

doi:10.3788/gzxb20134210.1182

基于侧边抛磨光纤倏逝场的折射率传感特性

白春河, 罗云瀚, 陈哲, 陈小龙, 徐梦云, 唐洁媛

(暨南大学 理工学院 光电工程系 光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广州 510632)

摘要: 为了优化基于侧边抛磨光纤器件的性能, 采用在线抛磨和测量的方法, 实验研究了抛磨区长度和抛磨区剩余包层厚度对侧边抛磨光纤折射率传感特性的影响. 研究发现, 侧边抛磨光纤对材料折射率的传感特性依据灵敏度可以分为三个区域: 1) 折射率在 1.300~1.450 范围内, 传感特性的灵敏度很低, 但线性度很好; 2) 折射率在 1.450~1.500 范围内, 具有灵敏的传感特性, 但在这个范围内线性度较差; 3) 折射率大于 1.500 以后, 可以同时获得较好的灵敏度、线性度和稳定性. 比较抛磨区长度分别为 10 mm 和 20 mm 的侧边抛磨光纤, 20 mm 的抛磨区长度不会提高传感的灵敏度, 却会增加器件的不稳定性. 抛磨光纤剩余包层厚度对传感灵敏度和功率损耗有重要影响, 可依据器件实际需要选择合适的剩余包层厚度.

关键词: 侧边抛磨光纤; 折射率; 灵敏度; 剩余包层厚度

中图分类号: TN253; TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)10-1182-5

Characteristics of Side-polished Fiber in Refractive Index Sensing

BAI Chun-he, LUO Yun-han, CHEN Zhe, CHEN Xiao-long, XU Meng-yun, TANG Jie-yuan
(Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes,
Department of Optoelectronic Engineering, College of Science and Engineering, Jinan University,
Guangzhou 510632, China)

Abstract: In order to optimize the performance of optical devices fabricated with side-polished fibers, online polishing and measurements were conducted to study sensing characteristics of side-polished fiber effected by polishing length and remaining cladding thickness. The results show that, the sensing characteristics for the side-polished fiber used here can be divided into three regions according to its sensitivity. In the first region with refractive index ranging from 1.300 to 1.450, low sensitivity and high linearity were achieved. In the second region with refractive index ranging from 1.450 to 1.500, high sensitivity can be obtained, while very low stability. Compared to the first two regions, both relatively good sensitivity, linearity and stability can be spontaneously achieved in the third region with refractive index higher than 1.50. Comparisons of fibers with polishing length of 10 mm and 20 mm show that the increase of polishing length do not result in improvement of sensitivity, while a loss in stability. The remaining cladding thickness plays an important role in determinating the sensitivity and the insert loss of side-polished fiber, therefore it should be optimized to achieve the desired sensors.

Key words: Side-polished fiber; Refractive index; Sensitivity; Remaining cladding thickness

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61177075, 11004086, 61008057)、广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目 (No. 2012A032300016)、中央高校基本科研业务费专项资金 (Nos. 21612437, 21612117, 21612450) 和深圳市传感技术重点实验室开放基金 (No. SST201204) 资助

第一作者: 白春河 (1975-), 男, 实验师, 硕士, 主要研究方向为光无源器件与光纤传感等. Email: baichunhe1@163.com

通讯作者: 罗云瀚 (1979-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光电信息检测与传感、生物光学与光谱分析、光微流器件与传感等. Email: yunhanluo@163.com

收稿日期: 2013-03-27; **录用日期:** 2013-06-14

0 引言

侧边抛磨光纤(Side Polished Fiber, SPF)是利用光学微加工技术将一段光纤包层全部或部分抛磨掉所制成的光纤^[1]. 根据实际情况的需要,甚至也可把光纤的部分纤芯抛磨掉. 当光纤的包层厚度抛磨至纤芯仅几个微米的区域时,在纤芯传输的光将以倏逝波场形式“泄露”出来. 利用此“泄漏窗口”的倏逝波场^[2-3],可做成各种全光纤无源器件,如衰减器^[4-5]、滤波器^[6]、耦合器^[7]、光开关^[8]、光放大器^[9]、调制器^[10]. 当待检测的物质被置于侧边抛磨区时,倏逝波场与待测物相互作用,可制成折射率传感器^[11-15].

