

doi:10.3788/gzxb20154405.0506003

基于 U 型弯曲光纤模间干涉的折射率传感

唐洁媛¹, 张仝仝¹, 曾央夫², 罗云瀚¹, 陈哲¹, 余健辉¹, 卢惠辉¹, 张军¹

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

(2 重庆大学 光电工程学院信息工程系, 重庆 400044)

摘 要:研究了去包层 U 型弯曲光纤的折射率传感特性. 首先根据模间干涉理论, 分析了 U 型光纤传感器的传感原理, 指出干涉谱损耗峰波长与环境折射率和弯曲半径有关. 利用单模光纤(SM-28)实验制作不同曲率半径的 U 型光纤传感器, 把传感器的 U 型部分浸入不同折射率的液体中, 研究其折射率传感特性. 当 U 型光纤曲率半径为 2.5~5.0 mm 时, 传输光谱中均能观察到明显的模间干涉现象; 当液体折射率从 1.30RIU 变到 1.43RIU 时, 光谱损耗峰波长发生红移, 且弯曲半径越大, 折射率传感灵敏度越高; 在曲率半径为 5 mm 时灵敏度为 207 nm/RIU(折射率 1.30~1.40RIU)和 1 220 nm/RIU(折射率 1.40~1.42RIU). 干涉峰的波形参量(半高宽、对比度)决定于包层模和纤芯导模之间的比例, 当曲率半径为 4 mm 时, 损耗峰半高宽最小达 3.2 nm. 综合半高宽和灵敏度两个参量, 得出曲率半径 4.5 mm 的 U 型光纤传感器品质因素最高, 分别为 43.1RIU⁻¹(折射率 1.30~1.40RIU)和 191.2 RIU⁻¹(折射率 1.40~1.42RIU), 可直接由 SM-28 单模光纤制成, 且制作工艺简单、成本低、机械强度高不需要任何特殊处理, 具有很好的应用前景.

关键词: 光纤; 传感器; 干涉; 折射率; 光谱; U 型弯曲光纤

中图分类号: TN253; TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)05-0506003-6

Refractive Index Sensing Based on the Modal Interference of U-shape Bending Fiber

TANG Jie-yuan¹, ZHANG Quan-quan¹, ZENG Yang-fu², LUO Yun-han¹, CHEN Zhe¹,
YU Jian-hui¹, LU Hui-hui¹, ZHANG Jun¹

(1 Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes;
Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

(2 Department of Information Engineering, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University,
Chongqing 400044, China)

Abstract: To develop a kind of easy-fabrication and stable optical fiber sensor, a new method for fabricating the fiber sensors was proposed, and the sensing performance of a U-shape bending single mode fiber was investigated. A section of SM-28 single mode fiber was bent into U-shaped structure with variety of radii of curvature, and then the U-shaped structure is fixed. After that, the U-shaped portion of the fiber was immersed in liquid with different refractive indices respectively. Meanwhile, the transmission spectrum of the U-shaped optical fiber was recorded. The modal interference theoretical analysis shows that the core guiding mode and the cladding mode, which propagate independently in the bending section, interferes each other in the straight region, and that the interference wavelengths

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 61177075, 61008057, 11004086, 61475066, 61405075)、广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目 (Nos. 2012A032300016、2012A080302004)、广东省学科建设专项资金 (No. 2013CXZDA005)、中央高校基本科研业务费专项资金 (Nos. 21614313、21613325、21613405) 和东南大学生物电子学国家重点实验室开放研究基金 (No. 2014H09) 资助

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

通讯作者: 罗云瀚 (1979-) 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光纤传感、生物医学光子学、光机电一体化. Email: yunhanluo@163.com

导师: 陈哲 (1957-) 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤无源器件, 微纳光纤传感器, 光学设计. Email: thzhechen@163.com

