

A Corrosion Enhancing Optical Fiber Michelson Interference Type Refractive Index Sensor

Wenxian Li^{1,2}, Qian Liu^{1,2}, Yanhua Ma^{1,2}, Xiaozhe Ding^{1,2}, Lijun Li^{1,2}

¹College of Electronic communication and Physics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

²Provincial Key Laboratory of mine disaster prevention and control, Qingdao Shandong

Email: 1079776964@qq.com

Received: Sep. 7th, 2017; accepted: Sep. 22nd, 2017; published: Sep. 28th, 2017

Abstract

In this paper, a refractive index sensor based on Michelson interference principle is fabricated by using thin-core fiber (TCF). The sensor uses a two-stage single-mode fiber (SMF) in the middle of melting a thin-core fiber to form Michelson interference structure. The cladding mode is excited at the first fusion point and the interference occurs at the second fusion point. The experimental results show that with the increase of the intensity of the core, the increase of the refractive index causes the interference fringe to be blue-shifted. Then, in order to enhance the sensitivity of the sensor, we have corroded the thin-core fiber [1]. After the etching, it is found that under the low refractive index, the refractive index has a good linear relationship with the wavelength. Compared with the pre-corrosion sensor, the sensor performance which after the corrosion has been greatly improved. The experimental results show that the refractive index reaches -564.09 nm/RIU at the long wavelength in the high refractive index region of 1.42-1.4435, and the sensitivity at the second, third and fourth bands was increased by 0.9655, 0.71 and 0.7 times, respectively, compared with that before the non-etching.

Keywords

Refractive Index Sensing, Thin-Core Fiber, Michelson Interference, Corrosion

一种腐蚀增敏光纤迈克尔逊干涉型折射率传感器

李文宪^{1,2}, 刘倩^{1,2}, 马彦华^{1,2}, 丁小哲^{1,2}, 李丽君^{1,2}

¹山东科技大学, 电子通信与物理学院, 山东 青岛

文章引用: 李文宪, 刘倩, 马彦华, 丁小哲, 李丽君. 一种腐蚀增敏光纤迈克尔逊干涉型折射率传感器[J]. 光电子, 2017, 7(3): 95-102. DOI: 10.12677/oe.2017.73014

²矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地，山东 青岛
Email: 1079776964@qq.com

收稿日期：2017年9月7日；录用日期：2017年9月22日；发布日期：2017年9月28日

摘要

本文利用细芯光纤(TCF)并基于迈克尔逊干涉原理制备了折射率传感器。该传感器采用两段单模光纤(SMF)中间熔融一段细芯光纤，形成迈克尔逊干涉结构。该结构由于单模与细芯光纤的纤芯不匹配，使得在第1个熔接点处激发出包层模式，并在第2个熔接点处与纤芯模耦合发生干涉，实验结果显示随着折射率的增加干涉条纹发生蓝移。接着我们为了增强传感器的灵敏度又对细芯光纤进行腐蚀[1]，腐蚀之后与之前相比发现，在低折射率条件下，折射率与波长变化呈现很好线性关系，对比腐蚀前传感器性能有了很大的提高。实验最终结果显示，在高折射率区1.42~1.4435范围内，折射率在长波长处最高达到-564.09 nm/RIU，并且第二、三和四个波段处灵敏度与未腐蚀前相比分别提高了0.9655、0.71和0.7倍。

关键词

折射率传感，细芯光纤，迈克逊干涉，腐蚀

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于光纤本身具有成本低廉、抗腐蚀和抗电磁干扰等特性，且光纤类型传感器又具有体积小、重量轻等优点，因此近年来光纤类传感器引起越来越多人的关注与研究。尤其是在折射率[2][3]、温度[4][5]、应变[6]和曲率[7]等方面都有了广泛的应用，其中折射率的测量方面很多研究者都做出了工作。例如傅海威[8]等人设计制作了一种基于单模-多模-细芯-单模光纤马赫-曾德尔干涉仪结构的可同时测量折射率和温度的传感器，该结构透射光谱在1535 nm和1545 nm附近分别得到了-53.03 nm/RIU和-54.24 nm/RIU的折射率灵敏度。高平安[9]等人基于细芯-单模-细芯结构，利用马赫-曾德尔原理制作了高灵敏度光纤折射率传感器，该结构在折射率1.33~1.38范围内得到了159 nm/RIU的高折射率。谢灵骁[10]等人提出了一种基于弯曲标准单模光纤的折射率传感器，并在折射率1.3288~1.3721范围内得出，两个干涉共振峰的折射率灵敏度分别为147.602和125.459 nm/RIU。

