

doi:10.3788/gzxb20134210.1187

## 侧边抛磨 SMS 光纤传感器

唐洁媛, 陈哲, 罗云瀚, 余健辉, 张军

(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:**采用轮式侧边抛磨技术对单模多模单模光纤结构的多模光纤部分进行侧边抛磨处理,研究了不同抛磨深度情况下该光纤结构对环境折射率的传感特性.结果显示,单模多模单模光纤结构的光谱特性曲线中存在多个损耗峰,这是由多模光纤中多种高阶模式相互干涉形成的.当单模多模单模光纤结构被侧边抛磨到接近纤芯时,光谱没有发生较大变化,只是各损耗峰波长发生了不同程度的漂移;但是,当抛磨掉部分纤芯时,单模多模单模光纤结构的光谱曲线发生较大变化,抛磨后单模多模单模光纤结构对外环境折射率变化敏感.当抛磨区深度为  $10\ \mu\text{m}$ , 长度为  $20\ \text{mm}$  时,折射率传感器的最高灵敏度只有  $703.2\ \text{nm/RIU}$ ;当抛磨区深度为  $15\ \mu\text{m}$  时,最高灵敏度为  $798\ \text{nm/RIU}$ ;当抛磨区深度为  $20\ \mu\text{m}$  时,最高灵敏度高达  $1\ 190\ \text{nm/RIU}$ .研究表明,通过侧边抛磨单模多模单模光纤结构可实现一种新型的光纤折射率传感器,且可通过增加抛磨深度来提高该传感器对折射率的传感灵敏度.

**关键词:**侧边抛磨;光纤;单模多模单模光纤结构;传感器;折射率;多模光纤;多模干涉

**中图分类号:** TN253; TP212

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2013)10-1187-6

## Side Polished SMS Fiber Sensor

TANG Jie-yuan, CHEN Zhe, LUO Yun-han, YU Jian-hui, ZHANG Jun

(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:** A new type of optical fiber refractive index sensor was reported. The partial multimode fiber of Singlemode-Multimode Singlemode (SMS) fiber structures were side polished, and then the refractive index sensing properties were analyzed. The results show that multiple loss peaks can be observed in the spectrum of the SMS fiber structures because of the mutual interference by the high order modes of multimode fiber. The spectrum of the SMS fiber structures just drift a few nanometres when the SMS fiber structures are polished to close to the core; but when being side polished to the core of the fiber, the spectrum changes dramatically. After being side polished, the refractive index resolution of the SMS fiber structures will be higher. When the polishing depth is  $10\ \mu\text{m}$  and the polishing length is  $10\ \text{mm}$ , the refractive index sensitivity of the SMS fiber structure is  $703.2\ \text{nm/RIU}$ . When the polishing depth is  $15\ \mu\text{m}$ , the refractive index sensitivity of the SMS fiber structure is  $798\ \text{nm/RIU}$ . When the polishing depth is  $20\ \mu\text{m}$ , the refractive index sensitivity of the SMS fiber structure is up to  $1\ 190\ \text{nm/URI}$ . A new type of optical fiber refractive index sensor can be realized with a single side polished SMS fiber structure, and the sensitivity of the sensor can be improved by increasing the depth of polishing area.

**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, 21613405)、广东高校优秀青年创新人才培养计划项目 (No. LYM10024) 和深圳市传感器技术重点实验室开放基金 (No. SST201204) 资助

**第一作者:**唐洁媛 (1982-), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为光纤传感器. Email: tangjiey@163.com

**通讯作者:**陈哲 (1957-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤无源器件、光学设计和光机电一体化. Email: thchenzhe@jnu.edu.cn

**收稿日期:** 2013-04-24; **录用日期:** 2013-06-14

**Key words:** Side polishing; Optical fiber; Singlemode-Multimode-Singlemode (SMS) fiber structure; Sensor; Refractive index; Multimode fiber; Multimode interference