收稿日期: 2014-00-18; **录用日期:** 2014-01-28

<http://www.photon.ac.cn>

depend on the bending radius and surrounding refractive index. Obvious interference spectra can be clearly observed on the U-shape bending fiber with radius ranging from 2.5 mm to 5.0 mm. The interference wavelengths red-shift as the surrounding refractive index increases from 1.30 to 1.43RIU. Higher sensitivity could be achieved when the bending fiber has a larger bending radius. In the case of the bending radius being 5.0 mm, the sensitivity reaches to 207nm/RIU and 1 220 nm/RIU in the SRI region of 1.30~1.40 RIU and 1.40~1.42RIU. The characteristics of the interference dip, such as full width at half maximum, contrast are determined by the ratio of core guiding mode and cladding mode. The narrowest full width at half maximum was achieved when the bending radius was 4.5 mm of U-bend single mode fiber were discussed. A low cost and easy making sensor was proposed. The figure of merit, which integrates the sensitivity and the full width at half maximum, reach the maximal value of 43.1 RIU⁻¹ and 191.2 RIU⁻¹ in the surrounding refractive index region of 1.30~1.40 RIU and 1.40~1.42 RIU, when the bending radius is 4.5 mm. This sensor is fabricated with a common single mode fiber with simply bending process, and shows potential in the fiber sensing application with the features of low cost and high mechanical strength.

Key words: Optical fiber; Sensor; Interference; Refractive index; Spectrum; U-bend fiber

OCIS Codes: 060.2370;060.2310; 070.4790;260.3160

0 引言

光纤传感器因体积小、成本低、抗电磁干扰强、可应用于恶劣环境等特点,被广泛应用于压力、位移、温度、电流、折射率等物理量的测量.基于光纤的折射率传感器利用腐蚀^[1]、拉锥^[2-3]、抛磨^[4-6]等方式,使纤芯中的导模泄漏出来,与周围环境进行相互作用制成传感器,或者采用激光微加工^[7]、不同种类光纤相熔接^[8-11]的方式制成模间干涉型光纤传感器.不同原理和制作工艺的光纤传感器其灵敏性存在较大差异.基于拉锥工艺的光纤传感器能获得较高灵敏度. BIAZOLI等^[2]将单模-多模-单模结构的光纤拉锥到直径55 μm,获得最高灵敏度2 946 nm/RIU(折射率1.42~1.43).周赢武等^[3]将单模光纤错位熔接后再拉锥,获得4 086 nm/RIU的高灵敏度(折射率1.333~1.356)传感器.但是,拉锥处理后光纤非常脆弱,不利于实用化.基于表面等离子共振的传感器灵敏度也很高.陈小龙等^[6]在折射率1.33~1.43范围内,获得了高达4 100 nm/RIU的灵敏度,但这种传感器需要在光纤上镀金膜,工艺复杂,成功率较低.基于模间干涉的光纤传感器大多将几段不同类型光纤熔接在一起,制作工艺较前者简单,机械强度也较高,但基于模间干涉原理的光纤传感器的灵敏度较前者稍逊.赵宇等^[8]制作的多模干涉光纤传感器,折射率为1.336~1.372时,分辨率为 5.4×10^{-5} (灵敏度约185 nm/RIU).李恩邦等^[9]利用空心光纤多模干涉原理实现的传感器,当折射率小于1.40时,灵敏度只有88.07 nm.将不同类型的光纤熔接起来,制成的传感器熔接工艺的好坏直接决定器件性能,且处理过程使传感器的制作成本增加,成功率降低,重复性变差.

弯曲光纤是一种制作光纤传感器的简单有效的方

法.弯曲光纤纤芯中的部分导模会耦合到包层中成为包层模,或者成为辐射模,这将增加光纤的传输损耗,被称为弯曲损耗.研究认为,光纤的弯曲损耗随光纤曲率半径的减小而单调增大;光纤的弯曲损耗与曲率半径和光波长呈振荡变化^[12-13].2005年,KHIJWANIA等^[14]报道了基于弯曲的塑料包层石英光纤的湿度传感器.SAIA等^[15-16]实现了弯曲光纤的生物传感.2011年MATHEW等^[17]报道了基于弯曲1060XP特种光纤的湿度传感器.2013年,孙立鹏等^[18]利用弯曲拉锥Ga掺杂光纤实现了高灵敏度的折射率传感器.

