

· 光电器件与材料 ·

## 基于长周期光纤光栅的液位传感研究

欧启标, 曾庆科, 秦子雄, 黄 富, 谢军华

(广西师范大学 电子工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘 要:** 基于简化的光纤三层模型, 从折射率传感和长周期光纤光栅级联特性两方面对应用长周期光纤光栅作液位传感器进行了研究, 当以峰值损耗为传感参量进行测量时, 在没有发生过耦合的情况下, 在一个较宽的范围内, 光栅峰值损耗与进入液体的百分比成很好的线性关系; 而当有过耦合发生时, 光栅峰值损耗与进入液体的百分比不再一一对应。

**关键词:** 长周期光纤光栅; 谐振波长; 峰值损耗; 液位传感

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)05-0023-04

## Liquid Sensor of Long Period Fiber Grating

OU Qi-biao, ZENG Qing-ke, QIN Zi-xiong, HUANG Fu, XIE Jun-hua

(Guangxi Normal University, College of Electronic Engineering, Guilin 541004, China)

**Abstract:** On the basis of simplified three-layer model, and in two aspects such as refractive index sensing and step-index fiber grating property, the study on using long-period fiber grating as liquid level sensor in theory was made. When the resonance peak loss as a sensing parameter is measured, the overcoupling did not happen, within a wider range, the linear relationship of the resonance peak loss and the percent of the LPG immersed in liquid would become very well. In contrast, the grating peak loss did not correspond with the percent of immersed liquid as soon as the overcoupling happened.

**Key words:** long-period fiber grating (LPG); resonance wavelength; loss of peak; liquid level sensing

实验证明, 光纤光栅的透射谱随环境(温度、应力、折射率等)的变化而变化<sup>[1]</sup>, 这种变化不但发生在谐振波长对应的透射率的增减上, 同时它还体现在谐振波长的漂移中. 与传统的机电类传感器相比, 光纤光栅传感器具有灵敏度高、动态范围宽、不受电磁干扰、本质防爆、耐腐蚀、质量轻、体积小、可埋入智能结构等系列优点, 特别适用于强磁场、高辐射、腐蚀性等危险大的环境中, 这使其可以实现对桥梁、大坝、隧道、高层建筑、飞行器、船舶、火车、矿井、油田等的实时监测, 以保证其结构的安全性和可靠性. 因此光纤光栅传感正在日益地受到人们的重视<sup>[2,3]</sup>.

虽然同为光纤光栅, 但布拉格光纤光栅和长周

期光纤光栅的工作机理是不同的. 布拉格光纤光栅实现的是正反向芯层模式的耦合, 这种耦合基本上与外界环境的折射率无关. 而长周期光纤光栅则不同, 它实现的是芯层导模和各阶次包层模式的耦合, 其包层模式的有效折射率除了与芯层的折射率有关外, 还与环境层的折射率有关. 当环境层的折射率发生变化时, 光栅的耦合条件将会发生改变并导致光栅透射谱的变化. 长周期光纤光栅的这一特点使得它在环境污染监测, 浓度传感<sup>[5,6]</sup>, 生物传感<sup>[7]</sup>, 化学传感<sup>[8-10]</sup>方面有着潜在的广泛应用. 目前, 随着在光子晶体光纤上写入的长周期光纤光栅对温度不敏感性的发现, 使在化学化工检测领域应用长周期光纤光栅作液位传感器成为可能.

收稿日期: 2009-07-04

作者简介: 欧启标(1978-), 男, 广西宾阳人, 硕士, 讲师, 研究方向为光纤通信器件与传感器.