本文制作了单模-细芯-单模结构的迈克尔逊干涉仪，对折射率1.3341~1.4435范围进行了研究，腐蚀前和腐蚀后结果进行对比，得到了较好的数据结果，为进一步改进光纤结构实现灵敏度的增加提供了实验依据。

2. 传感器的制作与原理

本文设计的基于细芯光纤的传感器结构及原理图如图1所示。可以看到我们将长度为3 cm的细芯光纤利用光纤熔接机嵌入到单模光纤中，形成迈克尔逊型全光纤传感器。本文所使用的单模光纤纤芯直径为8.3 μm，包层直径为125 μm；细芯光纤纤芯直径为5 μm，包层直径为125 μm。

如图1所示，当光由单模光纤通过第一个熔接点进入细芯光纤时，其中熔接点起到耦合器的作用，光经过耦合进入细芯光纤中，由于单模光纤纤芯直径大于细芯光纤，部分光将耦合进入细芯光纤的包层

中，因此光进入细芯光纤时会同时激发纤芯模和包层模；当光通过第二个熔接点进入单模光纤时，纤芯模和包层模会耦合发生干涉；当光进入单模光纤到达法拉第旋镜时，光会发生反射再次进入细芯光纤中，使得干涉进一步加强，最终形成干涉条纹通过光谱仪显示出来。

图 2 为该传感器形成的干涉光谱图。本文中配置了不同浓度的氯化钠和蔗糖溶液，我们利用阿贝折射仪对两种溶液进行了折射率校正，最终得出 0.1%~25% 浓度的氯化钠和 30%~60% 浓度蔗糖溶液，分别对应的折射率范围为 1.3333~1.3765 和 1.3845~1.4435。对于折射率的研究我们分成了两个部分：低折射率区和高折射率区 1.3341~1.4435。对于低折射率区我们选择了波长为 1539 nm 处的干涉谷的特征波长作为观察的对象，高折射率区我们选择了四处干涉谷的特征波长作为观察对象。

由传感原理可知，细芯光纤作为该传感器的传感臂与外界折射率溶液接触，而且细芯光纤的纤芯模有效折射率与外界环境折射率 SRI 无关，只受入射光波长的影响；而包层模的折射率不仅受到入射光波长的影响还与 SRI 有关，因此当 SRI 变化时，包层模折射率会发生变化从而导致纤芯模 - 包层模折射率差发生改变，最终使得干涉谱的干涉谷特征波长发生变化。

当光发生干涉时，该传感器的传输光强可以表示为[11]：

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[2\pi(n_{co}^{eff} - n_{cl,j}^{eff})L/\lambda] \quad (1)$$

其中： I_1 和 I_2 分别表示细芯光纤的纤芯模和包层模的光强； L 表示细芯光纤的长度； λ 表示入射波长； n_{co}^{eff} 和 $n_{cl,j}^{eff}$ 分别表示纤芯模和第 j 阶包层模的相位差。这里我们假设光传输后纤芯模和第 j 阶包层模之间的相

