

文章编号:1004-4213(2010)s1-0054-5

# 侧边抛磨光纤光栅的数值模拟和实验研究

尹丹<sup>1</sup>, 杨明红<sup>1</sup>, 代吉祥<sup>1</sup>, 李小兵<sup>1</sup>, 刘宏亮<sup>1</sup>, 唐洁媛<sup>2</sup>, 陈哲<sup>2</sup>

(1 武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070)

(2 暨南大学 光电工程研究所, 广州 510632)

**摘 要:** 本文设计并建立侧边抛磨光纤 Bragg 光栅的光学模型, 通过改变剩余包层的厚度以及抛磨区材料的折射率, 模拟计算光栅谐振波长的偏移量以及光栅光谱反射率的变化. 实验结果表明, 当抛磨区材料折射率越接近光纤纤芯折射率, 以及抛磨程度越深(3  $\mu\text{m}$  以内), 抛磨区材料的折射率的微小变化也会引起光栅谐振波长与光栅光谱反射率明显变化.

**关键词:** 侧边抛磨; 光纤 Bragg 光栅; 谐振波长; 光谱反射率

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb201039s1.0054

## 0 引言

在传感领域里, 普通的单模光纤 Bragg 光栅主要用于应力传感以及温度传感, 但包层对外界环境变化不敏感. 根据有限包层半径光纤理论, 当包层直径小于 16  $\mu\text{m}$  时, 单模光纤 Bragg 光栅的导模有效折射率发生明显变化, 在包层外再加上外包层, 通过改变外包层的折射率可以实现对 Bragg 波长的调谐<sup>[1]</sup>. 该理论中需要对光纤光栅的整个包层进行腐蚀, 国内外学者对腐蚀型光纤光栅的特性也进行了一些研究<sup>[2-3]</sup>, 然而经腐蚀过的光纤光栅比较脆弱, 给实际应用带来不便. 随着侧边抛磨光纤技术的发展, 在已有的侧边抛磨光纤的理论和实验研究基础上<sup>[4-5]</sup>, 人们开始将侧边抛磨技术应用在光纤光栅的传感特性研究中<sup>[6-8]</sup>. 本文是先利用多层圆柱波导模型, 对侧边抛磨区覆盖不同折射率的材料, 改变抛磨程度, 模拟计算谐振波长的偏移量和光谱反射率的变化情况, 然后通过实验测试, 对结果进行分析.

## 1 侧边抛磨光纤光栅的折射率传感原理与光学模型

### 1.1 侧边抛磨光纤光栅的折射率传感原理

由耦合模理论可得, 当满足相位匹配条件下, 光栅的 Bragg 波长为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中,  $\lambda_B$  为 Bragg 波长,  $n_{\text{eff}}$  为光纤导模的有效折射率, 它与光纤光栅区域的几何结构、纤芯折射率和包

层折射率相关,  $\Lambda$  为光栅周期. 由式(1)可以看出, 纤芯导模有效折射率和光栅周期两者之中任何一个发生变化, 谐振波长也将出现偏移. 对于侧边抛磨光纤光栅(Side Polished Fiber Bragg Grating, SPFBG), 影响 Bragg 波长的偏移的主要是有效折射率的变化, 因为在光栅中不存在应力, 而且温度也是固定的, 就可以忽略光栅周期的变化, 于是 Bragg 波长的偏移量可以表示为

$$\Delta\lambda_B \cong 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda \quad (2)$$

光纤光栅的基本光学参数除了谐振波长外, 还有反射率、透射率以及反射带宽等. 反射率的表达式为

$$R_{\text{max}} = \tan h^2(KL) \quad (3)$$

由式(3)可以得出光纤光栅的峰值反射率与光纤光栅的栅长  $L$ , 正向和反向基模间耦合系数  $K$  之间有着直接的关系, 随着栅长  $L$  逐渐增加, 反射率  $R$  逐渐变大, 反射光谱宽度逐渐变窄, 由于模间耦合系数  $K = i2\pi\Delta n_{\text{eff}}/\lambda$ , 是和光纤光栅反射率息息相关的参数, 有效折射率的变化量是影响光纤光栅反射率的另一个重要因素, 随着有效折射率的变化量增大, 光纤光栅反射率  $R$  随之增大, 反射光谱宽度逐渐变宽.

