射和反射的细纤芯模干涉仪作折射率传感器, 文献[11]用布喇格光纤光栅同时测量溶液的折射率和温度等等. 这些测量折射率的方法虽然准确度达到要求, 但所用仪器和器件制作工艺都有特殊的要求, 且尚停留在实验室阶段.

LPFG 具有制作工节成熟、抗干扰性好、可远距离测控、配套仪器简单等优点而被受关注. 本文提出优化 LPFG 的周期和包层半径, 提高环境介质折射率传感的灵敏度. 根据耦合模理论, 分析了 LPFG 的不同周期和包层半径分别与环境介质折射率传感灵敏度的关系. 经过多次模拟试验, 综合考虑各种因素, 最佳优化参量为: $\Lambda = 380 \mu\text{m}$, $r_{\text{cl}} = 17 \mu\text{m}$, 环境介质折射率的传感灵敏度有极大值, 达到 0.000 12.

1 原理

LPFG 的周期一般为几十至几百微米, 如图 1.

LPFG 的模式耦合属于纤芯基模 LP_{01} 与同向传输的一阶奇次包层模 LP_{0m} ($m = 3, 5, 7, \dots$) 之间的耦合^[12]. 由耦合模理论可知, LPFG 的相位匹配条件可表示为^[13]

$$\lambda_m = \Lambda(n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl},m}^{\text{eff}}) \quad (m = 1, 3, 5, \dots) \quad (1)$$

式中, λ_m 为谐振波长, Λ 是光栅周期, $n_{\text{co}}^{\text{eff}}$ 和 $n_{\text{cl},m}^{\text{eff}}$ 分别为纤芯基模 LP_{01} 和一阶 m 次包层模 LP_{0m} 的有效折射率. 从式(1)知, 当 LPFG 的材料选定后, 谐振波长(λ_m)与周期(Λ)成正比, 周期增大, 谐振波长也增大.

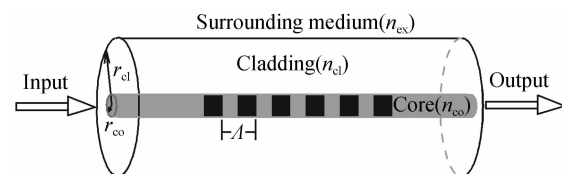


图 1 长周期光纤光栅原理

Fig. 1 Schematic diagram of long-period fiber grating

LPFG 折射率传感灵敏度, 是指当环境介质折射率发生微小改变时, 其谐振波长的偏移值($\Delta\lambda$)越大越好. 为简化讨论的问题, 避免处理三层模的困难, 由于 $r_{\text{co}} \ll r_{\text{cl}}$, 将光纤近似看成无芯波导来处理, 根据文献[14]有

$$\Delta\lambda = \frac{u_{\infty}^2 \lambda_m^3 \Lambda}{8\pi^3 n_{\text{cl}} r_{\text{cl}}^3} \left(\frac{1}{\sqrt{n_{\text{cl}}^2 - n_{\text{co}}^2}} - \frac{1}{\sqrt{n_{\text{cl}}^2 - n_{\text{ex}}^2}} \right) \quad (2)$$

式中 u_{∞} 为 Bessel 函数, 式(2)显示谐振波长的偏移值是周围环境介质折射率(n_{ex})的函数, 与包层半径(r_{cl})的三次方成反比, 与光栅周期(Λ)的四次方成正比($\lambda_m \propto \Lambda$). 因此, 测量环境介质折射率时, 增