## 0 引言

单模多模单模 (Singlemode-Multimode-Singlemode, SMS) 光纤结构是指在标准单模光纤中插入一段多模光纤而构成的光纤干涉结构, 具有制作方便、成本低廉、灵敏度高等特点. SMS 光纤结构的光传输原理为高阶模之间的多模干涉. 基于该原理, SMS 光纤结构在通信领域可用于光纤滤波器的研究<sup>[1-4]</sup>, 在传感器领域可用于位移传感器<sup>[5-6]</sup>、微弯传感器<sup>[7]</sup>、温度传感器<sup>[8-11,6]</sup>、折射率传感器<sup>[12-13]</sup>、应力传感器<sup>[10]</sup>和液面高度传感器<sup>[14]</sup>等的研究. 同时, 将 SMS 光纤结构与光纤光栅相结合可以构成灵敏度更高的传感器或多参量传感器. WANG Ke 等<sup>[15]</sup>在 SMS 光纤结构的多模光纤部分刻写了长周期光纤光栅, 制作了一种 PH 值的传感器; ZHOU Da-peng 等<sup>[16]</sup>利用布喇格光纤光栅和两段 SMS 光纤结构实现了应力和温度的同时测量; WU Qiang 等<sup>[17]</sup>将 SMS 光纤结构与 FBG 相结合, 构成了可进行温度补偿的应力传感器.

由于 SMS 光纤结构的光传输原理为高阶模之间的多模干涉, 而高阶模的传播常量与纤芯和包层折射率有关, 如果去掉多模光纤的包层, 则可构成各种基于外环境折射率的光纤传感器. WU Qiang 等采用化学腐蚀的方法将熔接好的 SMS 光纤结构腐蚀到 3 种不同的深度, 然后对环境折射率进行了测量, 最高分辨率可达 1 815 nm/RIU. 赵宇等先将多模光纤腐蚀到直径只有 90  $\mu\text{m}$ , 然后与单模光纤进行熔接, 再对液体折射率进行测量, 灵敏度可达  $5.4 \times 10^{-5}$  RIU. 这些报道均考虑用化学腐蚀去除多模光纤包层, 但这种方法既污染环境又难以控制腐蚀的深度, 且无论是腐蚀前熔接单模光纤还是腐蚀后熔接单模光纤, 由于多模光纤与单模光纤的直径不匹配, 都存在着熔接处损耗大机械强度差的问题, 将直接影响到了该传感器的实用化.

侧边抛磨光纤指的是用机械方法将光纤的包层侧边抛磨掉, 使得纤芯中的倏逝场泄露出来而构成的光纤结构. 这种光纤结构有着对环境折射率灵敏度高, 机械强度大等优点, 已广泛用于传感器的研究<sup>[18-20]</sup>, 但是侧边抛磨 SMS 光纤结构用于传感器的研究国内外还未见报道. 本文考虑将 SMS 光纤结构的多模光纤侧边抛磨掉部分包层, 而不是将整个包层腐蚀掉, 使得环境折射率对多模光纤中的高阶模式产生影响, 从而实现了一种新的 SMS 光纤折射率传感器. 这种传感器具有机械强度好、熔接损耗低、

传感灵敏度高、成本低廉、制作简单等优点, 为其实用化创造了良好的条件.

## 1 光纤传感器的制备及工作原理

侧边抛磨 SMS 光纤结构如图 1. 采用熔接机在两段单模光纤 (SM-28 纤芯直径 8.3  $\mu\text{m}$ , 包层直径 125  $\mu\text{m}$ ) 中熔接一段 4 cm 长多模光纤 (多模光纤型号 Nufern MM-S105/125-22A, 纤芯直径 105  $\mu\text{m}$ , 包层直径 125  $\mu\text{m}$ ). 采用轮式抛磨法将多模光纤的中间部分侧边抛磨掉, 抛磨深度分别为 10、15、20  $\mu\text{m}$ .

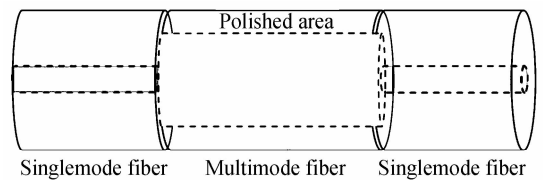


图 1 侧边抛磨单模多模单模光纤结构

Fig. 1 Schematic diagram of SMS fiber structure

SMS 光纤结构的单模光纤部分中心对称, 设输入光场分布为  $E(r, 0)$ , 当光场由单模光纤传到多模光纤时, 会在多模光纤内部激发出一系列高阶本征模  $\{LP_{0m}\}$ . 设本征模  $LP_{0m}$  的光场分布为  $F_m(r)$ , 忽略多模光纤的辐射损耗可得多模光纤输入光场为<sup>[13]</sup>

$$E(r, 0) = \sum_{m=1}^M c_m F_m(r) \quad (1)$$

$$c_m = \frac{\int_0^{\infty} E(r, 0) F_m(r) r dr}{\int_0^{\infty} F_m(r) F_m(r) r dr} \quad (2)$$

