

# LPFG包层模对环境折射率的灵敏度分析

王翔, 李新碗, 陈建平

(上海交通大学“区域光纤通信网与新型光通信系统”国家重点实验室, 上海 200240)

[摘要] 从理论和实验两个方面分析了长周期光纤光栅(LPFG)前3阶包层模的透射谱特性与光栅外包层厚度间的关系。LPFG的谐振波长漂移范围随着其外包层厚度的减小而扩大,同时,高阶耦合模LP<sub>04</sub>模的谐振波长漂移强于低阶模。研究表明,通过设计光纤光栅结构能改善其各阶包层模谐振峰对环境折射率的灵敏度。

[关键词] 光纤; 光纤光栅; 长周期光纤光栅

[中图分类号] TN253 [文献标识码] B [文章编号] 1006-1908(2009)02-0038-03

## The Sensitivity Analysis of the Cladding Modes of LPFG on the Ambient Refractive Index

WANG Xiang, LI Xin-wan, CHEN Jian-ping

(State Key Lab. of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The relation between the transmission spectrums of the first three orders of cladding mode and the outer cladding thickness of the LPFG is analyzed theoretically and experimentally. The resonance wavelength shift of LPFG is increased with the reduction of the outer cladding thickness, in the same time, the resonance wavelength shift of higher order coupling mode, LP<sub>04</sub> mode, is stronger than that of lower order modes. The research shows certain LPFG structure can improve the sensitivity of the resonance peaks of cladding modes on ambient refractive index.

**Key words:** optical fiber; fiber optic grating; long-period fiber grating (LPFG)

### 0 引言

长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)是一种被广泛应用于光通信和传感器领域的光纤无源器件。利用其基模和包层模之间的耦合特性,LPFG可对拉力、温度和环境介质折射率等物理环境变化做出响应。

LPFG传感器对于环境折射率的灵敏度与光纤结构有着密切的关系,针对光纤结构优化设计的研究也逐渐开展并引起重视,例如采用在LPFG包层包裹高折射率薄膜的方式,有效地将传输谱的能量

从包层耦合到高折射率薄膜中<sup>[1-3]</sup>;恰当地选取LPFG的周期,以扩大谐振波长的漂移范围<sup>[4]</sup>;采用腐蚀方式减小包层厚度,以获得更深的谐振峰<sup>[5]</sup>。

本文从理论和实验两方面验证了通过减小LPFG外包层的厚度,可以增强其对环境折射率灵敏度。

### 1 理论分析

光纤的波导结构由折射率分别为 $n_{co}$ ,  $n_{cl}$ 和 $n_{ex}$ 的纤芯、包层和环境介质三部分组分,如图1所示。

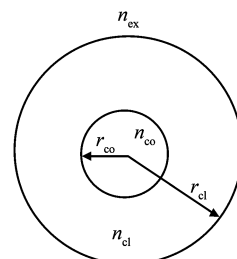


图1 光纤折射率分布的截面图

- [收稿日期] 2008-11-18
- [基金项目] 国家863计划资助项目(2006AA01Z242, 2007AA01Z275);国家自然科学基金资助项目(ID90704002)
- [作者简介] 王翔(1984-),男,上海交通大学“区域光纤通信网与新型光通信系统”国家重点实验室硕士研究生。
- [作者地址] 上海市普陀区志丹路97弄5号1704室, 200065

对于典型的 Corning SMF-28 单模光纤而言,基模场基本被约束在纤芯中,在没有折射率微扰的情况下,大部分能量集中在纤芯附近,很难被耦合出包层。我们利用氢氟酸腐蚀 Corning SMF-28 单模光纤包层以减小包层直径,图 2 为光纤传输能量与光纤包层直径的关系曲线。

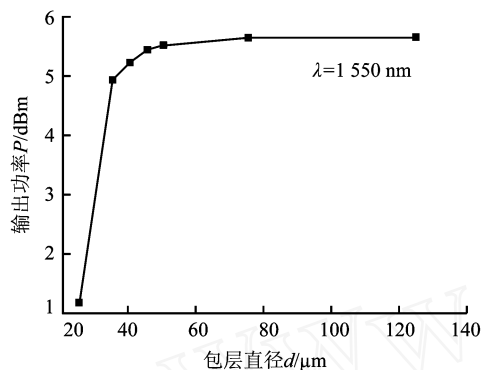


图 2 光纤传输能量与光纤包层直径的关系曲线

由图 2 可见,包层直径从原先的 125  $\mu\text{m}$  减小到 40  $\mu\text{m}$  的过程中,在 1550 nm 波长处的输出功率基本没有变化;当继续减小包层直径至 25  $\mu\text{m}$  时,输出功率有明显的下降,从原来的 5.64 dBm 下降到 1.17 dBm。利用减小包层直径的方法在其他波长观测点,例如 980 nm,1310 nm 处也能得到同样的变化趋势,因此普通单模光纤的纤芯模和包层模之间的耦合是波长无关的。