### 1 长周期光纤光栅的折射率传感原理

长周期光纤光栅与布拉格光纤光栅的显著区别之一就是在其纤芯的输出谱上出现多个损耗峰,即长周期光纤光栅有多个谐振波长,这些谐振波长的位置由式(1)决定<sup>[4]</sup>

$$\frac{2\pi}{\lambda}(n_{eff}^{co} - n_{eff1,v}^{cl}) - \frac{2\pi}{\Lambda} = 0 \tag{1}$$

式中,  $n_{eff}^{co}$  为纤芯导模的有效折射率;  $n_{eff1,v}^{cl}$  为 1 阶  $v$  次包层模式的有效折射率;  $\Lambda$  表示光栅周期. 对于常规的单模光纤, 纤芯导模的有效折射率只决定于芯层和包层的折射率, 与环境层的折射率  $n_3$  基本无关. 但对于包层模式来说, 它的有效折射率除了与芯层折射率有关外还与环境层折射率  $n_3$  有关. 故当环境折射率变化时, 包层模式的有效折射率将会发生相应的变化, 在光栅周期一定时, 这种变化将会引起谐振波长的漂移和透射率的变化.

图 1 给出了当  $n_3$  分别等于 1.0 和 1.458 时, 康宁 SMF-28 光纤 1 阶前 15 次奇次包层模式的有效折射率随光波长的变化关系. 其中, 实线对应的  $n_3 = 1.0$ , 虚线对应的  $n_3 = 1.458$ . 由图 1 可见, 随着模式次数的增加, 同次包层模式的有效折射率变化曲线的分离越来越明显, 也即越高次的包层模式, 其有效折射率的变化受外界环境的影响越大. 包层模式有效折射率的变化带来的直接影响是光栅谐振波长的漂移.

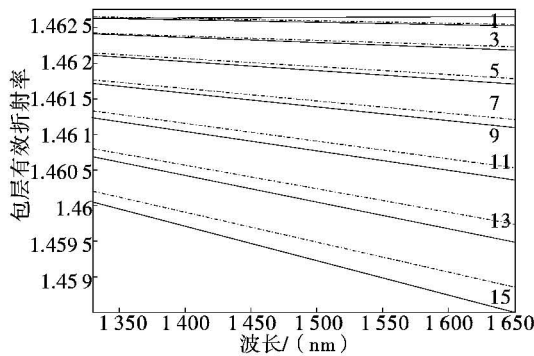


图 1 一阶低次包层模式有效折射率和波长的关系

随着包层模式有效折射率的改变, 纤芯导模和一阶各次包层模式耦合的交流耦合系数也将发生改变, 从而导致光栅透射率的变化. 图 2 给出了在  $n_3$  分别等于 1.0 和 1.458 时, 康宁 SMF-28 光纤 1 阶

低次包层模式的交流耦合系数随光波长的变化关系. 与谐振波长的变化不同, 长周期光纤光栅的交流耦合系数在外界折射率变化时的同阶耦合的曲线分离程度并不是随着耦合次数的增加而单调增加, 而是先增加然后再减小. 需要说明的是, 图 1、图 2 中都只模拟出奇次包层模式耦合的原因在于, 对于常规单模长周期光纤光栅, 在低次情形下只有奇数次包层模式能够与纤芯导模发生有效的耦合.

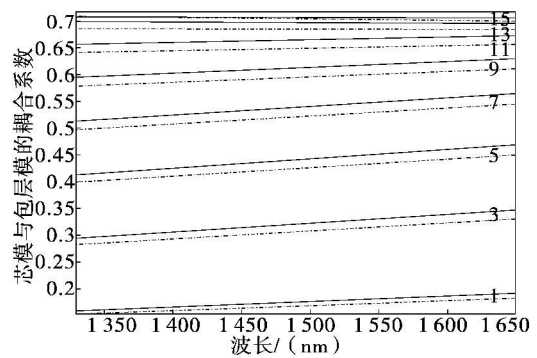


图 2 LPG 的交流耦合系数和波长的关系

为了更好地说明环境折射率的变化对长周期光纤光栅透射谱的影响, 还模拟了当环境折射率由 1.0 逐渐变化到 1.458 时, 康宁 SMF-28 光纤的纤芯导模与一阶 15 次包层模式耦合的谐振波长和透射率的变化, 分别如图 3 和图 4 所示. 随着  $n_3$  的逐渐增加, 长周期光纤光栅的谐振波长逐渐向短波方向漂移, 并且环境折射率越接近光纤包层的折射率, 谐振波长的漂移越大. 对于谐振峰值损耗, 随着环境折射率的增加, 谐振峰值损耗逐渐减少. 由此可见, 环境折射率的改变对 LPG 透射谱的影响是十分明显的.