以上是结合 Bragg 波长偏移以及反射率变化来对外界环境折射率进行测量的原理, 由此我们在侧边抛磨区填充不同折射率的材料后制备的光纤光栅可应用于光纤 Bragg 光栅的折射率波长调制和折射率传感器.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60908020)资助

第一作者: 尹丹(1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术与应用. Email: yindan\_honey@163.com

导师(通讯作者): 杨明红(1975-), 男, 教授, 主要研究方向为薄膜光电子器件与光纤传感. Email: minghong.yang@whut.edu.cn

收稿日期: 2010-06-10; 修回日期: 2010-09-26

## 1.2 侧边抛磨光纤光栅的光学模型

本文采用 Rsoft 软件中的 GratingMOD 模块来模拟侧边抛磨光纤 Bragg 光栅. 在 GratingMOD 里,可以定义周期性的微扰来设计光栅结构,与 Rsoft 的 Bi-Directional Beam Propagation Method (BPM)和 Finite Difference Time Domain (FDTD)相比较,具有更快的仿真速度,同样也适用于二维和三维结构. GratingMOD 可以设计并仿真光纤 Bragg 光栅、增益平坦器、色散补偿器、宽带或窄带滤波器等等. GratingMOD 的理论依据是耦合模理论和传输矩阵,耦合模理论在正交模式的基础得出光栅中耦合模方程,而传输矩阵方法用来解耦合模方程,这也是目前对光纤光栅普遍使用的研究方法.

本文采用三维 Fiber 结构,将一侧包层近似为半无限大,在另一侧包层区域内添加新的波导结构来模拟侧边抛磨区材料,波导的折射率对应涂覆材料的折射率,波导的宽度对应抛磨区厚度,波导离纤芯的距离对应剩余包层的厚度也就是侧边抛磨程度,由此建立相应的光学模型.

## 2 仿真计算及结果分析

本文中仿真计算所使用的侧抛光纤光栅为 Bragg 光栅,具体参量如下:纤芯的折射率  $n_{co} = 1.465$ ,包层折射率  $n_{cl} = 1.46$ ,光栅区长度  $L = 10.6 \text{ mm}$ ,光栅周期  $\Lambda = 0.53 \mu\text{m}$ ,光栅折射率采用正弦调制,直流改变量是  $0.0003$ . 抛磨区材料的折射率分别选取为  $1.33, 1.361, 1.42, 1.44, 1.45, 1.46, 1.461, 1.462, 1.463, 1.464, 1.465, 1.4651 \sim 1.4659, 1.466, 1.48$ .

### 2.1 无侧边抛磨的光纤光栅仿真

当光纤光栅侧边没有抛磨时,即侧边没有填充材料,根据设计的光学模型,计算得到的光谱图如图 1.

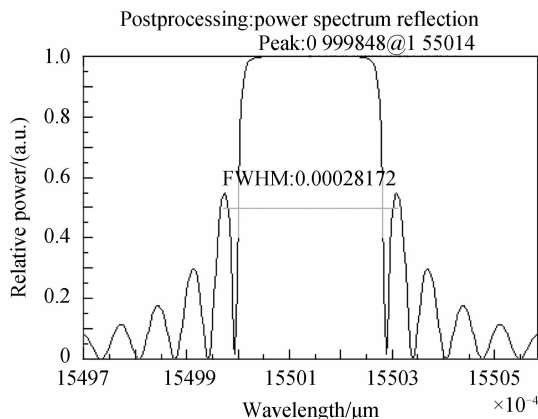


图 1 未侧抛光纤光栅的光谱图

Fig. 1 Optical spectrum of a standard FBG without side-polishing

图 1 中,可以观察到没有侧边抛磨的光纤光栅

其谐振波长为  $1550.14 \text{ nm}$ ,反射率接近 1,反射谱带宽为  $281.72 \text{ pm}$ ,这也符合传感器带宽的理论带宽的要求.