本文直接用标准单模光纤SM-28制成U型光纤传感器,研究发现U型光纤不仅通光功率损耗对外界折射率变化有响应,而且其包层模和纤芯导模之间的模间干涉对折射率变化也非常敏感.通过研究不同弯曲半径U型光纤的干涉光谱对折射率变化的响应特性,得出了优化的U型光纤弯曲半径参量,实现了一种灵敏度高、成本低廉、制作简便、机械强度高、可监测光谱传感的光纤传感器.

1 工作原理

图1为U型单模光纤示意图,弯曲部分呈半圆弧状,两端是直光纤.O表示弯曲半径的圆点,r表示弯曲半径.对于弯曲部分,当光场在弯曲光纤中传输时,纤芯中导模倏逝场边缘部分的传输常量与包层模相同时,基模的倏逝场耦合成包层模,包层模在传输过程不断损耗,形成弯曲损耗.弯曲光纤的弯曲半径越小,经过纤芯导模的倏逝场耦合到包层的光场越多,造成的损耗也就越大.但是,并非所有耦合到包层的光场都损耗掉了,其中部分包层模式又会耦合回纤芯,与纤芯中的导模发生干涉^[13].

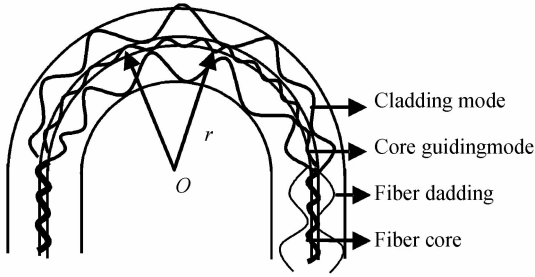


图1 U型弯曲光纤

Fig.1 Schematic diagram of U-shape bending fiber

对于给定的弯曲半径,包层模与纤芯模的相位差可以表示为

$$\varphi = kl - \beta z + \varphi_0 \quad (1)$$

式中 k 为包层模的波矢, l 为包层模的光程, β 为纤芯导模的波矢, z 为纤芯导模的光程, φ_0 为相位差常量.

当 $\varphi = 2\pi m (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 时,两种光场发生干涉相长,光纤的损耗最小;当 $\varphi = \pi n (n=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 时,两种光场发生干涉相消,光纤损耗最大.由于包层模在包层/纤芯和包层/外环境边界之间传播,所以包层模的波矢 k 除了与包层折射率有关外,还与包层外的环境折射率有关.当环境折射率发生改变时,光场耦合共振峰发生偏移.利用共振峰的偏移即可测出环境折射率的变化,构成基于弯曲光纤的折射率传感器.

2 实验装置

图2为实验装置.将一段单模光纤去除3cm长度的涂覆层,然后用紫外固化胶固定在玻片上,弯曲光纤的另一端至期望的曲率半径后用同样的方法固定在玻

片上,使U型光纤的U型探头部分悬空,用无水乙醇清洗U型光纤.将制备好的U型光纤的两端分别连接光源与光谱分析仪(日本YOKOGAWA公司,型号AQ6317C).分别将不同规格的折射率匹配液体(美国Cargille Labs公司)注入样品池内,将U型光纤的探头部分全部浸入匹配液中,用光谱分析仪记录数据.

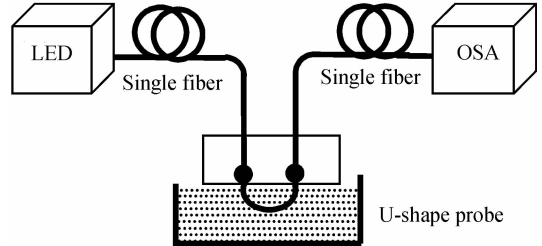


图2 实验装置

Fig.2 Schematic diagram of experimental setup

3 实验结果与分析讨论

3.1 模间干涉光谱

图3为不同曲率半径U型光纤在空气中的光谱曲线图.由图可以看出,当U型光纤的曲率半径小到一定程度时,便可以在光谱图中看到清晰的干涉现象,并呈现多个干涉峰,且干涉峰出现的位置以及干涉峰的大小均与曲率半径有关.当光纤发生弯曲时,弯曲部分光纤的折射率会发生变化,使得光纤的折射率沿光纤的径向方向呈现一定的梯度,从而破坏光场在纤芯中传播的条件,使得部分纤芯模耦合进入包层中,成为包层模.包层模在包层中传输并不断损耗能量.当光场