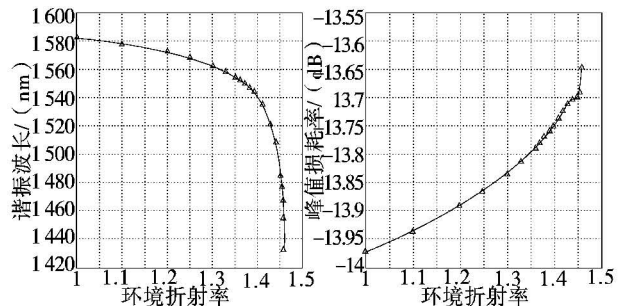


图 3 长周期光纤光栅谐振波长和环境折射率的关系

图 4 长周期光纤光栅谐振峰值损耗与折射率的关系

## 2 级联长周期光纤光栅的理论分析

长周期光纤光栅作折射率传感的一个重要应用就是做液位传感器.将长周期光纤光栅竖直浸入液体,此时的长周期光纤光栅可以看作是 2 块紧密相连的长周期光纤光栅的级联,不过二者包层之外的环境折射率不同.假设输入光栅的光场用  $R_0 = R \cdot (-L/2)$ (纤芯)和  $S_0 = S(-L/2)$ (包层)表示,输出光场用  $R(L/2) = R_2$  和  $S(L/2) = S_2$  表示,则

$$\begin{bmatrix} R_2 \\ S_2 \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \mathbf{F}_2 \cdot \mathbf{F}_1 \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{F}$  为整块光栅总的传输矩阵;  $\mathbf{F}_1$  为未浸入液体的那部分光栅的传输矩阵;  $\mathbf{F}_2$  为浸入部分光栅的传输矩阵.假设边界条件为  $R_0 = 1, S_0 = 0$ .对于第一块光栅,用  $\mathbf{F}^1 = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{11}^1 & \mathbf{F}_{12}^1 \\ \mathbf{F}_{21}^1 & \mathbf{F}_{22}^1 \end{bmatrix}$  表示其传输矩阵,将边界条件应用到式(2),得到

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ S_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{11}^1 & \mathbf{F}_{12}^1 \\ \mathbf{F}_{21}^1 & \mathbf{F}_{22}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)可以得到第一块光栅的透射率的振幅为

$$R_1 = \mathbf{F}_{11}^1 \quad (4)$$

损耗率的振幅为

$$S_1 = \mathbf{F}_{21}^1 \quad (5)$$

再把得到的  $R_1$  和  $S_1$  作为下一块光栅的输入参数.重复上述步骤即可得到第 2 块光栅的  $R_2$  和  $S_2$  并由此求出第 2 块 LPG 的纤芯的透射率.第  $i(i = 1, 2)$  块光栅的传输矩阵的元素为

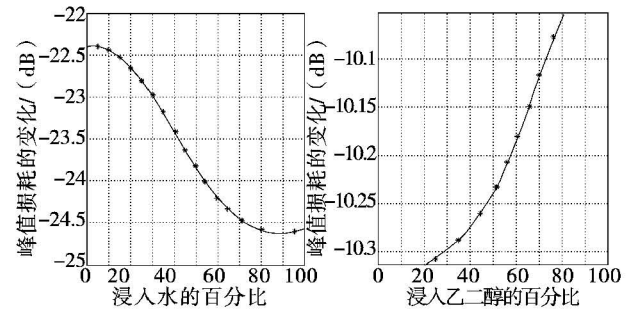
$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{11}^i &= \cos(\gamma_{ci} \Delta l_i) + j \frac{\hat{\sigma}_i}{\gamma_{ci}} \sin(\gamma_{ci} \Delta l_i) \\ \mathbf{F}_{12}^i &= j \frac{\hat{\kappa}_i}{\gamma_{ci}} \sin(\gamma_{ci} \Delta l_i) \\ \mathbf{F}_{21}^i &= j \frac{\hat{\sigma}_i}{\gamma_{ci}} \sin(\gamma_{ci} \Delta l_i) \\ \mathbf{F}_{22}^i &= \cos(\gamma_{ci} \Delta l_i) - j \frac{\hat{\sigma}_i}{\gamma_{ci}} \sin(\gamma_{ci} \Delta l_i) \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $\gamma_{ci} = \sqrt{\kappa_i^2 + \hat{\sigma}_i^2}$ ,其中  $\kappa_i, \hat{\sigma}_i$  分别为第  $i$  块光栅的交、直流耦合系数<sup>[11]</sup>;  $\Delta l_i$  为第  $i$  块光栅的光栅长度;  $L = \sum_{i=1}^2 \Delta l_i$  为整个光栅的长度;  $j$  为虚数单位.