### 2.2 未覆盖材料,侧边抛磨光纤光栅的参量随抛磨程度的变化

没有覆盖材料时,设置图 1 中蓝色波导的折射率为 1,即为空气的折射率,只改变剩余包层的厚度,其变化范围选择在  $0 \sim 20.5 \mu\text{m}$  之间,每隔  $0.5 \mu\text{m}$  计算一次,得到的谐振波长与抛磨程度的关系如图 2.

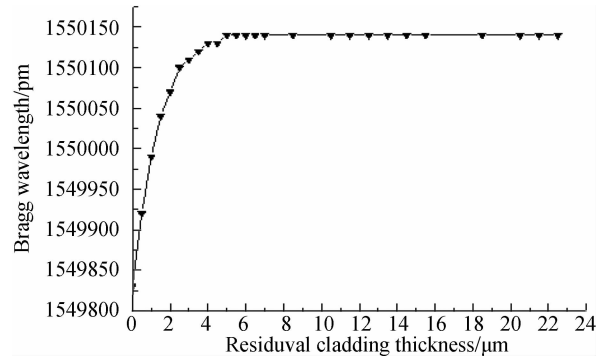


图 2 谐振波长与抛磨程度之间的变化关系

Fig. 2 Residual cladding thickness vs. Bragg wavelength

图 2 中,横坐标代表剩包层的厚度,纵坐标代表谐振波长.从上图可以看出,侧边研磨面离光纤光栅的纤芯表面越接近,谐振波长越短,当研磨到纤芯表面时,谐振波长朝短波长方向偏移约  $300 \text{ pm}$ .这表明侧边抛磨区越接近纤芯,外界(空气)对光栅折射率的影响越大,导致基模的有效折射率减小,布喇格波长减小.光纤光栅反射带宽与抛磨程度的关系则如图 3 所示.

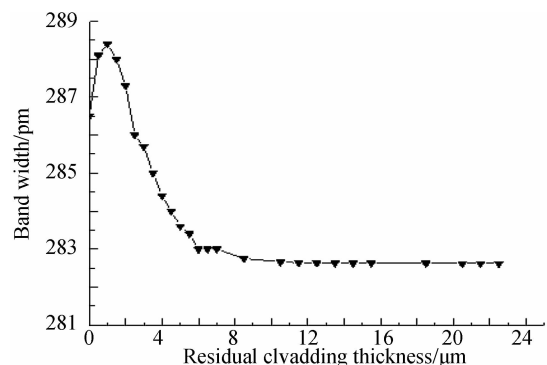


图 3 反射带宽与抛磨程度之间的变化关系

Fig. 3 Residual cladding thickness vs. bandwidth

在图 3 中,反射带宽的变化并不是很大,大约为  $6 \text{ pm}$ ,但是剩余厚度从  $0 \mu\text{m}$  到  $1 \mu\text{m}$  过程中,带宽逐渐增加,从  $1 \mu\text{m}$  之后带宽开始减小,直至  $282.6 \text{ pm}$  后保持不变.因为反射带宽与有效折射率的变化量成正比,表明在该模型中,当剩余厚度为  $1 \mu\text{m}$  时,外界影响光栅纤芯的最小折射率与最大折射率之差达到最大,但此时,光栅的有效折射率并不是最大的,所以其谐振波长并没有达到最大值.