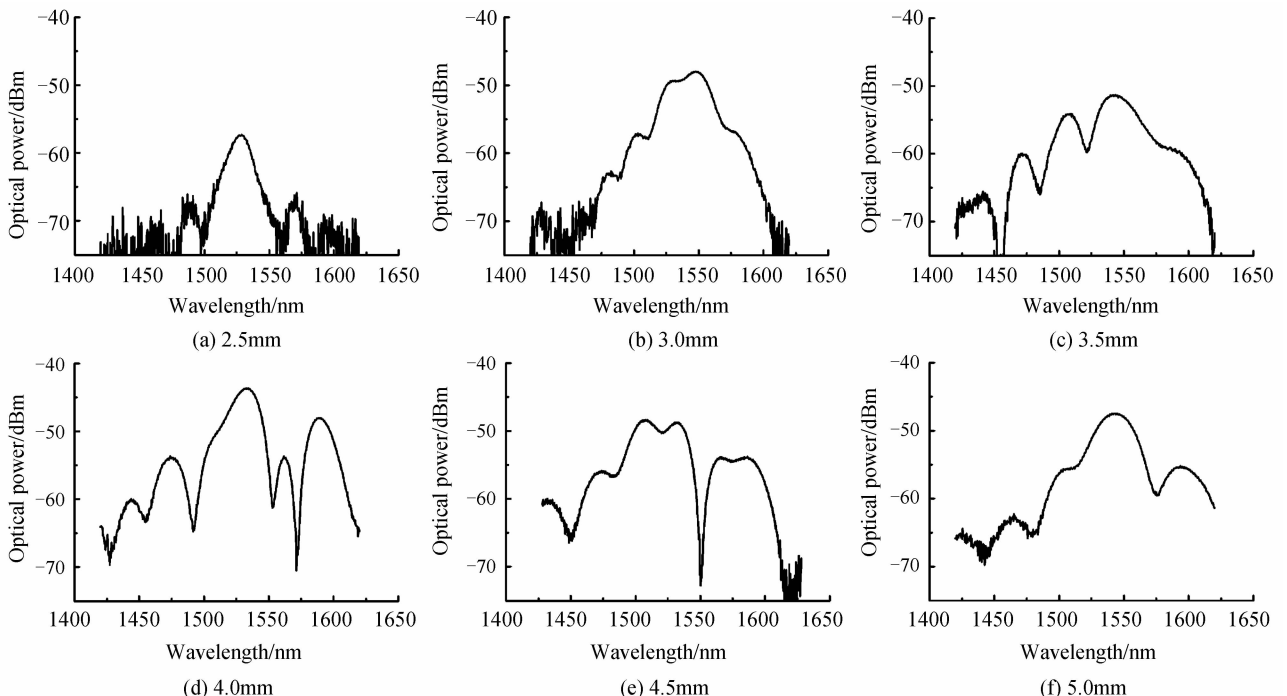


图3 U型光纤光谱曲线

Fig.3 Spectra of U-bend fibers with bending radius

再次进入光纤的直波导部分时,部分在包层中传输的包层模耦合回纤芯,与纤芯中的导模发生干涉.由于包层的折射率与纤芯的折射存在差异,耦合回纤芯的包层模与纤芯模存在相位差.对于某些波长的光,包层模与纤芯模干涉时相位差正好为 2π 的整数倍,出现干涉相长,光谱曲线中出现干涉峰;而某些波长的光场,包层模与纤芯模干涉时相位差为 π 的奇数倍,出现干涉相消,光谱中呈现损耗峰.对于不同弯曲半径的光纤而言,弯曲后光纤的折射率存在差异,且弯曲光纤的长度也不相同,使得发生干涉的包层模和纤芯模的相位差不同,导致不同弯曲半径的光纤的传输光谱存在较大差异.当曲率半径为 2.5 mm 时,U 型光纤损耗较大,光谱曲线中存在大量噪音信号,这是因为弯曲半径太小,纤芯中的全反射条件被破坏,纤芯中的导模大多成为辐射模而进入包层损耗掉了.当曲率半径为 3.0 mm 时,U 型光纤的损耗明显减少并出现多个干涉峰;当曲率半径为 4.0 mm 时,干涉峰最为明显,且幅值最大;当曲率半径增加到 5.0 mm 时,干涉峰幅值明显减小.这是因为,弯曲半径增大后,由纤芯导模耦合到包层模的光场减少,使得干涉减弱.由图 3 可以看出,曲率半径为 4.0 mm 时,纤芯中的导模与包层模干涉最为明显,表明包层模与纤芯导模发生强烈的干涉,且两者光场能量相当.