## 3 长周期光纤光栅液位传感器

当光栅竖直放置固定后,液面的变化将使得 2

个光栅的长度会发生相应变化,其中一个长度增加而另一个长度减少,其最后的透射率都由式(3)求出.下面研究长周期光纤光栅分别浸入水(折射率为 1.333)和乙二醇(折射率为 1.426)的百分比与峰值损耗的关系.分 2 种情况研究,一种是没有过耦合发生,另一种是有过耦合发生的情况.所用的光纤参数为  $n_1 = 1.4681, n_2 = 1.4628$  分别为光纤纤芯和包层的折射率,  $a_1 = 4.15 \mu\text{m}, a_2 = 62.5 \mu\text{m}$  分别为光纤芯层和包层的半径.



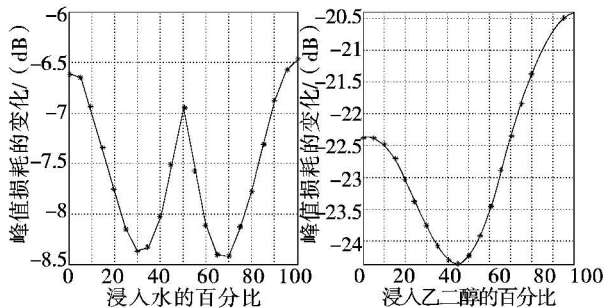
(a)浸入水中 (b)浸入乙二醇中

图 5 浸入水、乙二醇中的长周期光纤光栅的百分比与峰值损耗的关系图

图 5a 给出了在没有过耦合发生的情形下, LPG 浸入水的百分比与谐振峰值损耗的关系,模拟所用的光栅长度为 12 cm.由图 5a 可以看出,随着光栅浸入水的百分比的增加,整块光栅的峰值损耗也逐渐增加,并且在 20%~70% 的范围内二者呈现出较好的线性关系.在同样没有过耦合发生的情形下,将 LPG 浸入乙二醇.与浸入水中不同的是此时光栅的峰值损耗随着光栅浸入的百分比的增加而减少.虽然如此,在 35%~80% 的范围内,光栅浸入的百分比与光栅的峰值损耗仍然呈现出很好的线性关系,如图 5b 所示.总的来说,无论将 LPG 浸入水还是浸入乙二醇,在光栅总长的 50% 左右的范围内,光栅的峰值损耗与浸入液体的百分比成较好的线性关系,这与国外报道的相一致.

图 6 给出了有过耦合发生的情形下长周期光纤光栅的峰值损耗与浸入水和浸入乙二醇的百分比的关系.由图 6 可清楚看到,在有过耦合发生时随着长周期光纤光栅浸入液体的长度的增加,长周期光纤光栅的透射率与浸入液体的百分比不再一一对应,也即此时的 LPG 并不适合用来作液位传感器.所以,在应用长周期光纤光栅作液位传感器时,除了选