式中  $c_m$  表示各高阶模的激发系数. 随着光场在多模光纤中传播, 其光场表达式可设为

$$E(r, z) = \sum_{m=1}^M c_m F_m(r) \exp(i\beta_m z) \quad (3)$$

式中的  $\beta_m$  为各高阶模式的传播常量. 传播损耗  $L_s(z)$  可以利用  $E(r, z)$  与输入多模光纤的  $E_0(r)$  进行重叠积分计算得出

$$L_s(z) = 10 \log_{10} \left[ \frac{\left| \int_0^{\infty} E(r, z) E_0(r) r dr \right|^2}{\int_0^{\infty} |E(r, z)|^2 r dr \int_0^{\infty} |E_0(r)|^2 r dr} \right] \quad (4)$$

当多模光纤的包层被抛磨掉时, 随着外环境折射率的变化, 光纤的有效折射率也随之而变. 这使得多模光纤中激发出的本征模  $F_m(r)$  发生改变, 导致多模光纤中每个本征模的激发系数  $c_m$  也随之变化. 当这些高阶模式传播到单模光纤时, 多模之间的干涉也发生变化, 可利用该变化对外环境折射率进行测量.

## 2 实验装置及数据分析

实验装置如图 2 所示,将制备好的侧边抛磨 SMS 光纤结构的两端分别连接 LED 光源与光谱分析仪(日本 YOKOGAWA,型号 AQ6317C).在恒温(25℃)条件下,将抛磨后 SMS 光纤结构拉直并施加恒定应力后,将玻片轻轻置于抛磨区下方,分别滴入不同规格折射率液(美国 Cargille Labs 公司),使得抛磨区被折射率液覆盖,通过光谱分析仪可以观测其光谱特性的变化,从而获得抛磨 SMS 光纤结构的光谱特性随折射率的变化规律,以实现折射率传感.

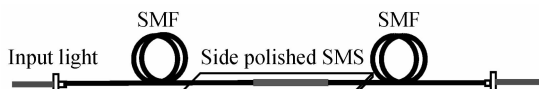


图 2 实验装置

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

图 3 为未抛磨 SMS 光纤结构覆盖不同折射率液后的光谱曲线图.由图 3 可以看出,未抛磨的 SMS 光纤结构的光谱曲线几乎不随环境折射率的改变而变化,所以为了使 SMS 光纤结构对外环境折射率敏感,必须对光纤包层进行抛磨处理.

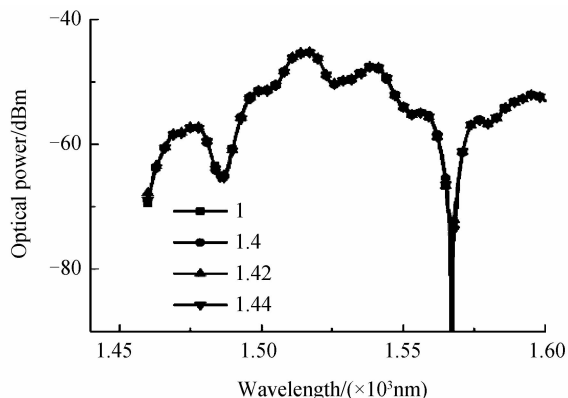


图 3 覆盖不同折射率液后 SMS 光纤结构光谱

Fig. 3 Spectrum of SMS fiber structure when the polished area was immersed in liquid with different refractive index

图 4 为多模光纤的插入损耗随抛磨深度的变化

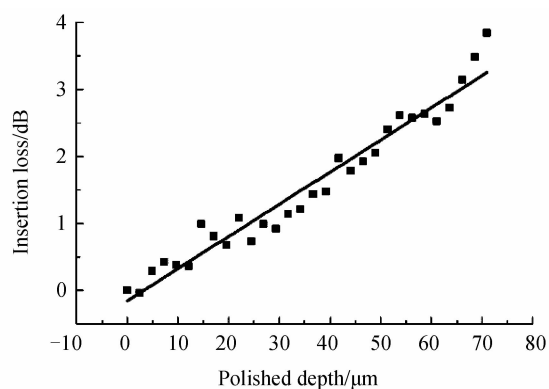


图 4 多模光纤插入损耗随抛磨深度的变化

Fig. 4 Variation of insertion loss Vs. polished depth of the multimode fiber

曲线.由图 4 可以看出,光纤的插入损耗随抛磨深度的增加而增大,两者呈线性关系.当抛磨深度小于  $20 \mu\text{m}$  时,损耗低于 1 dB.