3.2 折射率传感灵敏度

选择曲率半径分别为 4.0 mm、4.5 mm、5.0 mm 的 U 型光纤,在恒温 (25℃) 条件下,分别浸入不同折射率液 (美国 Cargille Labs 公司,折射率从 1.30~1.43),通过光谱分析仪观测其光谱特性的变化,获得 U 型弯曲光纤的光谱特性随折射率的变化规律.图 4 (a) 为曲率半径 4.0 mm 的 U 型光纤在不同环境折射率的光谱曲线,图中大约有 5 个明显的损耗峰,随着折射率增加,各损耗峰向长波方向漂移.这是因为,与纤芯导模发生干涉的包层模的波矢 k 与包层外液体折射率有关.当液体折射率发生改变时,将导致光场耦合共振峰发生偏移.图 4(b) 为光谱曲线中 5 个损耗峰波长随折射率变化曲线,5 条曲线几乎等间隔,说明 5 个损耗峰波长对液体折射率的变化响应几乎相同.损耗峰波长随折射率的变化呈非线性增加.当折射率低于 1.40 时,损耗峰波长随折射率缓慢的增加,两者接近线性关系.当折射率大于 1.4 时,损耗峰波长随折射率的变化明显提高.当折射率从 1.30~1.40 时,5 个损耗峰折射率的平均灵敏度为 136 nm/RIU;当折射率从 1.40~1.42 时,5 个损耗峰的平均灵敏度为 548 nm/RIU.当环境折射率大于 1.43 时,由于折射率接近纤芯,包层模成为辐射模,无法耦合回纤芯,所以干涉现象消失.

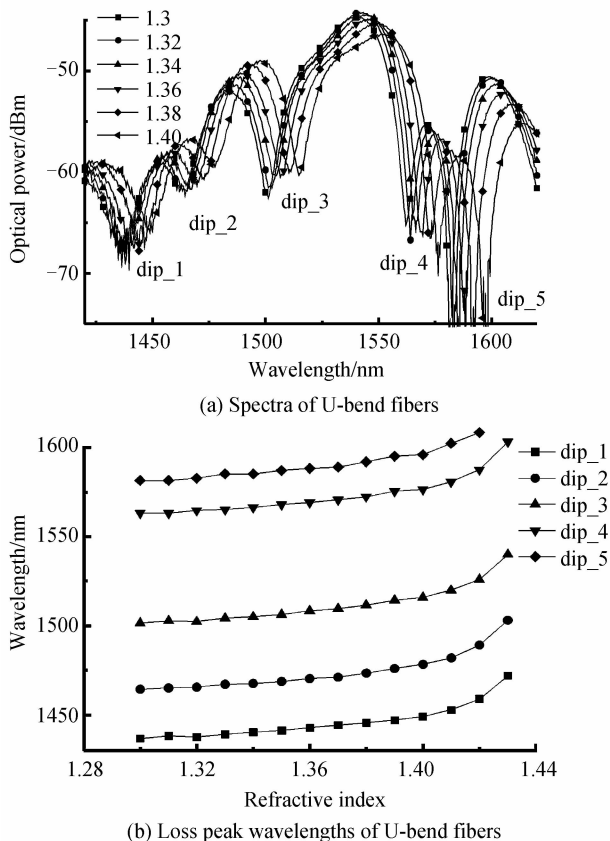
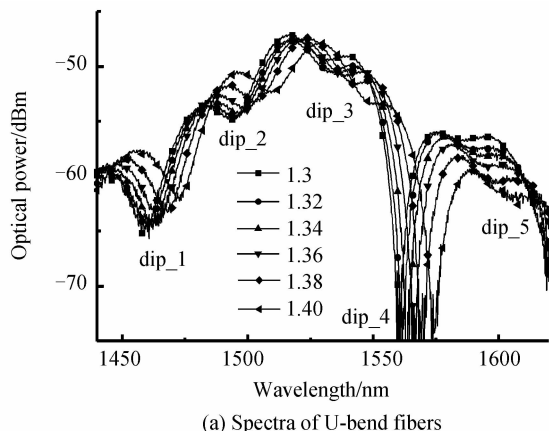