为了研究基于侧边抛磨光纤的传感性能,需要确定和优化抛磨光纤的抛磨区长度(用“ l_p ”表示)、剩余包层厚度,并研究覆盖材料折射率的变化对传感特性的影响^[16]. 曾应新利用有限差分光束传输法(Beam Propagation Method, BPM)计算的侧边抛磨光纤中传输光功率随抛磨区覆盖材料的折射率变化的关系^[17]. 本文采用在线抛磨和测量的实验方法,研究了侧边抛磨光纤的光功率传输特性与侧边抛磨光纤抛磨区长度、剩余包层厚度、以及抛磨区覆盖材料折射率之间的关系,并与理论模型计算结果进行比较,为光纤抛磨加工提供指导和依据.

1 实验方法与装置

实验装置如图 1 所示,光源是通信用的激光光源(1 310 nm, 武汉光讯公司),光功率计用来监测在抛磨和测试过程中的光强,连接光源和光功率计之间的是待抛磨的光纤. 实验中采用单模光纤(ITU-T G. 652. D, Corning 公司),纤芯折射率为 1.475,包层折射率为 1.465,光波长在 1 310 nm 时的损耗为 0.34 dB/km. 图 1(a)椭圆区域为侧边抛磨区域,也是传感区域,其放大显示为图 1(b).

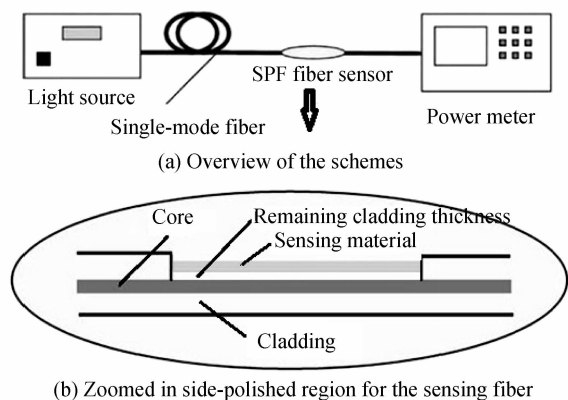


图 1 实验装置图

Fig. 1 The schemes for the experiment setup

在侧边抛磨和实验测试过程中,光源、侧边抛磨光纤与光功率计的连接始终保持不变,减小了实验的不稳定性因素. 当光纤抛磨到一定时间,记录抛磨光纤所用时间,从磨轮上取下侧边抛磨光纤,清洗干净,置于空气或在侧边抛磨光纤的抛磨区覆盖待测材料,记录光功率计对应的读数. 测量完毕后,此侧边抛磨光纤放在磨轮上继续抛磨一段时间,然后再停止抛磨,清晰后再测试. 重复上述步骤就得到了同一根光纤随着不同抛磨时间的传感特性. 最后用细丝检测仪测出(分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$)侧边抛磨光纤的剩余包层厚度. 根据抛磨过程中所用时间及最后一次测量的剩余包层厚度推算出每一次测试时剩余包层厚度,该方法推算的包层剩余厚度值与细丝检测仪所测量的结果相比较,误差约为 $\pm 0.1 \mu\text{m}$. 从而获得不同剩余包层厚度的侧边抛磨光纤传感特性.

2 结果与分析

2.1 抛磨区长度对传输光功率的影响特性

针对不同抛磨区长度的侧边抛磨光纤,在抛磨区覆盖不同材料折射率,测量侧边抛磨光纤中传输光功率的变化. 分别测量了抛磨区长度为 10 mm 和 20 mm 的侧边抛磨光纤,分别将抛磨光纤置于空气中和在抛磨区覆盖折射率液中进行测试. 抛磨区长度为 10 mm 的侧边抛磨光纤,其剩余包层厚度分别为 $4.2 \mu\text{m}$ 、 $2.4 \mu\text{m}$ 、 $0.6 \mu\text{m}$ 、 $-1.2 \mu\text{m}$ (也就是说纤芯已经抛磨掉了 $1.2 \mu\text{m}$),在空气中的损耗分别为 0.81 dB、1.8 dB、3.7 dB、5.6 dB;抛磨区长度为 20 mm 的侧边抛磨光纤,其剩余包层厚度分别为 $3.6 \mu\text{m}$ 、 $2.0 \mu\text{m}$ 、 $0.4 \mu\text{m}$ 、 $-1.2 \mu\text{m}$,在空气中的损耗分别为 0.52 dB、1.5 dB、5.5 dB、10.2 dB.