择拥有合适参数的光纤外还应注意光栅的长度,以防止过耦合的发生。



(a) 浸入水中 (b) 浸入乙二醇中  
图6 浸入水、乙二醇中的长周期光纤光栅的百分比与峰值损耗的关系图

## 4 结 论

从简化的光纤三层模型出发,在理论上对应用长周期光纤光栅作液位传感器进行了研究. 研究表明,应用长周期光纤光栅作液位传感器能对液体液面进行实时、精确的测量. 另外,在制作长周期光纤光栅液位传感器时,除了要选择拥有合适参数的光纤外,还要注意控制写入的光栅长度,以防止过耦合的发生. 这一结果对在化学化工检验检测领域应用 LPG 作液位传感器有一定的参考价值。

### 参考文献

[1] Vikram Bhatia, A M Vengsarkar. Opti-cal fiber long-pe

riod grating sensors[J]. OPTICAL LETTERS, 1996, 21 (9):692 - 694.

- [2] 姜德生,何伟. 光纤光栅传感器应用概况[J]. 光电子·激光, 2002, 13(4):420 - 430.
- [3] 饶云江. 长周期光纤光栅研究现状分析[J]. 电子科技大学学报, 2005, 24(15): 884 - 873.
- [4] T Erdogan. Cladding-mode resonances[J]. J. Opt. Soc., 1997, (14)8:1760 - 1773.
- [5] Xiangfeng Chen, Kaining Zhou, et al. Detial biochemical sensors based on long period fibre gratings uv-inscribed in D-fibre with enhanced sensitivity by HF etching process [J]. Proc. of SPIE, 2004, 5486: 149 - 187.
- [6] Jian Yang, Chang-qing Xu, Cheng-lin Xu, et al. Immo-bieized DNA biosensorbased on evane-scent wavelong period fiber gratings[J]. Proc. of SPIE, 2004, 5578: 109 - 116.
- [7] Gilbert E Pacey, sean D Puckett, et al. Detection of DNA chimica Acta[J]. 2005, 5(33):135 - 139.
- [8] Yanping Xu, zhengtian Gu, et al. Stru-cture optimization of long-period fiber grating gas-sensing sensors[J]. Proc of SPIE, 2004, 5547:49 - 56.
- [9] R Falate, E Cacao Jr, et al. Optical fiber sensor for gaso-tine blend quality control[J]. Proc. of SPIE, 2004, 5622: 194 - 199.
- [10] Beatrgs M Lacquet, Poeter L Swart, et al. Long-period grating with sol-gel coating for co2 detection[J]. Proc. of SPIE, 2004, 5502:287 - 290.
- [11] T Erdogan. Fiber Grating Spectra[J]. Journal of light-ware technology , 1997(8):1277 - 1297.

(上接第3页)

分析得出:对光的折射现象,旋转双光楔可以简化为一个折射角不断变化的单光楔,等价光楔的折射角和双光楔的转角有对应的关系. 另外,通过出射光的夫琅禾费衍射分析算出了像平面上光场分布. 结合旋转双光楔的折射特性和夫琅禾费衍射的知识,分析得到旋转光楔对像面光斑运动的控制作用,从而能达到按需扫描的效果。

### 参考文献

- [1] 徐惠真,邱怡申,徐斌. 改善外腔半导体激光器调谐特性的新方法[J]. 应用光学, 2008, 29(6): 975 - 977.
- [2] Mao wenwei. Error and adjustment of reflecting prisms [J]. Optical Engineering, 1997, 36(12): 3367 - 3371.

- [3] Hariharan P. Optical Holography[M]. LONDON: Cambridge university Press, 1986:124 - 127.
- [4] 刘忠永,蔡邦维,吕百达. 用正交光楔阵列获得连续可调的均匀方形光斑[J]. 中国激光, 1996, A23(8):702 - 706.
- [5] 贺磊,袁家虎,李展,等. 双光楔高精度角度发生器设计[J]. 光电工程, 2002, 29(6):46 - 49.
- [6] Etsuko Kobayashi, Kim Daeyong, Ichiro Sakuma, et al. A new wide-angle view endoscopic robot using wedge prisms[C]// International Congress Series 1230, 2001: 149 - 153.
- [7] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2008:50 - 52, 347 - 348.
- [8] 梁瑞生,吕晓旭. 信息光学[M]. 2版. 北京:电子工业出版社, 2008:79 - 81.