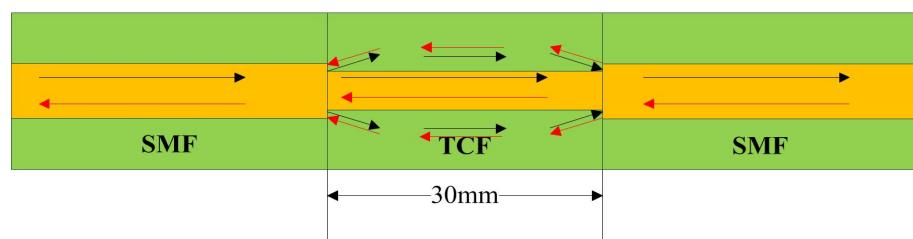


Figure 1. Sensor structure and transmission light schematic

图 1. 传感器结构及传光原理图

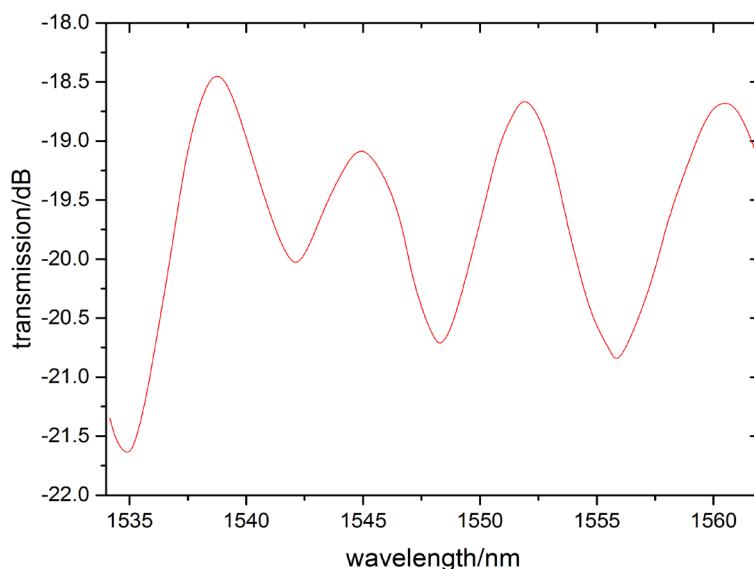


Figure 2. Interference spectrum of the sensor

图 2. 传感器的干涉光谱

位差为 $\Delta\varphi$ ，且其满足公式：

$$\Delta\varphi = 2\pi(n_{co}^{eff} - n_{cl,j}^{eff})L/\lambda = 2\pi\Delta n_{eff}L/\lambda \quad (2)$$

(2)式中： Δn_{eff} 表示纤芯模与包层模的折射率差。结合(1)式和(2)式可知，当 $\Delta\varphi$ 为 π 的奇数倍时即 $\Delta\varphi = (2k+1)\pi$ 时，干涉光强达到最小，此时干涉谱中相应的干涉谷特征波长可表示为：

$$\lambda = 2(n_{co}^{eff} - n_{cl,j}^{eff})L/(2k+1) = 2\Delta n_{eff}L/(2k+1) \quad (3)$$

本试验中我们忽略温度对细芯光纤的影响，保持细芯光纤在室温状态下，因此增加外界折射率时，包层模的折射率也会相应增加。我们将(3)式对折射率求导，也就是特征波长的灵敏度可以表示为：

$$\partial\lambda_j/\partial n = -(2L/2k+1) \cdot (\partial n_{cl,j}^{eff}/\partial n) \quad (4)$$

由(4)式可知特征波长灵敏度只与受外界折射率影响的包层模折射率有关，因此如果想要提高传感器的灵敏度，我们只需要考虑提高包层模折射率变化率即可。所以本文中我们对细芯光纤的包层进行了腐蚀操作，减少包层直径，使得包层模更容易受外界环境折射率的影响，从而提高该传感器的灵敏度。我们从(4)式中还可以得到特征波长的灵敏度为负值，所以可以得到随着外界折射率的增加，干涉谱的干涉谷特征波长向短波方向漂移，这与我们实验所得的数据相匹配。

3. 实验结果与数据分析

图 3 所示为我们的实验装置图，实验中我们为了避免弯曲对细芯光纤产生影响，我们将传感光纤拉直并固定在 V 型槽中。实验配置了不同浓度的氯化钠和蔗糖溶液作为外界环境折射率。