然而,利用紫外光写入法在光纤的芯层引入周期性的折射率微扰,改变了原本纤芯模和包层模之间正交的状态<sup>[6]</sup>,不仅能够增强从纤芯向包层的耦合,而且能够在透射谱中观察到明显的谐振峰,实现了耦合过程的波长选择功能。

由有限包层直径光纤光栅的色散方程<sup>[7]</sup>可知,影响包层模有效折射率的因素主要有:包层半径  $r_{cl}$ 、包层折射率  $n_{cl}$  以及环境折射率  $n_{ex}$ 。通过减小包层的厚度,可以降低包层折射率  $n_{cl}$  对于包层模  $LP_{0m}$  有效折射率  $n_{0m}$  的影响,提高环境折射率  $n_{ex}$  对  $n_{0m}$  的作用,进而提高 LPGF 对于环境折射率的灵敏度。

为了避免分析过程中典型的光纤三层结构引入的复杂计算,我们借鉴了常用的无芯近似计算方法,由于对单模光纤而言,纤芯半径远小于包层半径,即  $r_{co} \ll r_{cl}$ ,可以假设  $r_{co} = 0$ 。无芯近似理论将纤芯模看成是一种包层模,根据其理论,谐振波长的漂移量和外界环境折射率的关系可由以下等式近似描述<sup>[8]</sup>:

$$= \frac{u^2}{8} \frac{m_0}{n_{cl}^3 r_{cl}^3} \left( \frac{1}{\sqrt{n_{cl}^2 - n_{ex0}^2}} - \frac{1}{\sqrt{n_{cl}^2 - n_{ex}^2}} \right) \quad (1)$$

式中  $u$  为贝塞尔函数的第  $m$  阶根,  $m_0$  为  $LP_{0m}$  包层模的谐振波长,  $\Lambda$  为 LPGF 周期,  $n_{ex0}$  和  $n_{ex}$  为变化前后的环境折射率。由式(1)可以看出,  $r_{cl}$  和  $\lambda$  成反比,因此包层半径越小,谐振波长随环境折射率变化的漂移就越明显。同时,由于贝塞尔方程的根是递增数列,零阶贝塞尔函数的前四个根分别为: 2.405, 5.520, 8.654 和 11.792。第  $m$  阶贝塞尔函数的根对应了  $LP_{0m}$  模和  $LP_{01}$  模之间的耦合,从理论上解释了高阶模的谐振波长漂移强于低阶模的现象。

## 2 实验结果及其分析

本实验中所用到的 LPGF 是在 Corning SMF-28 单模光纤上刻蚀形成的,光栅长度为 5 cm,光栅周期为 625  $\mu\text{m}$ 。为了减小包层的半径,采用了浓度为 10% 的氢氟酸腐蚀光栅包层。实验如图 3 所示,光源采用的是 MG922A 白光光源,并利用光谱分析仪来观察 LPGF 的透射谱。



图 3 LPGF 腐蚀实验系统

在氢氟酸腐蚀前,我们测量了 LPGF 透射谱在环境介质从空气 ( $n_{air} = 1$ ) 转换成无水乙醇 ( $n_{ethanol} = 1.336$ ) 过程中谐振波长的漂移量。实验结果显示:  $LP_{04}$  模的谐振波长从 1577.6 nm 跳变到 1576 nm,  $LP_{03}$  模的谐振波长从 1491.2 nm 跳变到 1489.6 nm,而  $LP_{02}$  模的谐振波长基本没有发生变化。将 LPGF 浸入 10% 的氢氟酸溶液中腐蚀 20 min 后取出,经过冲洗晒干,再次测量当环境介质从空气转换成无水乙醇过程中包层模谐振峰的漂移量,重复上述步骤两次,并记录每一步骤中得到的谐振峰漂移量。经过显微镜观察可以大致估算出 10% 的氢氟酸溶液对于光纤的腐蚀速度约为 0.25  $\mu\text{m}/\text{min}$ ,因此在每一步中我们都可以得到 5  $\mu\text{m}$  的包层减小量。

图 4 为  $LP_{02}$ ,  $LP_{03}$  和  $LP_{04}$  包层模的谐振波长漂移量与包层半径的关系,并将理论值和实验测量值进行了比对,理论值由式(1)推出。由图 4 可观察到,包层模的谐振峰漂移量均与包层半径成反比,但斜率不同,  $LP_{04}$  模的斜率绝对值明显大于  $LP_{03}$  和  $LP_{02}$  模。这表明包层半径的减小增强了 LPGF 对于环境折射率的灵敏度;除此之外,减小包层半径使不同包层模灵敏度得到了不同程度的改善,  $LP_{04}$  模的谐振峰漂移量从原来的 1.6 nm 增加到了 8 nm;

LP<sub>03</sub> 模的谐振峰漂移量则从 1.6 nm 改善到 2.4 nm; LP<sub>02</sub> 模则未能在整个腐蚀过程中表现出明显的灵敏度提高。