图 4 U 型光纤在不同液体折射率的光谱图,曲率半径 4 mm
Fig. 4 Spectra and the corresponding loss peaks wavelengths of U-bend fibers with radius curvature 4 mm when immersing into different refractive index liquids

图 5 为曲率半径为 4.5 mm 的 U 型光纤的光谱曲线以及损耗峰波长随环境折射率的变化曲线.光谱曲线中也可以看到 5 个损耗峰,其中第 4 个损耗峰特别深,而第 5 个损耗峰比较浅.各损耗峰波长也随液体折射率增加向长波方向漂移.当折射率从 1.30~1.40 时,损耗峰平均灵敏度为 146.5 nm/RIU;当折射率从 1.40~1.42 时,损耗峰的平均灵敏度分别为 650 nm/RIU.



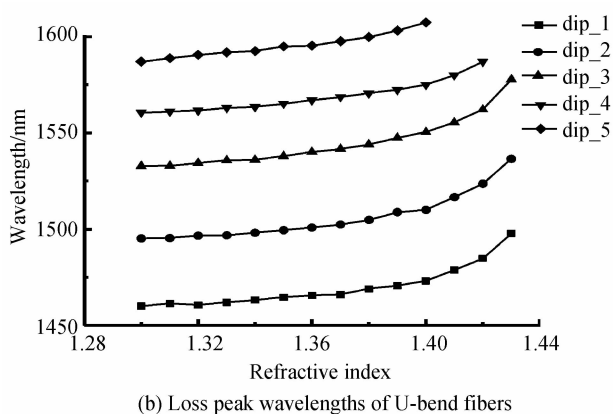
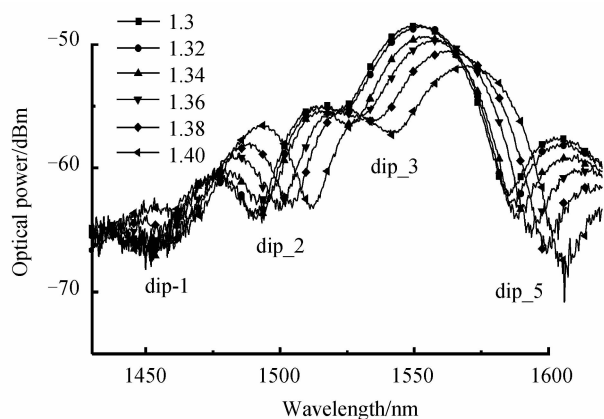


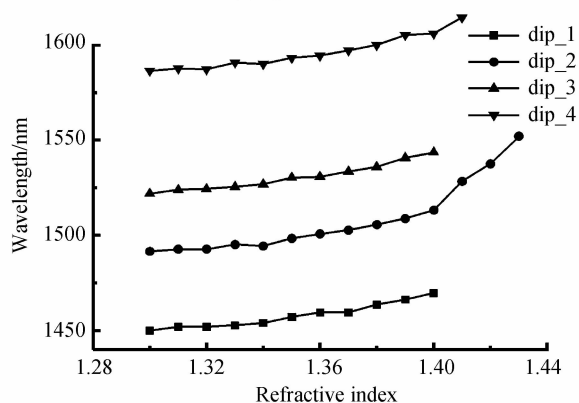
图5 U型光纤在不同液体折射率的光谱图,曲率半径4.5 mm

Fig. 5 Spectra and the corresponding loss peaks wavelengths of U-bend fibers with radius curvature 4.5 mm when immersing into different refractive index liquids

图6为曲率半径为5.0 mm U型光纤的光谱曲线以及损耗峰波长随环境折射率的变化曲线.从光谱曲线中可以看到4个损耗峰,且第1个损耗峰噪音比较大,各损耗峰随环境折射率增加向长波方向漂移,响应