3.1. 低折射率实验

3.1.1. 腐蚀前实验

实验时我们将该结构光纤固定在 V 型槽中，分别对 0.1%~1% 浓度的氯化钠溶液进行折射率实验。分析发现随着折射率的提高，反射谱波谷谷值分别在 1542、1548、1556 和 1564 nm 附近时，数据变化虽然没有很好的线性规律，但是在整体上随着浓度升高反射谱发生蓝移现象。四个波谷最终漂移量分别为：0.4 nm、0.533 nm、0.633 nm 和 0.433 nm。

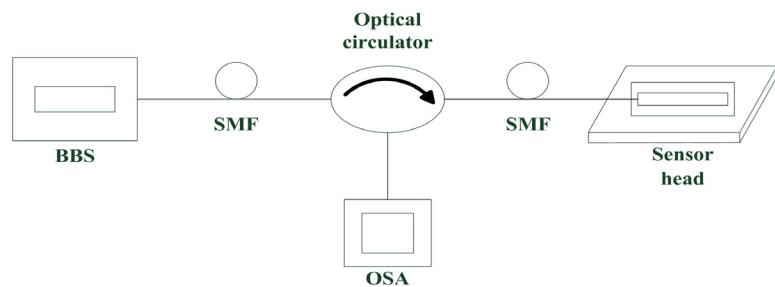
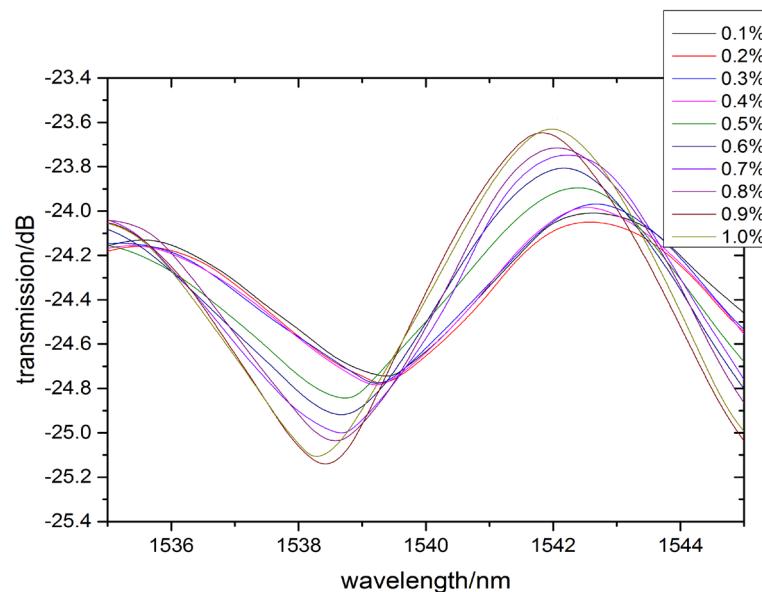
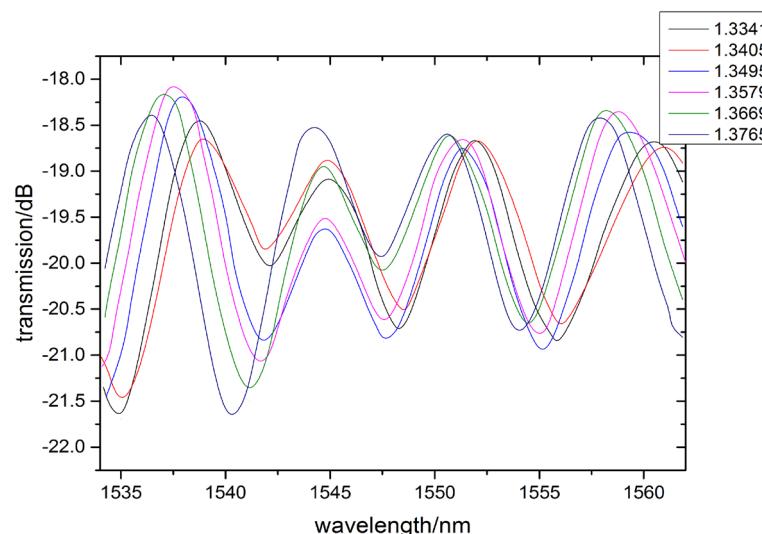
3.1.2 腐蚀后实验