### 2.3 相同抛磨区厚度,不同侧抛程度下,侧边抛磨光纤光栅参量随抛磨区材料折射率的变化

设定抛磨区厚度为  $10\ \mu\text{m}$ , 当剩余包层的厚度为  $0\ \mu\text{m}$ , 即模拟侧边抛磨到纤芯, 按照上述材料折射率的选取值, 仿真得到光栅谐振波长与上述折射率的对应曲线图. 为了对比分析, 按照上述步骤, 仿真出剩余包层厚度分别为  $1\ \mu\text{m}$ ,  $3\ \mu\text{m}$ ,  $5\ \mu\text{m}$  时的谐振波长对抛磨区处材料折射率的响应特性, 得到最终仿真结果如图 4.

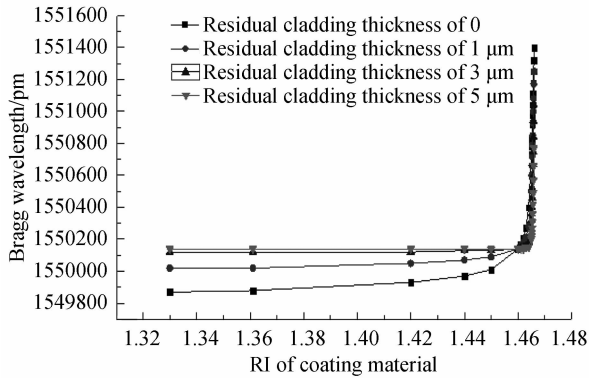


图 4 相同抛磨区厚度,不同侧抛程度的光栅谐振波长对抛磨区材料折射率响应

Fig. 4 Refractive index vs. Bragg wavelength with the same side polished width and different side polished depth

从图 4 中可以看出, 抛磨区材料的折射率变化对光栅谐振波长产生了影响, 折射率变大时, 波长向长波长方向偏移. 从四种抛磨程度下的响应曲线均可以看出同一抛磨程度下, 折射率从 1.33 变化到 1.45 时, 对谐振波长的影响较小, 而在 1.45 到 1.466 时, 谐振波长变化范围很大, 当侧边抛磨区与纤芯重合时, 随着折射率的增大, 谐振波长变化了  $1.43\ \text{nm}$ , 而且在 1.45 到 1.466 时, 即使材料折射率发生非常微小的变化, 谐振波长也会发生很明显的偏移, 这表明此范围内, 折射率调谐灵敏度很大. 另外, 剩余包层厚度越小, 折射率的调谐灵敏度越高.

上面仿真计算了谐振波长随折射率变化的关系. 计算过程中, 也可以发现, 波长向长波长偏移的同时, 反射率逐渐减小, 结果如图 5.

图 5 中, 如果去除  $(1.48, 0)$  这个点, 我们发现侧抛程度越深, 反射率随涂覆材料折射率变化越明显, 但均会在相对较小的折射率范围内保持不变. 当折射率大到 1.48 后, 反射率几乎为 0, 表明外界涂覆材料的存在, 使其耦合系数急剧减小, 破坏了光栅中正反向基模的耦合. 对该模型所模拟的光器件, 导模计算仿真结果可以明显看出绝大部分光场都转移到了添加有涂覆材料的侧抛区, 如图 6.

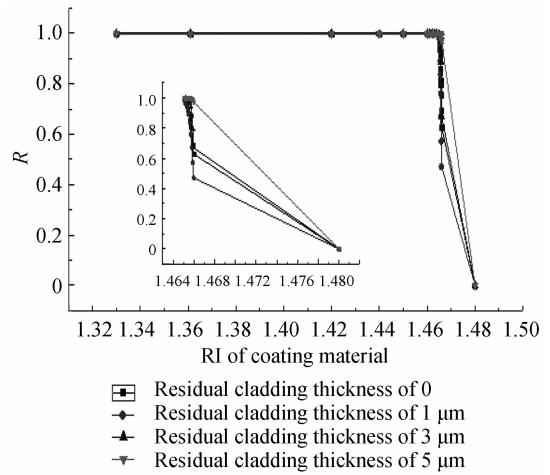


图 5 反射率与折射率的关系变化图

Fig. 5 Refractive index vs. Reflectance

Computed transverse mode profile ( $m=0, n_{\text{eff}}=1.4636611$ )