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61078023)资助

第一作者: 金清理(1956-)男, 副教授, 主要研究方向为光纤传感技术和光信息处理. Email: jinqli@wzu.edu.cn

收稿日期: 2011-02-17; 修回日期: 2011-05-19

大光栅周期,减小包层半径,能增加谐振波长的偏移值,即增加传感灵敏度。

根据式(2), LPFG 选择合适的光栅周期(Λ)和包层半径(r_{cl}),能够使折射率传感的灵敏度达到最大值。

2 结果与讨论

本文采用纤芯掺锗光纤^[15], $r_{co} = 3.25 \mu\text{m}$, $r_{cl} = 62.5 \mu\text{m}$, 在 25°C , $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时, 纤芯折射率 $n_{co} = 1.467$, 包层折射率 $n_{cl} = 1.446$, LPFG 的结构优化以后, 在外部介质折射率值从 $1.26 \sim 1.38$ 的条件下进行模拟实验。

2.1 相位匹配曲线

相位匹配曲线如图 2。用 CO_2 脉冲激光写入 LPFG, 相关参量为: $\Lambda = 400 \mu\text{m}$, 周期循环数 $N = 50$, 实验温度在 25°C , 图中为不同 LP_{0m} ($m = 1, 3, 5, 7$) 模的谐振波长与光栅周期的关系曲线。

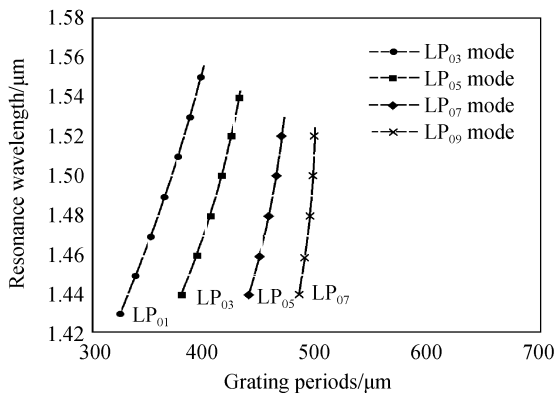


图 2 LPFG 谐振波长的相位匹配曲线

Fig. 2 Phase-matching curves of resonances wavelength of the LPFG

图 2 的 LP_{0m} 相位匹配曲线显示, $d\lambda/d\Lambda$ 的斜率都是正值, 光栅周期(Λ)增大, 其谐振波长也将增大; 各模式的斜率值不同, 模次的增加其斜率值也增加。在这里仅对纤芯基模 LP_{01} 和一阶奇次模 LP_{0m} 进行讨论。

2.2 LPFG 包层半径对谐振波长灵敏度的影响

本文采用 HF 酸(浓度为 10%)定位腐蚀 LPFG 的包层减小其半径, 液温控制在 25°C , 包层半径被腐蚀到 $60 \mu\text{m}$, $52 \mu\text{m}$, $44 \mu\text{m}$, $36 \mu\text{m}$, $28 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m}$, $16 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$, 腐蚀时间分别为 20 min、76 min、132 min、188 min、244 min、300 min 和 370 min。被腐蚀的光纤光栅包层半径用生物显微镜配合测微目镜进行测量, 如果其包层直径有偏差则进行重新腐蚀, 达到要求为止, 被腐蚀的光纤光栅用环氧树脂涂敷作为保护层加以保护。LPFG 的包层半径与谐振波长灵敏度的关系如图 3。获得曲线的

$d\lambda/dr_{cl}$ 斜率为负值, 光纤包层半径减小, 谐振波长的灵敏度增加。光纤包层半径从 $60 \mu\text{m}$ 减小到 $36 \mu\text{m}$, 谐振波长偏移值的平均灵敏度为 $0.06 \text{ nm}/\mu\text{m}$ 。包层半径从 $36 \mu\text{m}$ 减小到 $20 \mu\text{m}$, 谐振波长偏移值平均灵敏度是 $0.15 \text{ nm}/\mu\text{m}$ 。光纤包层半径从 $20 \mu\text{m}$ 减小到 $16 \mu\text{m}$, 谐振波长偏移值灵敏度的平均值增加到 $0.325 \text{ nm}/\mu\text{m}$; 当包层半径小于 $16 \mu\text{m}$ 时, 其谐振波长偏移值灵敏度迅速增加。图 3 的结果符合 LPFG 的耦合模理论, 薄包层其谐振波长易于受环境介质折射率变化的影响和调制, 有利于谐振波长的谱带与外部介质耦合而辐射出去, 从而提高折射率传感的灵敏度。