图 5 为 SMS 光纤结构抛磨前后的光谱特性曲线.由图 5 可以看出,抛磨前 SMS 光纤结构的光谱中存在多个损耗峰,其中最大的损耗峰位于  $1504 \text{ nm}$ ,损耗接近 40 dB,还有两个损耗峰分别位于  $1523.6 \text{ nm}$ 、 $1536 \text{ nm}$ ,损耗大约为 5 dB、2 dB.这是因为单模光纤中的基模进入多模光纤后,会激发出多种高阶模式,这些高阶模式的传播常量各不相同,且激发系数也不同,当这些高阶模式传播到单模光纤时会相互干涉.由于相互干涉的模式较多,且各干涉模式的激发系数又存在差异,所以光谱中存在多个损耗峰,各损耗峰的损耗大小也各不相同.当 SMS 光纤结构的多模光纤被侧边抛磨掉  $10 \mu\text{m}$  厚度时——抛磨到刚刚露出纤芯, SMS 光纤结构的光谱特性曲线发生了漂移,3 个损耗峰分别漂移到  $1506.1 \text{ nm}$ 、 $1524.3 \text{ nm}$ 、 $1544.7 \text{ nm}$ ,且各损耗峰的峰值大小较抛磨前要小很多.这说明抛磨后各高阶模式的传播常量发生了变化,且抛磨区的存在使得高阶模损耗增加,所以损耗峰波长出现漂移,损耗峰峰值变小.当 SMS 光纤结构的多模光纤部分被侧边抛磨掉  $15 \mu\text{m}$  时,光谱特性曲线发生了很大的变化,只剩下波长为  $1537.7 \text{ nm}$  损耗峰,又在  $1478 \text{ nm}$  附近出现新的损耗峰.因为多模光纤的包层厚度只有  $10 \mu\text{m}$ ,当抛磨到  $15 \mu\text{m}$  深度时,多模光纤的纤芯也被部分抛磨掉,使得光纤纤芯的圆对称结构发生改变,导致激发出的高阶模式发生了很大的变化,所以光谱曲线也发生较大的改变.当抛磨深度为  $20 \mu\text{m}$  时,也就是纤芯被抛磨掉  $10 \mu\text{m}$  的深度时, SMS 光纤结构的光谱中出现了 4 个损耗峰,分别为  $1474.3 \text{ nm}$ 、 $1496.6 \text{ nm}$ 、 $1521.5 \text{ nm}$ 、 $1540.9 \text{ nm}$ ,损耗峰大约为 3~5 dB.这说明:当侧边抛磨的深度较小时——

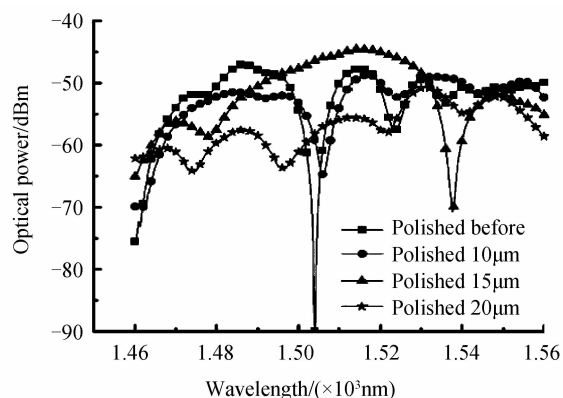


图 5 SMS 光纤结构抛磨前后光谱曲线

Fig. 5 Spectrum of SMS fiber structure before and after being side polished

没有抛磨到纤芯, SMS 光纤结构的光谱特性曲线变化不大, 只是发生波长漂移; 当抛磨到纤芯时, SMS 光纤结构的光谱特性将发生较大的改变.