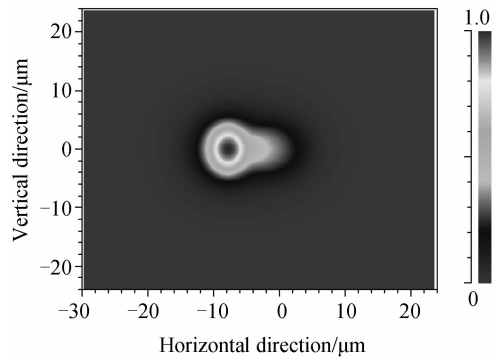


图 6 折射率为 1.48 时导模计算

Fig. 6 The simulated results about the fundamental core mode when refractive index of coating material is 1.48

对比图 6 和图 7 得知, 折射率变大, 原先集中在光栅区的光场偏移到了侧抛区, 表现为光斑的左偏, 这也能够说明反射率下降.

Computed transverse mode profile ( $m=0, n_{\text{eff}}=1.462396$ )

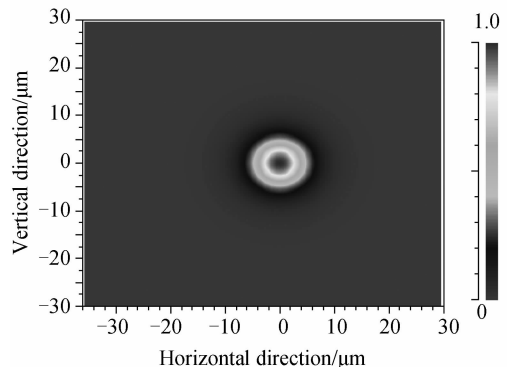


图 7 没有侧抛时模型的导模计算结果

Fig. 7 The simulated results about fundamental core mode of an unside-polished FBG

## 3 实验结果与分析

针对第三部分计算仿真的结果, 我们通过实验来进一步说明光栅抛磨区材料的折射率对光栅传输特性的影响. 实验中所用的光纤光栅是本实验室自

行研制的谐振波长为 1 552.240 nm 的单模光纤光栅,然后利用轮式法侧抛到离纤芯表面 0.5  $\mu\text{m}$  处制成侧抛光纤光栅.为了获得具有不同折射率的涂覆材料,配置了浓度分别为 86.3%,78.3%,71.6%,64.3%,58.3%,52.3%,44.8%,22%,0 的甘油,根据甘油的浓度与其折射率的对应关系<sup>[9]</sup>,得到上面几种浓度溶液的折射率分别是 1.452 4,1.439 8,1.429 3,1.418 9,1.41,1.401,1.385,1.36,1.33(对应波长为 1 550 nm 的情况下).将侧抛光纤光栅分别浸在上述几种浓度的甘油中,利用光谱分析仪观察并记录对应的光谱如图 8.重复三次实验结果如图 9 和图 10.

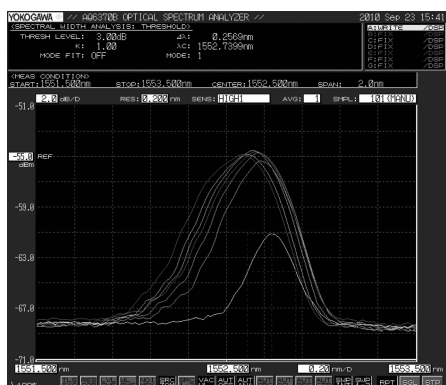


图 8 不同甘油浓度下的光谱图  
Fig. 8 The spectrum with different concentration of glycerin aquatic solution