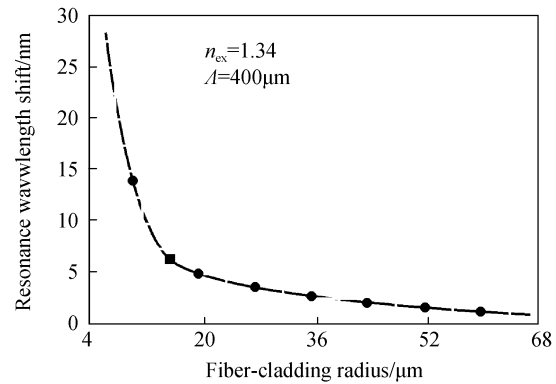


图 3 LPFG 谐振波长偏移与包层半径的关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between wavelength shift and cladding radius of the LPFG

2.3 LPFG 的周期对谐振波长灵敏度的影响

LPFG 的周期与谐振波长灵敏度的关系如图 4。所有曲线的 $d\lambda/d\Lambda$ 斜率均为正值, 即 LPFG 的谐振波长灵敏度随光纤光栅周期(Λ)的增大而均增加。从图中可以看出, 在相同周期的条件下, 包层半径减小, 谐振波长的偏移值增大, 曲线(a)为 $r_{cl} = 17 \mu\text{m}$, 其谐振波长偏移值最大, 即环境介质折射率传感灵敏度最大。

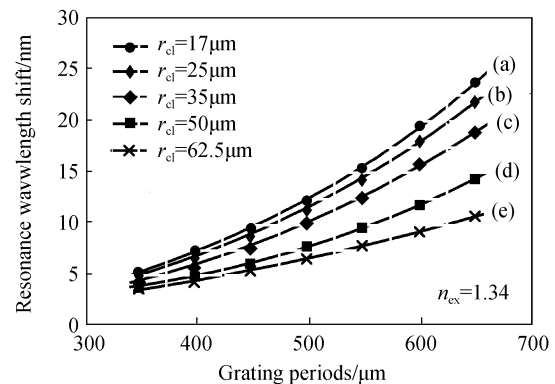


图 4 LPFG 谐振波长偏移和光栅周期的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between wavelength shift and grating periods of the LPFG

2.4 LPFG 周期和包层半径的结构优化

LPFG 周期和包层半径的结构优化, 谐振波长

偏移值分别与光栅周期和包层半径的折射率传感灵敏度如图 5. 图中(a)和(b)分别表示不同光栅周期和不同包层半径的传感曲线. 保持包层半径(如: $r_{cl}=17\ \mu\text{m}$)不变, LPFG 的折射率传感灵敏度随光栅周期的增大而增加. 相反, 保持光栅周期(如: $\Lambda=380\ \mu\text{m}$)不变, 折射率传感灵敏度随包层半径的减小而增加. 包层半径与周期比较, 减小包层半径比增加光栅周期, 其传感灵敏度的增大更明显. 因薄包层(周期不变), 有利于谐振波长与环境介质的界面耦合被辐射, 从而提高传感灵敏度. 而增大周期(包层半径不变), 其测量灵敏度只类似于线性增加. 为了获得测量环境介质折射率最大的灵敏度, 综合考虑各方面的因素, 选择包层半径 $r_{cl}=17\ \mu\text{m}$, 光栅周期 $\Lambda=380\ \mu\text{m}$, 最优参量的选择参考图 5(a)和(b)曲线的交叉点.