当用折射率液覆盖侧边抛磨光纤的整个抛磨区,测量输出光功率如图 2 所示. 图 2 的横坐标是液体材料的折射率,纵坐标是光功率损耗,单位是 dB. 从图 2 中可以看出,侧边抛磨光纤对折射率的传感特性可以分为三个区域:1)覆盖材料的折射率从 1.300 变化到 1.450 时,对传输光功率的损耗影响非常小,几乎接近空气中的损耗;2)覆盖材料的折射率从 1.450 变化到 1.500 时,对传输光功率的损耗影响较大,其传感特性有较好的灵敏度,但线性度和稳定性较差;首先覆盖材料的折射率从 1.450 变化到 1.458 时,传输光功率的损耗会随折射率的增大而明显增大;其次覆盖材料的折射率从 1.458 变化到 1.462 时,传输光功率的损耗并不是随折射率的增大而增大,并在覆盖折射率为 1.460 时,抛磨区长度为 10 mm 的侧边抛磨光纤在不同剩余包层厚度的

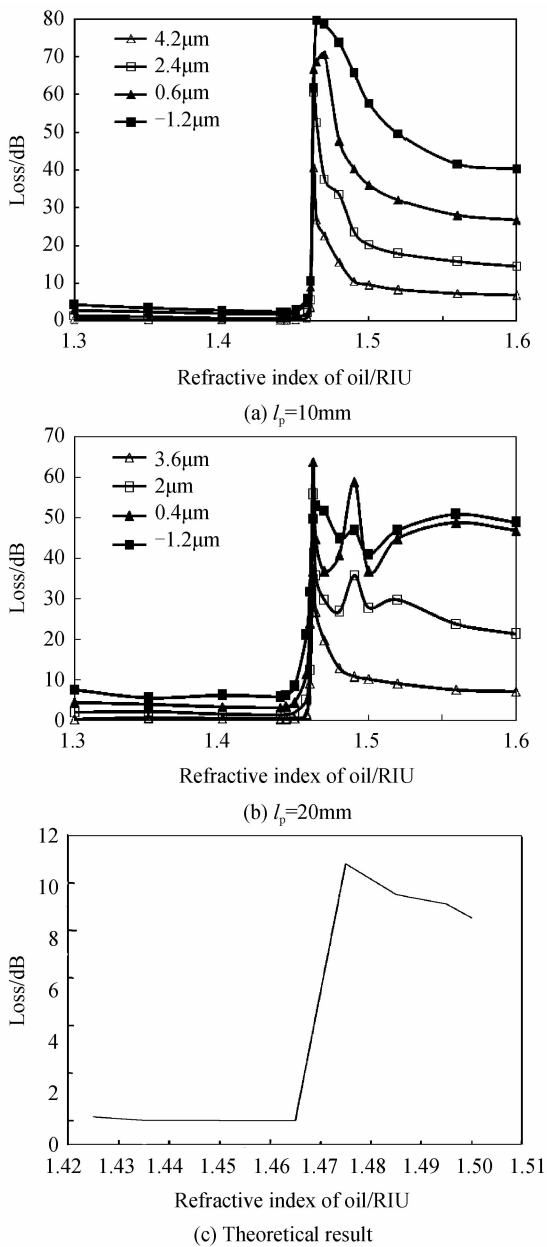


图2 侧边抛磨光纤传输光功率损耗随抛磨区覆盖材料的折射率变化的曲线

Fig. 2 The loss of transmission optical power in SPF responding to the variations in the refractive index of overlaid material

光功率损耗分别对应达到 40 dB、60 dB、66 dB、61 dB,如图 2(a)所示;抛磨区长度为 20 mm 的侧边抛磨光纤在不同剩余包层厚度的传输光功率损耗分别达到 37 dB、55 dB、63 dB、50 dB,如图 2(b)所示.这是由于覆盖材料的折射率 1.460 非常接近包层折射率 1.465,破坏光模场传输条件,因此在此折射率处会引起很大的传输光功率损耗.再次当覆盖材料的折射率从 1.464 变化到 1.500 时,图 2(a)显示抛磨区长度为 10 mm 的侧边抛磨光纤传输的光功率的损耗开始逐渐下降.图 2(b)显示抛磨区长度为 20 mm 的侧边抛磨光纤,当剩余包层厚度大于 $2.0\mu\text{m}$ 以上时,传输的光功率的损耗开始逐渐下

降;当剩余包层厚度小于 $0.4\mu\text{m}$ 以后,光功率的损耗并不随着折射率的增大而递减,出现了不规则的变化,光功率的损耗都在 40 dB 以上,实验时数据有波动,而图 2(b)的对应数据为 10 次数据平均值;3)覆盖折射率大于 1.500 以后,可以同时获得较好的灵敏度、线性度和稳定性.