SMS 光纤结构存在多个损耗峰. 为了便于分析, 对于抛磨深度为  $10\ \mu\text{m}$  的 SMS 光纤结构, 选择波长为  $1506.1\ \text{nm}$  的损耗峰作为研究对象, 研究其随外环境折射率的变化规律. 图 6 为抛磨深度为  $10\ \mu\text{m}$  的 SMS 光纤结构随外环境折射率变化的光谱特性曲线. 由图 6 可以看出, 随着外环境折射率的增加, 损耗峰波长向长波长方向漂移, 但漂移量并非线性增加. 对图 6(b) 中数据进行分段线性拟合后可得: 当折射率从 1.330 增加到 1.390 时, 损耗峰波长从  $1505.8\ \text{nm}$  漂移到  $1506.4\ \text{nm}$ , 漂移量只有  $0.6\ \text{nm}$ , 灵敏度约为  $10.4\ \text{nm}/\text{RIU}$ ; 当折射率从 1.390 增加到 1.430 时, 损耗峰波长从  $1506.4\ \text{nm}$  漂移到  $1509.0\ \text{nm}$ , 漂移了  $2.6\ \text{nm}$ , 灵敏度为  $54\ \text{nm}/\text{RIU}$ ; 当折射率从 1.430 增加到 1.454 时, 损耗峰从  $1509.0\ \text{nm}$  漂移到  $1525.3\ \text{nm}$ , 漂移了  $16.3\ \text{nm}$ , 灵敏度为  $703.2\ \text{nm}/\text{RIU}$ .

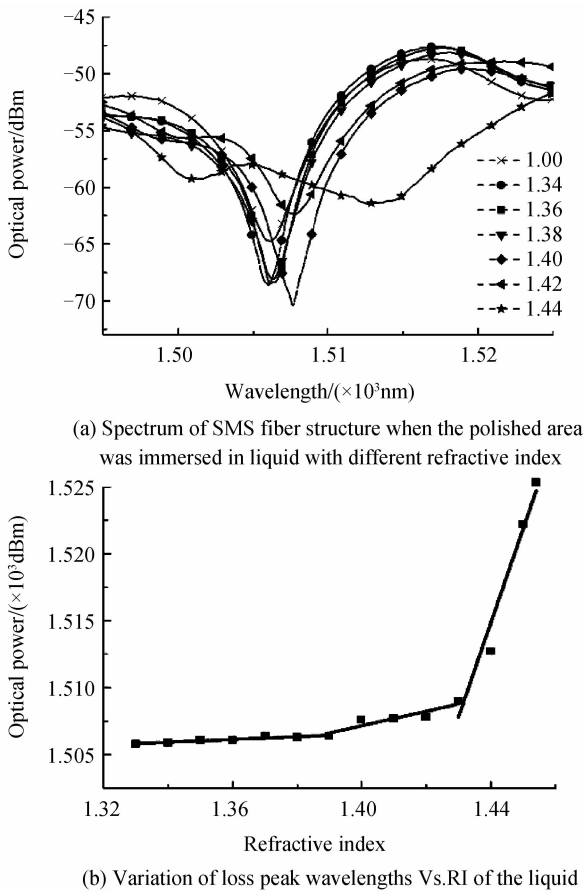


图 6 抛磨深度为  $10\ \mu\text{m}$  SMS 光纤

Fig. 6 The polished depth of SMS fiber structure is  $10\ \mu\text{m}$

对于抛磨深度为  $15\ \mu\text{m}$  SMS 光纤结构, 选择波长为  $1537.7\ \text{nm}$  的损耗峰作为研究对象, 研究其随外环境折射率的变化. 图 7(a) 为抛磨深度为  $15\ \mu\text{m}$

SMS 光纤结构随外折射率变化的光谱特性曲线. 图 7(b) 为抛磨深度为  $15\ \mu\text{m}$  SMS 光纤结构损耗峰波长随外环境折射率变化曲线, 并对曲线作了分段线性拟合. 由图 7 可以看出, 随着外环境的折射率增加, 损耗峰波长向长波长方向漂移. 当折射率从 1.330 增加到 1.390 时, 损耗峰波长从  $1538.2\ \text{nm}$  漂移到  $1539.7\ \text{nm}$ , 漂移量只有  $1.5\ \text{nm}$ , 灵敏度约为  $25.0\ \text{nm}/\text{RIU}$ ; 当折射率从 1.390 增加到 1.420 时, 损耗峰波长从  $1539.7\ \text{nm}$  漂移到  $1546.4\ \text{nm}$ , 漂移了  $6.7\ \text{nm}$ , 灵敏度为  $233.1\ \text{nm}/\text{RIU}$ ; 当折射率从 1.420 增加到 1.450 时, 损耗峰从  $1546.4\ \text{nm}$  漂移到  $1570.1\ \text{nm}$ , 漂移了  $16.3\ \text{nm}$ , 灵敏度为  $798\ \text{nm}/\text{RIU}$ .