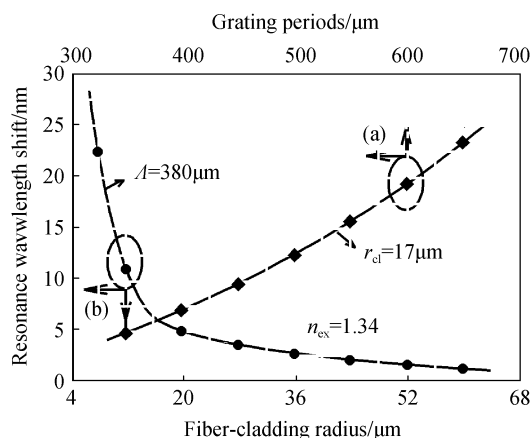


图 5 LPFG 的折射率传感灵敏度
Fig. 5 Variation of refractive-index sensing sensitivity of the LPFG

LPFG 各参量被优化后, 在 $T=25\ ^\circ\text{C}$ 的工作条件下, 环境介质折射率从 1.26~1.38 之间变化, 测量结果如图 6. 从图中知, 环境介质折射率增大, 谐振波长发生蓝移, 折射率的改变与谐振波长偏移值的平均灵敏度为 $n_{ex}/\Delta\lambda=0.012/\text{nm}$. 光谱仪(如 Advantest Q8383)波长分辨率一般为 0.01 nm, 因

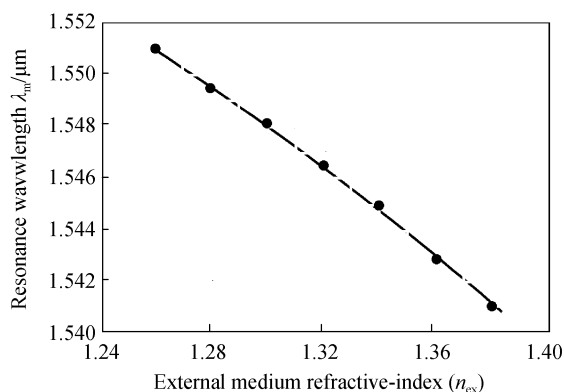


图 6 结构优化的 LPFG 折射率传感灵敏度
Fig. 6 Optimized structure of refractive-index sensing sensitivity of the LPFG

此, 折射率传感灵敏度达到 0.000 12, 即环境介质折射率改变 0.000 12 时, 谐振波长有 0.01 nm 的偏移量, 从光谱仪中检测出来.

3 结论

为了提高 LPFG 对环境介质折射率传感的灵敏度, 基于理论分析和模拟实验, 本文提出 LPFG 的周期 $\Lambda=380\ \mu\text{m}$, 包层半径 $r_{cl}=17\ \mu\text{m}$ 的最佳结构优化. LPFG 用 CO_2 脉冲激光器写入掺锗光纤, 用 HF 酸溶液定位腐蚀包层半径, 折射率传感的谐振波长设计在 $1.55\ \mu\text{m}$ 常规波长附近, 在 $T=25\ ^\circ\text{C}$ 的条件下, 对 1.26~1.38 之间变化的环境介质折射率进行测试, 传感灵敏度达到 0.000 12. 结构优化的 LPFG 折射率传感器获得预期的理想结果.