我们利用 40% 浓度的 HF 对 3 cm 的细芯光纤进行腐蚀，腐蚀 15 分钟后用清水洗掉 HF 并用氢氧化钠对其中合用清水多次清洗后，将其拉直并固定在 V 型槽中进行低折射率实验。实验中我们选择 1539 nm 处波谷处进行监测。实验中保持传感器处于室温状态，当我们增加外界环境折射率时，得到干涉谱的响应如图 4 所示。图 4 表明当氯化钠溶液浓度由 0.1% 增加到 1% 时，反射谱的干涉谷波长向短波方向漂移。我们可以发现腐蚀后干涉谱干涉谷特征波长漂移量随着折射率增长呈现很好的线性关系。波长漂移量为 1 nm，相比腐蚀前有了很大的提高。

3.2. 高折射率实验

3.2.1. 腐蚀前实验

同低折射率实验步骤一样，我们对浓度为 1% 至 60%，也就是折射率为 1.3341 至 1.4435 的溶液进行实验，得到的干涉谱如图 5 (1.3341~1.3765) 和 图 6 (1.3845~1.4435) 所示。实验发现 4 个波谷都向短波方向漂移，且漂移量由短波向长波方向依次为 9.4 nm、8.966 nm、10.534 nm 和 12.9 nm。对 4 个波段附近数据变化进行拟合分析知，折射率在 1.42 附近时，波长漂移量明显增加。分析原因是在折射率 1.42 时，折

**Figure 3.** Experimental setup diagram**图 3.** 实验装置图**Figure 4.** Interference spectra of low refractive index area after etching**图 4.** 腐蚀后低折射率区干涉谱**Figure 5.** The interference spectra of the refractive index region 1.3341~1.3765 before etching**图 5.** 腐蚀前折射率 1.3341~1.3765 干涉谱

射率数值与细芯光纤包层折射率数值相近，使得纤芯模更多的耦合进入包层中，干涉加强进而使波长漂移量增加，因此将数据分成两端进行拟合。拟合后发现对于折射率在 1.3341~1.4108 范围内，对应由短波长到长波长的四个波段处灵敏度分别为 -63.716、-34.872、-43.681 和 -66.786 nm/RIU；对于折射率在 1.42~1.4435 范围内，长波长波段灵敏度比短波段处高，由此对应由短波长到长波长的四个波段处灵敏度分别为 -196.48、-215.72、-294.15 和 -332.05 nm/RIU。

3.2.2. 腐蚀后实验

同低折射率腐蚀实验相同，我们用 HF 溶液对细芯光纤进行腐蚀并对折射率 1.3341 至 1.4435 的溶液进行实验，得到的干涉谱如图 7 (1.3341~1.3669) 图 8 (1.3765~1.4108) 和图 9 (1.42~1.4435) 所示。同样发现

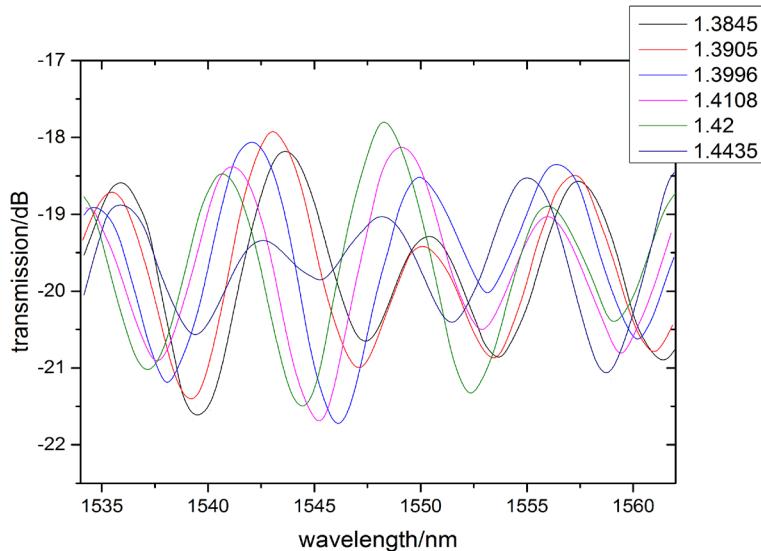


Figure 6. The interference spectra of the refractive index region 1.3845~1.4435 before etching