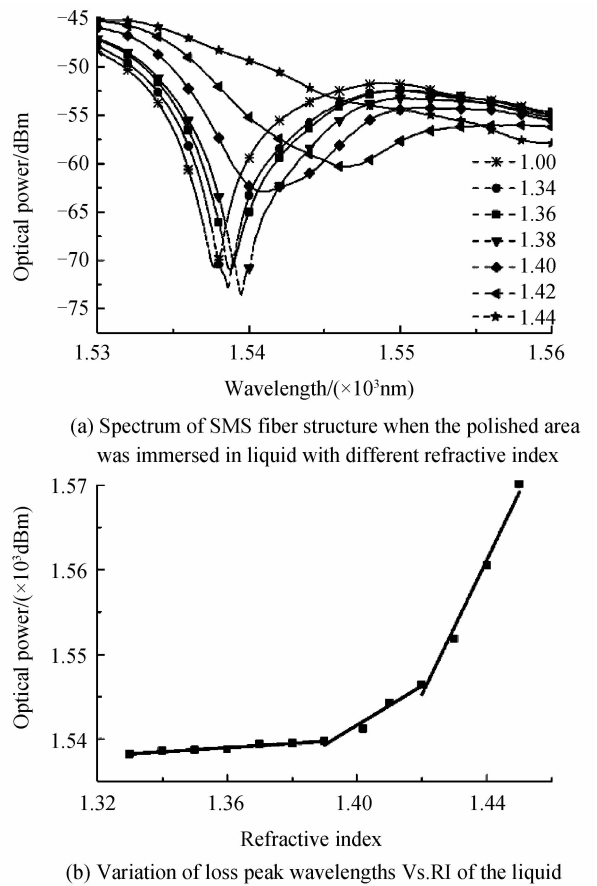
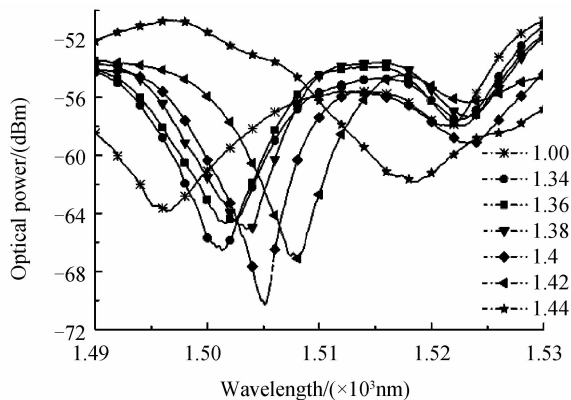


图 7 抛磨深度为  $15\ \mu\text{m}$  SMS 光纤

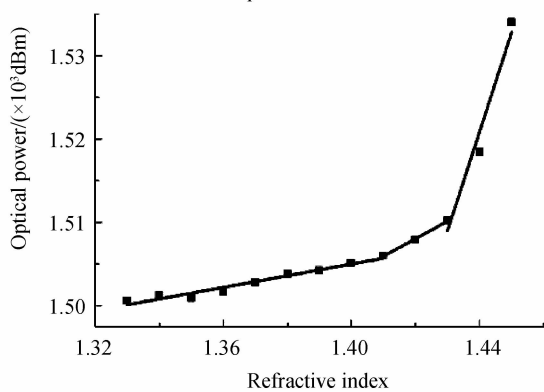
Fig. 7 The polished depth of SMS fiber structure is  $15\ \mu\text{m}$

对于抛磨深度为  $20\ \mu\text{m}$  SMS 光纤结构, 选择波长为  $1496.6\ \text{nm}$  的损耗峰作为研究对象, 研究其随外环境折射率的变化. 图 8(a) 为抛磨深度为  $20\ \mu\text{m}$  SMS 光纤随外环境折射率变化的光谱特性曲线. 图 8(b) 为抛磨深度为  $20\ \mu\text{m}$  SMS 光纤损耗峰波长随外环境折射率变化曲线, 并对曲线作了分段线性拟合. 由图 8 可以看出, 抛磨深度为  $20\ \mu\text{m}$  SMS 光纤对外环境的折射率变化更加灵敏. 当折射率从 1.33 增加到 1.41 时, 损耗峰波长从  $1500.6\ \text{nm}$  漂移到  $1506.0\ \text{nm}$ , 漂移量为  $5.4\ \text{nm}$ , 灵敏度约为  $69.7\ \text{nm}/\text{RIU}$ ; 当折射率从 1.41 增加到 1.43 时, 损

耗峰波长从 1 506.0 漂移到 1 510.2, 漂移了 4.2 nm, 灵敏度为 210 nm/RIU; 当折射率从 1.43 增加到 1.45 时, 损耗峰从 1 510.2 漂移到 1 534 nm, 漂移了 23.8 nm, 灵敏度为 1 190 nm/RIU.