参考文献

- [1] BARNES J A, BROWN R S, CHEUNG A H, *et al.* Chemical sensing using a polymer coated long-period fiber grating interrogated by ring-down spectroscopy [J]. *Sensors and Actuators B*, 2010, **148**(1): 221-226.
- [2] TOPLISS S M, JAMESA S W, DAVIS F, *et al.* Optical fibre long period grating based selective vapour sensing of volatile organic compounds[J]. *Sensors and Actuators B*, 2010, **143**(2): 629-634.
- [3] LI Jiang, ZHANG Dong-sheng, YUAN Shu-zhong, *et al.* Control of LPG's spectral structure and its application in EDFA gain-flattening equalizer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 810-814.
姜莉, 张东生, 袁树忠, 等. 长周期光纤光栅光谱控制及其在 EDFA 增益平坦中的应用[J]. *光子学报*, 2004, **33**(7): 810-814.
- [4] ZHANG Jian, TANG Xi-ling, DONG Jun-hang, *et al.* Zeolite thin film-coated long period fiber grating sensor for measuring trace organic vapors[J]. *Sensors and Actuators B*, 2009, **135**(2): 420-425.
- [5] WANG Zhi-yong, HEFLIN J R, van COTT K, *et al.* Biosensors employing ionic self-assembled multilayers adsorbed on long-period fiber gratings. *Sensors and Actuators B*, 2009, **139**(2): 618-623.
- [6] JIN Qing-li, HUANG Xiao-hong, WANG Zhen-guo, *et al.* Simultaneous measurement of multi-solute concentrations in mixed solution using fiber fabry-perot resonator interference transmission wavelengths[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2147-2151.
金清理, 黄晓虹, 王振国, 等. 利用光纤 F-P 谐振器干涉透射波长同时测量混合溶液中多溶质浓度[J]. *光子学报*, 2010, **39**(12): 2147-2151.
- [7] JIN Qing-li, YAN Li-fen, WANG Zhen-guo. Real-time high sensitivity variation of solution concentration monitor based on fabry-perot interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 431-435.
金清理, 颜利芬, 王振国. 基于 F-P 干涉仪溶液浓度微变量实时监测系统的研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(3): 431-435.
- [8] MAZINGUE T, KRIBICH R K, ETIENNE P, *et al.* Simulations of refractive index variation in a multimode interference coupler: Application to gas sensing[J]. *Optics Communications*, 2007, **278**(2): 312-316.
- [9] WANG Xiao-ling, XU Zhen-feng, LU Naig-uang, *et al.* Ultracompact refractive index sensor based on microcavity in

- the sandwiched photonic crystal waveguide structure [J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(7): 1725-1731.
- [10] XIA T H, ZHANG A P, GU B, *et al.* Fiber-optic refractive-index sensors based on transmissive and reflective thin-core fiber modal interferometers [J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(10): 2136-2139.
- [11] MENG Hong-yun, WEI Shen, ZHANG Guan-bin, *et al.* Fiber Bragg grating-based fiber sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. *Sensors and Actuators B*, 2010, **150**(1): 226-229.
- [12] 饶云江, 王义平, 朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 260.
- [13] VENUGOPALAN T, YEO T L, SUN T, *et al.* High sensitivity long-period grating-based temperature monitoring using a wide wavelength range to 2.2 μm [J]. *Optics Communications*, 2006, **268**(1): 42-45.
- [14] JIAN P S, SMELA E. Modeling the performance of a long-period Bragg grating ambient-index sensor [J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, **15**(5): 821-828.
- [15] ZHAO W, CLAUS R O. Optical fiber grating sensors in multimode fibers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2000, **9**(2): 212-214.

Optimization of Long-period Fiber Grating for Refractive-index Sensor

JIN Qing-li, HUANG Xiao-hong, YAN Li-fen, WANG Zhen-guo, ZHANG Yao-ju

(College of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China)

Abstract: Optimization structure of cladding radius and grating periods of long-period fiber grating (LPFG) was proposed, in order to achieve a high sensitivity of sensing the refractive-index of the external medium. Based on the coupled-mode theory of the LPFG, a theoretical analyzation was carried out between the cladding radius and grating period, and surrounding refractive-index, respectively. Effects of the variation of the cladding radius and grating period on the refractive-index sensing were discussed. Both of these parameters were found to be equivalently important to control the refractive-index sensing. Optimizing parameters of the grating are $\Lambda = 380 \mu\text{m}$ and $r_{cl} = 17 \mu\text{m}$ in order to achieve a good apply of the LPFG with resonance wavelength in the 1.55 μm common application region. Variation of external medium refractive-index from 1.26 to 1.38 was tested and the achieved refractive-index sensing sensitivity is 0.000 12. Optimization structure of the LPFG achieves a good result.

Key words: Long-period fiber grating; Refractive-index sensor; Grating period; Cladding radius; Structure optimizing