(a) Spectra of U-bend fibers



(b) Loss peak wavelengths of U-bend fibers

图6 U型光纤在不同液体折射率的光谱图,曲率半径5 mm

Fig. 6 Spectra and the corresponding loss peak wavelengths of U-bend fibers with radius curvature 5 mm when immersing into different refractive index liquids

规律与图4、图5类似.当折射率从1.30~1.40时,损耗峰平均灵敏度为207 nm/RIU;当折射率从1.40~1.42时,损耗峰的平均灵敏度分别为1 220 nm/RIU.

比较图4、图5和图6得出,随着外环境折射率的增加,所有U型光纤的损耗峰均向长波长方向漂移.曲率半径为4 mm的U型光纤的模间干涉最明显,形成的干涉峰峰值最大,但是对外环境折射率变化的灵敏度最低.随着U型光纤曲率半径的增大,虽然U型光纤光谱曲线中的峰峰值有所降低,但是对外环境折射率的灵敏度有所增加.这可能是因为曲率半径较大的U型光纤,弯曲部分光纤的长度较长,从而使得纤芯中的导模和包层中的包层模的光程差较大.对于不同曲率半径的U型光纤而言,当外环境折射率改变量相同时,由于曲率半径较大的U型光纤两种模式之间的光程差较大,所以形成的相位差也较大,在光谱上,表现出干涉峰的漂移量增加.

3.3 折射率传感的品质因素

U型弯曲光纤利用模间干涉形成的损耗峰的波长漂移量作为检测量实现对环境折射率的传感.在实际应用过程中,这种传感器件对可分辨的最小折射率差,除了与U型光纤的传感灵敏度有关外,还与损耗峰的半高宽有关.为了综合考虑损耗峰半高宽的影响,引入品质因素(Figure of Merit, FOM)^[19].

$$FOM = \frac{S}{\Delta\lambda} \quad (2)$$

式中S表示灵敏度, $\Delta\lambda$ 表示损耗峰半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM).

表1为不同曲率半径r的U型弯曲光纤的灵敏度,各损耗峰中最小半高宽以及品质因素等参量,RI表示环境折射率.由表中数据可以看出,虽然曲率半径为5 mm的U型光纤的灵敏度最高,但是半高宽也最宽,导致品质因素反而最低;曲率半径为4.5 mm的U型光纤虽然灵敏度不是最大,但是半高宽较小,使得品质因素最高.

表1 不同曲率半径的U型单模光纤传感性能比较

Table 1 The comparison of sensor performances of U-shape bending fiber with different bending radius

r/mm	RI/(RIU)	S(nm/RIU)	$\Delta\lambda$ /nm	FOM (RIU ⁻¹)
4.0	1.30~1.40	136	3.2	42.5
	1.40~1.42	548	3.2	171.3
4.5	1.30~1.40	146.5	3.4	43.1
	1.40~1.42	650	3.4	191.2
5.0	1.30~1.40	207	16.0	12.9
	1.40~1.42	1 220	16.0	76.3

4 结论

通过弯曲SM-28单模光纤,制作了U型光纤传感器件,并研究了其折射率传感特性.对于这种检测方

式,在干涉现象明显的情况下,U型光纤的曲率半径越大,灵敏度越高.曲率半径为5 mm的U型光纤的灵敏度分别为207 nm/RIU(折射率1.30~1.40)和1 220 nm/RIU(折射率1.40~1.42).由于曲率半径为5 mm的U型光纤的损耗峰半高宽较大,使得品质因素最低.反而,曲率半径为4.5 mm的U型光纤,由于损耗峰半高宽较窄,品质因素反而最高,约为43.1RIU⁻¹(折射率1.30~1.40)和191.2RIU⁻¹(折射率1.40~1.42).这种传感器直接由SM-28单模光纤制成,具有制作工艺简单、低成本、不需要任何特殊处理,且机械强度高,可广泛应用在光纤传感网络中.