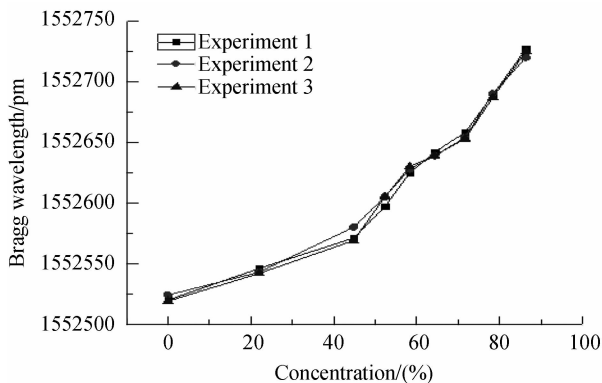


图 9 谐振波长对甘油浓度的响应  
Fig. 9 Different resonance wavelengths as different concentration of glycerin aquatic solution

在实验过程中,为了尽可能地减小外界环境的影响,提高结果的准确性,我们进行了多次测量,并且每次覆盖甘油前,使用水清洗,发现水洗后侧抛光栅的谐振波长值相同.

将图 9 与图 4 对比分析,两者的变化趋势和波长的偏移方向都比较吻合.实验里,甘油浓度由低到高,谐振波长短变长,在浓度小于 58.3%,折射率为 1.41,折射率变化并不是很大,而大于 1.41 后,波长变化非常明显.考虑到实验环境的影响(如温度和压力等),以及抛磨光栅的参数与模型参数并不是完全

一致,尽管实验结果与仿真计算在波长变化大小和范围不一致,但该结果仍然对仿真计算具有参考意义.此外,图 10 中如果在侧抛光栅的侧抛区所加的甘油浓度达 90%左右,随着甘油溶液的扩散直到将抛磨区完全覆盖,光栅反射谱会消失(反射率几乎为 0),但是注水稀释后又会出现光谱,这种现象和第二部分仿真图 5 的模拟结果比较吻合.

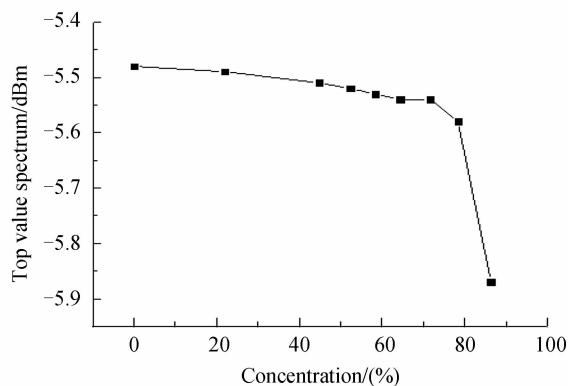


图 10 反射峰值对甘油浓度的响应  
Fig. 10 Different spectrum top values as different concentration of glycerin aquatic solution

#### 4 结论

本文先通过仿真工具对所建立的侧边抛磨光纤光栅光学模型的传输特性进行了仿真计算,分别分析了光栅的参量随侧边抛磨程度和材料折射率的变化情况,并计算了导模光场分布.结果表明,对于 Bragg 光纤光栅,将其侧边抛磨到离纤芯为 3  $\mu\text{m}$  以内,侧抛区对光栅的参量影响会比较明显;抛磨区材料的折射率为 1.33~1.45 时,谐振波长和反射率的变化并不明显,从 1.45 变化到 1.48 时,谐振波长向长波长方向偏移,光栅光谱反射率也有所下降;当抛磨到与纤芯表面重合时,折射率的变化导致谐振波长发生 1.43 nm 的偏移,而且谐振波长和反射率都对抛磨区材料的折射率灵敏度最高,在灵敏范围内,只要折射率发生微小变化,谐振波长和反射率均会有比较大的变化;当折射率为 1.48 时,反射率几乎减为 0,这时候原先在光栅中传输的光场耦合到了侧抛区中.为了验证仿真计算的准确性,进行了实验测试,获得了和仿真计算比较一致的结果.近年来,在光纤光栅的包层镀上一层薄膜来改变光纤光栅的传输特性成为研究热点,如果对光纤光栅的包层进行侧边抛磨后再镀膜得到的光器件,将会在光传感和光通信领域里具有广阔的应用前景<sup>[10]</sup>.