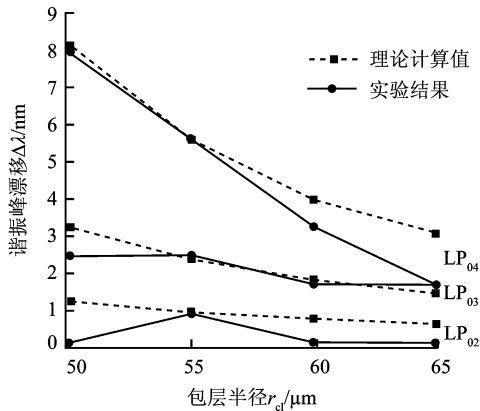


图 4 LP<sub>02</sub> ~ LP<sub>04</sub> 阶包层模谐振峰漂移随包层半径的变化

由图 4 可见,虽然低阶模 LP<sub>02</sub> 的理论分析值和实验结果有些许出入,但 LP<sub>03</sub> 和 LP<sub>04</sub> 模的理论值与实验结果吻合度比较高,而且可以从三组数据中明显观察到随着包层厚度的减小,各阶模灵敏度的改善趋势。引起实验误差的主要原因包括以下几个方面:a. 无芯近似所作的假设令 的理论值略高于其实际值;b. 10% 的氢氟酸溶液对 LPFG 的腐蚀可能会造成光栅表面不均匀,进而影响模式间的相互耦合;c. 氢氟酸溶液中的杂质可能会影响整个腐蚀的过程。

无芯近似理论推导过程中一系列近似计算都使的计算值高于实际值。当环境折射率从  $n_{ex0}$  增加到  $n_{ex}$  时,  $m$  阶包层模的有效折射率也从  $n_{0m}$  增加到  $n_{0m}$ , 由此可得谐振波长扰动值:

$$\Delta\lambda = \lambda \left( \frac{n_{0m} - n_m}{n_{0m}} \right) \quad (2)$$

由无芯近似得出的两层结构波导色散方程以及边界条件可推出:

$$n_{0m}^2 - n_m^2 = \frac{2u^2}{k^3 r_{cl}^3} \left( \frac{1}{\sqrt{n_{cl}^2 - n_{ex0}^2}} - \frac{1}{\sqrt{n_{cl}^2 - n_{ex}^2}} \right) \quad (3)$$

$$n_{0m}^2 - n_m^2 = (n_{0m} + n_m)(n_{0m} - n_m) = \frac{2n_{cl} n_{0m}}{2n_{cl} n_{0m}} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)可得:

$$\Delta\lambda = \lambda \frac{n_{0m} - n_m}{n_{0m}} = \frac{\lambda}{2n_{cl}} \left( \frac{n_{0m}^2 - n_m^2}{n_{0m}} \right) \quad (5)$$

式(4)中做了两个近似:  $n_{0m} > n_m$  和  $n_{cl} > n_{0m}$ 。而在实验操作过程中,  $n_{0m} < n_m$ ,  $n_{cl} < n_{0m}$ , 这使得 的计算值大于实际值,这也解释了图4中计算值略大

于实验结果的原因。

### 3 总结

通过理论分析和实验证明了腐蚀 LPFG 包层后, LP<sub>02</sub> ~ LP<sub>04</sub> 模对于环境折射率的灵敏度有了不同程度的改善。通过减小包层半径,能够显著改善 LPFG 的灵敏度并扩大谐振峰的变化范围,且 LP<sub>04</sub> 模的灵敏度改善优于低阶模。

将这种技术与其他灵敏度改善技术相结合,共同应用到 LPFG 上,例如本文先前提到的覆盖高折射率层结构(HRI)来最大化谐振波长的变化范围,可构成高性能的环境折射率传感器。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] REES N D, JAMES S W. Optical fiber long-period gratings with Langmuir-Blodgett thin-film overlays [J]. Optics Letters, 2002, 27(9): 686-688.
- [2] CUSANO A, IADICICCO A, PILLA P, et al. Mode transition in high refractive index coated long period gratings[J]. Optics Express, 2006, 14(1): 20-34.
- [3] CUSANO A, IADICICCO A. Cladding mode reorganization in high-refractive index-coated long-period gratings: effects on the refractive-index sensitivity[J]. Optics Letters, 2005, 30(19): 2536-2538.
- [4] PATRICK H J, KERSEY A D, FRANK B. Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction [J]. J Lightwave Technology, 1998, 16(9): 1606-1612.
- [5] YANG Min-wei, CHEN Jian-ping. Experimental study on the spectral behavior of an asymmetric long period fiber grating via erosion[C]// Proceedings of Optical Fiber Communication and Optoelectronics Conference. 2007, SC1.SC2.4: 106-108.
- [6] ERDOGAN T. Fiber grating spectrum [J]. J Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [7] 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.
- [8] JIAN P S, SMELA E. Modeling the performance of a long-period Bragg grating ambient-index sensor analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction[J]. Smart Materials And Structures, 2006, 15:821-828.