参考文献

- [1] LIANG Wei, HUANG Yan-yi, XU Yong, *et al.* Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **86**(4): 1511-1512.
- [2] BIAZOLI C R, SILVA S, FRANCO M A R, *et al.* Multimode interference tapered fiber refractive index sensors[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(24): 5941-5945.
- [3] ZHOU Ying-wu. Experimentally study on high-sensitivity fiber-optic refractometers based on mach-zehnder interference [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7): 841-844.
周赢武. 基于光纤 M-Z 干涉的高灵敏度液体折射率传感器的实验研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(7): 841-844.
- [4] BAI Chun-he, LUO Yun-han, CHEN Zhe. Characteristics of side-polished fiber in refractive index sensing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(10): 1182-1186.
白春河, 罗云瀚, 陈哲. 基于侧边抛磨光纤倏逝场的折射率传感特性[J]. *光子学报*, 2013, **42**(10): 1182-1186.
- [5] LIN Yu-Cheng. Characteristics of optical fiber refractive index sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2013, **55**(3): 574-576.
- [6] CHEN Xiao-long, LUO Yun-han, XU Meng-yun, *et al.* Refractive index and temperature sensing based on surface plasmon resonance fabricated on a side-polished fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(2): 0206005.
陈小龙, 罗云瀚, 徐梦云, 等. 基于侧边抛磨光纤表面等离子体共振的折射率和温度传感研究[J]. *光学学报*, 2014, **34**(2): 0206005.
- [7] SUN Dong, RAN Zeng-ling, RAO Yun-jiang. Laser-machined miniature fiber-optic refractive-index sensor tip [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1239-1242.
- [8] 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.
- [9] LI En-bang, ZHENG Dan-ying, ZHANG Chen-liang, *et al.* A refractive index sensor based on the multimode interference in a hollow fiber[J]. *Journal of optoelectronics & Laser*, 2010, **21**(10): 1439-1444.
李恩邦, 郑丹莹, 张晨亮. 基于空心光纤多模干涉的折射率传感器研究[J]. *光电子 & 激光*, 2010, **21**(10): 1439-1444.
- [10] FUKANO H, HASHIOMOTO T, TAUE S. Reflection-type optical fiber refractive-index sensor using a multimode interference structure with high sensitivity [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, **53**(2): 04EG05.
- [11] TANG Jie-yuan, CHEN Zhe, LUO Yun-han, *et al.* Side polished SMS fiber sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(10): 1187-1192.
唐洁媛, 陈哲, 罗云瀚, 等. 侧边抛磨 SMS 光纤传感器[J]. *光子学报*, 2013, **42**(10): 1187-1192.
- [12] HARRIS A J, CASTLE P F. Bendloss measurements on high numerical aperture single-mode fibers as a function of wavelength and bend radius [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, **LT-4**(1): 34-40.
- [13] HARAN F M, BARTON J S, KIDD S R, *et al.* Optical fiber interferometric sensors using buffer guided light [J]. *Measurement Science and Technology*, 1994, **5**(5): 526-530.
- [14] KHIJWANIA S K, SRINIVASAN K L, SINGH J P. An evanescent-wave optical fiber relative humidity sensor with enhanced sensitivity[J]. *Sensors and Actuators B*, 2005, **104**(2): 217-222.
- [15] SAIA V V R, KUNDUB T, MUKHERJIA S. Novel U-bent fiber optic probe for localized surface plasmon resonance based biosensor[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2009, **24**(9): 2804-2809.
- [16] BHARADWAG R, SAIA V V R, THAKARE K, *et al.* Evanescent wave absorbance based fiber optic biosensor for label-free detection of E. coli at 280 nm wavelength [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2011, **26**(7): 3367-3370.
- [17] MATHEW J, SEMENOVA Y, RAJAN G, *et al.* Improving the sensitivity of a humidity sensor based on fiber bend coated with a hygroscopic coating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, **43**(7): 1301-1305.
- [18] SUN Li-peng, LI Jie, TAN Yan-zhen, *et al.* Bending effect on modal interference in a fiber taper and sensitivity enhancement for refractive index measurement [J]. *Optical Express*, 2013, **21**(22): 26714-26720.
- [19] KUMAR S, SHARMA G, SINGH V. Sensitivity modulation of surface plasmon resonance sensor configurations in optical fiber waveguide[J]. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 2013, **37**(2): 167-176.