图 2(c)是利用有限差分光束传输法(BPM)计算的侧边抛磨光纤中传输光功率随抛磨区覆盖材料的折射率变化的曲线^[17].仿真计算模型的参量设为:抛磨面与纤芯外表面间距为 $2\mu\text{m}$,材料折射率在 1.425 至 1.505 范围内,光纤的参量为:光纤的外径为 $124\mu\text{m}$,纤芯直径为 $8\mu\text{m}$,纤芯折射率为 1.475,包层折射率为 1.465,入射光波长为 1310nm .

比较图 2(a)、(b)与(c),可以发现实验结果和理论计算具有相同的变化趋势.进一步对比图 2(a)和(b),可以发现,图 2(b)的实验稳定性不如图 2(a),且出现一些非规律性波动.这可能是由于抛磨区越长时,折射率液的涂覆不均匀性造成的,也可能是由于传感区域的增大造成外界干扰引起.因此,在能够满足传感灵敏度的条件下,选择抛磨区长度小的光纤更加具有稳定性.

分析侧边抛磨光纤对折射率的传感特性的三个区域可以看出:1)折射率小于 1.450 时,传感特性的灵敏度很低,约为 30 dB/RIU.由于生物样品,比如血清、组织液的折射率均为 1.33~1.40 之间,所以直接用侧边抛磨光纤作为生物传感器虽具有光纤传感的众多优点,但只能得到较低的灵敏度;2)折射率为 1.450~1.500 范围内,具有灵敏的传感特性,但在这个范围内线性度较差.折射率在 1.450~1.460 范围内,传感特性的灵敏度随折射率的增大而变得敏感,折射率为 1.460~1.500 范围内,灵敏度可达到近 1000 dB/RIU;3)折射率液大于 1.500 时,可以同时获得较好的灵敏度和线性度.以上讨论是基于本实验用的纤芯折射率为 1.475 的光纤而言,而选择不同类型的光纤所制成的侧边抛磨光纤传感器,其传感特性的范围也会随之变化.

2.2 剩余包层厚度与光功率传输特性的研究

实验选取 3 根抛磨区长度 10 mm,编号 10 mm-1、10 mm-2、10 mm-3 的侧边抛磨光纤,改变侧边抛磨光纤的剩余包层厚度;选取 3 根抛磨区长度 20 mm,编号 20 mm-1、20 mm-2、20 mm-3 的侧边抛磨光纤,改变侧边抛磨光纤的剩余包层厚度.首先测量其裸露在空气中(in air)的传输光功率损耗,测试结果见图 3(a)、(b).然后在侧边抛磨光纤的抛磨区覆盖 1.460 的材料折射率($n_{\text{fluid}}=1.460$),测量其传输光功率损耗,测试结果见图 3(c)、(d).