(a) Spectrum of SMS fiber structure when the polished area was immersed in liquid with different refractive index



(b) Variation of loss peak wavelengths Vs. RI of the liquid

图 8 抛磨深度为 20  $\mu$  SMS 光纤

Fig. 8 The polished depth of SMS fiber structure is 20  $\mu$ m

图 9 为 3 种不同抛磨深度下, 损耗峰波长漂移量随外环境折射率的变化. 由图 9 可以得出, 三种不同抛磨深度下, 覆盖 1.33 折射率液后, 损耗峰波长相对于空气中向长波长方向分别漂移了 -0.3 nm、0.5 nm、4 nm. 为了便于三种不同抛磨深度的数据进行对比分析, 对数据进行了重新分段线性拟合, 分段区间分别为 1.33~1.39、1.39~1.43、1.43~1.45. 当外折射率低于 1.39 或高于 1.43 时, 抛磨深度为 20  $\mu$ m 的 SMS 光纤结构灵敏度明显高于其他两种深度的光纤灵敏度. 但是当外折射率位于 1.39~1.43 之间时, 抛磨深度为 15  $\mu$ m 的 SMS 光纤结构灵敏度反而高于抛磨深度为 20  $\mu$ m 的 SMS 光纤结构, 这可能是由于多模干涉的复杂性造成的. 因为 SMS 光纤中存在多种高阶模式的干涉, 所以透射光谱曲线中有多个干涉峰和损耗峰, 这些峰值对外折射率的变化呈现出不同的变化规律. 但是由图 7(a) 可以看出对于抛磨深度为 15  $\mu$ m 的 SMS 光纤结构, 随着折射率的增加, 损耗峰也在变小, 当接近

纤芯折射率时, 损耗峰几乎消失. 综合以上分析, 作为折射率传感器, 抛磨深度为 20  $\mu$ m 的 SMS 光纤结构较其它两种抛磨深度的 SMS 光纤结构更为合适.

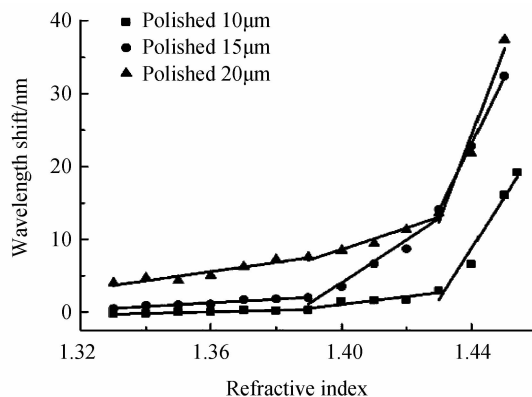


图 9 损耗峰波长漂移随外环境折射率变化曲线

Fig. 9 Variation of loss peak wavelengths shift Vs. RI of the liquid

### 3 结论

抛磨后 SMS 光纤结构的光谱特性发生了很大的变化, 且不同抛磨深度的 SMS 光纤结构之间的光谱特性也存在较大的差异. 抛磨后 SMS 光纤结构对环境折射率的灵敏度与折射率有关, 当环境折射率接近纤芯折射率时, 灵敏度明显增大; 但环境折射率超过纤芯折射率时, SMS 光纤结构对环境折射率不再敏感. 比较 3 种不同抛磨深度的 SMS 光纤结构对折射率的响应特性可知: 不同抛磨深度的 SMS 光纤结构对环境折射率的响应趋势相同, 但灵敏度随着抛磨深度的增加而提高. 当外折射率低于 1.39 或高于 1.43 时, 抛磨深度为 20  $\mu$ m 的 SMS 光纤结构灵敏度明显高于其他两种深度的 SMS 光纤结构的灵敏度. 对于抛磨深度为 20  $\mu$ m 的 SMS 光纤结构, 当折射率为 1.436~1.45 时, 平均灵敏度可高达 1 190 nm/RIU. 光纤的总损耗虽然随着抛磨深度的增加而增加, 但是当抛磨深度不超过 20  $\mu$ m 时, 光纤的总损耗低于 1 dB. 与化学腐蚀法相比, 侧边抛磨法制作的 SMS 光纤传感器, 虽然灵敏度略低, 但不污染环境, 而且制作方法简便、熔接点损耗小、机械强度高.