#### 参考文献

[1] ZHANG Xia, XIA Yue-hui, HUANG Yong-qing, et al. Analysis of shift in fiber bragg gratings with finite cladding radius[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 222-224.  
张霞,夏月辉,黄永清,等.有限包层半径 Bragg 光栅的理论研

- 究[J]. 光子学报, 2003, **32**(2): 222-224.
- [2] CHEN Na, YUN Bin-feng, WANG Yi-ping, *et al.* Theoretical and experimental study on etched fiber Bragg grating cladding mode resonances for ambient refractive index sensing [J]. *JOSA B*, 2007, **3**(24): 439-445.
- [3] LADICICCO A, CUSANO A, CAMPOPIANO S, *et al.* Thinned fiber bragg gratings as refractive index sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, **6**(5): 1288-1295.
- [4] CHEN Zhe, CUI Fei, ZENG Ying-xin. Theoretical analysis on optical propagation characteristics of side-polished fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 918-923.  
陈哲, 崔菲, 曾应新. 侧边抛磨光纤波导传输特性的理论分析[J]. 光子学报, 2008, **37**(5): 918-923.
- [5] SOHN K-R, SONG J-W. Thermooptically tunable side-polished fiber comb filter and its application [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **11**(14): 1575-1577.
- [6] SHEN Le, ZHENG Shi-lie, ZHANG Xian-min. The response of side-polished FBG to external refractive index [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1036-1038.  
沈乐, 郑史烈, 章献民. 侧面研磨光纤 Bragg 光栅的外部折射率敏感特性研究[J]. 光子学报 2005, **34**(7): 1036-1038.
- [7] LIU Lin He, CHEN Zhe, BAI Chun-he, *et al.* The effect of refractive index of material overlaid side polished area of FBG on bragg wavelength[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 865-868.  
刘林和, 陈哲, 白春河, 等. 侧边抛磨区材料折射率对光纤光栅波长的影响[J]. 光子学报, 2007, **36**(5): 865-868.
- [8] TIE Chun-lin, CHEN Hong-wei, LIU Wen-fung, *et al.* Hydrogen sensor based on side-polished fiber Bragg gratings coated with thin palladium film[J]. *Thin Solid Films*, 2008, **16**(16): 5360 - 5363.
- [9] 工程师. 甘油 [DB/OL]. (2008-01-18) [2010-05-25]. <http://www.cheml.com/Article/ShowArticle.asp?ArticleID=475>.
- [10] GU Zheng-tian, DENG Chuan-lu. Application and development of coated fiber grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(6): 1317-1326.  
顾铮先, 邓传鲁. 镀膜光纤光栅应用与发展 [J]. 中国激光, 2009, **36**(6): 1317-1326.

## Theoretical Simulation and Experimental Investigation of Side-polished Fiber Bragg Grating

YIN Dan<sup>1</sup>, YANG Ming-hong<sup>1</sup>, DAI Ji-xiang<sup>1</sup>, LI Xiao-bin<sup>1</sup>,  
LIU Hong-liang<sup>1</sup>, TANG Jie-yuan<sup>2</sup>, CHEN Zhe<sup>2</sup>

(1 National Engineering Lab for Optical Fiber Sensors, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

(2 Department of Opto-Electron Engineering, Jinan University, Guangzhou 510630, China)

**Abstract:** An optical model of side polished fiber Bragg grating was proposed in this paper. The shift of grating resonance wavelength and the reflectance variation of grating spectrum were calculated with changing the residual cladding thickness and refractive index of the materials overlaid the side polished area. The calculated results and experiment showed that if the reflectance index(RI)of coating materials is closer to the fiber core RI, and the residual cladding thickness is less than  $3\mu\text{m}$ , the obvious variation of grating resonance wavelength and grating spectrum will be caused by the slight changes of coating materials' RI.

**Key words:** Side polished fiber Bragg grating; Resonance wavelength; Spectrum reflectance