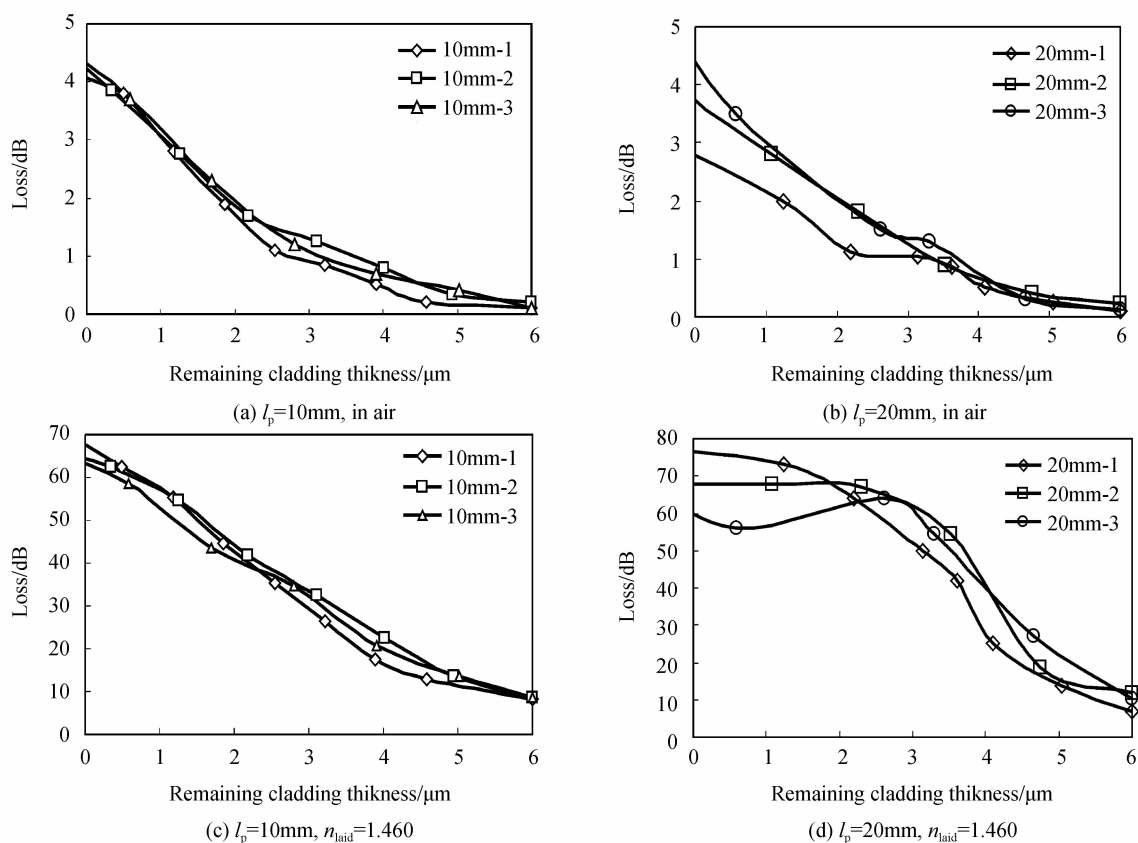


图3 剩余包层厚度与传输光功率损耗的关系

Fig. 3 The loss of transmission optical power in SPF responding to the residual thickness of cladding layer

图3的横坐标是侧边抛磨光纤的剩余包层厚度,单位是 μm ,纵坐标是传输光功率损耗,单位是dB.从图3中可以看出,(a)、(b)两组各自所包含的3根光纤传感特性的趋势基本一致,说明相同抛磨长度的光纤实验有很好的重复性.侧边抛磨光纤的抛磨区裸露在空气中时,侧边抛磨光纤光功率损耗会随剩余包层厚度的减小而增大.当剩余包层厚度大于 $6\mu\text{m}$ 时,侧边抛磨光纤在空气中的传输光功率损耗逐渐趋向于0dB,这表明光场还没有通过此窗口泄露出来.当剩余包层厚度等于零时,侧边抛磨光纤在空气中的损耗约为4dB.

图3(c)与图3(a)是相同的3根光纤,图3(d)是与图3(b)是相同的3根光纤.从图中可以看出,在侧边抛磨光纤的抛磨区覆盖1.460的折射率液时的传感特性.抛磨区长度为10mm时,侧边抛磨光纤光功率损耗是随剩余包层厚度的减小而逐渐增大,在剩余包层厚度在 $0\sim 5\mu\text{m}$ 区间时,趋向于线性变化.抛磨区长度为20mm时,剩余包层厚度大于 $2\mu\text{m}$ 时,其光功率损耗会随剩余包层厚度的减小而增大;当剩余包层厚度小于或等于 $2\mu\text{m}$ 时,光纤中的光功率损耗维持在55dB以上,而且光功率损耗与剩余包层厚度的变化关系不明显.

3 结论

采用本实验室自主研制的轮式光纤侧边抛磨机加工制作了侧边抛磨光纤,采取在线抛磨和在线测试的方法,研究了不同抛磨区长度、剩余包层厚度的光纤对折射率的传感特性.可得出以下结论:1)抛磨区长度较小的侧边抛磨光纤,覆盖折射率材料时光功率损耗表现得更有规律,稳定性更高,因此更适合做传感器;2)在选择侧边抛磨光纤的剩余包层厚度时,需要同时考虑传感器所需要的折射率灵敏度和传感器的损耗两个因素;3)根据侧边抛磨光纤对折射率响应特性以及被测材料的折射率范围,选用不同种类的光纤进行侧边抛磨,制作高性能的光纤传感器.