#### 参考文献

- [1] MOHAMMED W S, SMITH W EP, GU Xi-jia. All-fiber multimode interference band pass filter[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(17): 2547-2549.
- [2] HATTA A M, FARRELL G, WANG Q, et al. Ratiometric wavelength monitor based on single mode-multimode-single mode fiber structure[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, **50**(12): 3036-3039.
- [3] HATTA A M, FARRELL G, WANG Peng-fei, et al. Misalignment limits for a single mode-multimode-single mode

- fiber-based edge filter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(13): 2482-2488.
- [4] HATTA A M, SEMENOVA Y, RAJAN G, *et al.* Analysis of temperature dependence for aratiometric wavelength measurement system using SMS fiber structure based edge filters[J]. *Optics Communications*, 2010, **283** (7): 1291-1295.
- [5] MEHTA A, MOHAMMED W, JOHNSON E G. Multimode interference-based fiber-optic displacement sensor [ J ]. *Photonic Technology Letters*, 2003, **15**(8): 1129-1131.
- [6] QING Wu, HATTA A M, WANG Peng-fei, *et al.* Use of a bent single sms fiber structure for simultaneous measurement of displacement and temperature sensing [ J ]. *Photonic Technology Letters*, 2011, **23**(2): 130-132.
- [7] KUMAR A, VARSHNEY R K, KUMAR R. SMS fiber optic microbend sensor structures: effect of the modal interference [J]. *Optics Communications*, 2004, **232**(1-6): 239-244.
- [8] LI En-bang, WANG Xiao-lin, ZHANG Chao. Fiber-optic temperature sensor based on interference of selective higher-order modes[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89** (9): 091119-091119-3.
- [9] GAO Ren-xi, WANG Qiang, ZHAO Fang, *et al.* Optical design and fabrication of SMS fiber temperature sensor for liquid[J]. *Optics Communications*, 2010, **283** (16): 3149-3152.
- [10] TRIPATHI S M, KUMAR A, VARSHNEY R K, *et al.* Strain and temperature sensing characteristics of single-mode - multimode - single-mode structures [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(13): 2348-2356.
- [11] HATTA A M, RAJAN G, SEMENOVA Y, *et al.* SMS fiber structure for temperature measurement using a simple intensity based interrogation system[J]. *Electronic Letters*, 2009, **45**(21): 1069-1071.
- [12] ZHAO Yu, JIN Yong-xing, DONG Xin-yong, *et al.* Experimental studies of multimode interference based fiber optic refractive index sensors[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(6): 1516-1519.
- 赵宇, 金永兴, 董新永, 等. 基于多模干涉的光纤折射率传感器的实验研究[J], 中国激光, 2010, **37**(6): 1516-1519.
- [13] WU Qiang, SEMENOVA Y, WANG Peng-fei, *et al.* High sensitivity SMS fiber structure based refractometer-analysis and experiment [J]. *Optics Express*, 2011, **19** (9): 7937-7944.
- [14] ZHAO Yu, JIN Yong-xing, WANG Jian-feng. Liquid-level sensor based on SMS fiber structure[C]. 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics (ICEOE 2011): V3-214 V3-216.
- [15] WANG Ke, KLIMOV D, KOLBER Z. Seawater pH sensor based on the long period grating in a single-mode-multimode-single-mode structure [J]. *Optical Engineering*, 2009, **48** (3): 034401-1-4.
- [16] ZHOU Da-peng, WEI Li, LIU Wing-ki, *et al.* Simultaneous strain and temperature measurement with fiber Bragg grating and multimode fibers using an intensity-based interrogation method[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21** (7): 468-470.
- [17] WU Qiang, HATTA A M, SEMENOVA Y, *et al.* Use of a single-multiple-single-mode fiber filter for interrogating fiber Bragg grating strain sensors with dynamic temperature compensation[J]. *Applied Optics*, 2009, **48** (29): 5451-5458.
- [18] 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.
- [19] CHEN Zhe, HE Zu-ping, CUI Fei, *et al.* Analysis of optical transmission characteristics in the waveguide of side polished fiber [ C ]. 2009 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Sensor Technologies and Applications, Proc. of SPIE, 2009, **7508**: 75080B.
- [20] CHEN Zhe, BAI Chun-he. Effect of overlaid material on optical transmission of side-polished fiber made by wheel side polishing[J]. *Journal of Electronic Science and Technology of China*, 2008, **6**(4): 445-448.