参考文献

- [1] CHEN Zhe, LI Feng-li, ZHONG Jin-gang, *et al.* Side polished fiber and application [C]. The 12th fiber communication and 13th Integrated optical Conference transactions, 2005: 407-412.
陈哲,李丰丽,钟金钢,等.侧边抛磨光纤及其应用[C].全国第十二次光纤通信暨第十三届集成光学学术会议,广州暨南大学出版社,2005: 407-412.
- [2] LI Z, HSIAO K S, CHEN Z, *et al.* Optically tunable fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(15): 1123-1125.

- [3] 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.
- [4] HSIAO K S, LI Z, CHEN Z, *et al.* Optically controllable side-polished fiber attenuator with photoresponsive liquid crystal overlay[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(22): 19988-19994.
- [5] ZHANG Yun-cong, CHEN Zhe, JIANG Pei-fan, *et al.* All fiber thermo-optical variable optical attenuator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(8): 1110-1114.
张云聪, 陈哲, 江沛凡, 等. 全光纤热光型可变光衰减器的研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1110-1114.
- [6] SOHN K R, SONG J W. Thermo-optically tunable side-polished fiber comb filter and its application [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(11): 1575-1577.
- [7] SOHN K R, KIM K T, SONG J W, *et al.* Optical fiber sensor for water detection using a side-polished fiber coupler with a planar glass-overlay-waveguide [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2002, **101**(1): 137-142.
- [8] MCCALLION K, JOHNSTONE W, THURSBY G, *et al.* Investigation of optical fiber switch using electro-optic interlays[J]. *Electronics Letters*, 1992, **28**(4): 410-411.
- [9] CHEN Nan-kuang, CHI Sien, ZHANG Li-yan, *et al.* CW-pumped evanescent amplification at 1.55 μm wavelength using highly Er³⁺-doped glass over side-polished fiber[C]. *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, 2005: 1352-1354.
- [10] CHEN Zhe, LIAO Yan-biao. All polarization maintaining thermal poling fiber electro-optic intensity modulator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 663-665.
陈哲, 廖延彪. 热极化保偏光纤构成的全光纤电光强度调制器[J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 663-665.
- [11] YOON J K, SEO G W, CHO K M, *et al.* Controllable inline UV sensor using a side-polished fiber coupler with photo-functional polymer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(6): 837-839.
- [12] ZHANG Zhe, QI Zhi-mei. Analysis of refractive-index sensitivity of nanoporous waveguide based leaky mode resonance sensor [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2011, **9**(5): 397-401.
张喆, 祁志美. 纳米多孔光波导漏模共振传感器的折射率灵敏度分析[J]. *纳米技术与精密工程*, 2011, **9**(5): 397-401.
- [13] TANG Jie-yuan, CHEN Zhe, FAN Ruo-yan, *et al.* Thermo-optic effect of liquid materials based on side polished fiber bragg grating sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(6): 1434-1439.
唐洁媛, 陈哲, 范若岩, 等. 基于侧边抛磨光纤光栅传感器的液体材料热光特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1434-1439.
- [14] CHEN Zhe, QIN Jia-rong, PAN Hao, *et al.* All-fiber integrated optical power monitor-controller [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(4): 1048-1052.
陈哲, 覃家荣, 潘昊, 等. 全光纤集成化光功率监控器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1048-1052.
- [15] SUN Dong, RAN Zeng-ling, RAO Yun-jiang. Laser-machined miniature fiber-optic refractive-index sensor tip[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1040-1042.
孙东, 冉曾令, 饶云江. 激光加工微型光纤折射率传感器的工艺与特性[J]. *光子学报*, 2010, **39**(7): 1040-1042.
- [16] 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.
- [17] ZENG Ying-xin. Simulations and analysis of optical fiber devices based on side-polished fiber[D]. *Jinan University, Guangzhou, China*, 2006.
曾应新. 侧边抛磨光纤器件的仿真分析[D]. *广州:暨南大学*, 2006.