图 6. 腐蚀前折射率 1.3845~1.4435 干涉谱

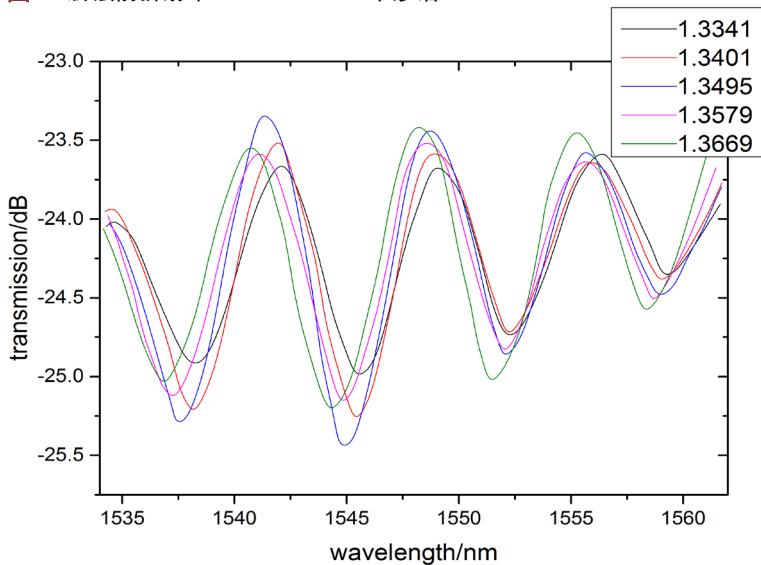


Figure 7. The interference spectra of the refractive index region 1.3341~1.3669 after etching

图 7. 腐蚀后折射率 1.3341~1.3669 干涉谱

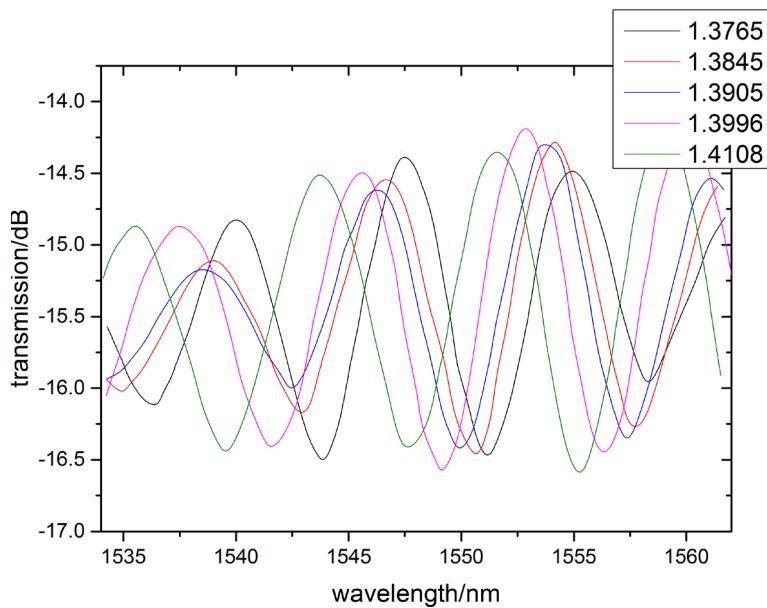


Figure 8. The interference spectra of the refractive index region 1.3765~1.4108 after etching

图 8. 腐蚀后折射率 1.3765~1.4108 干涉谱

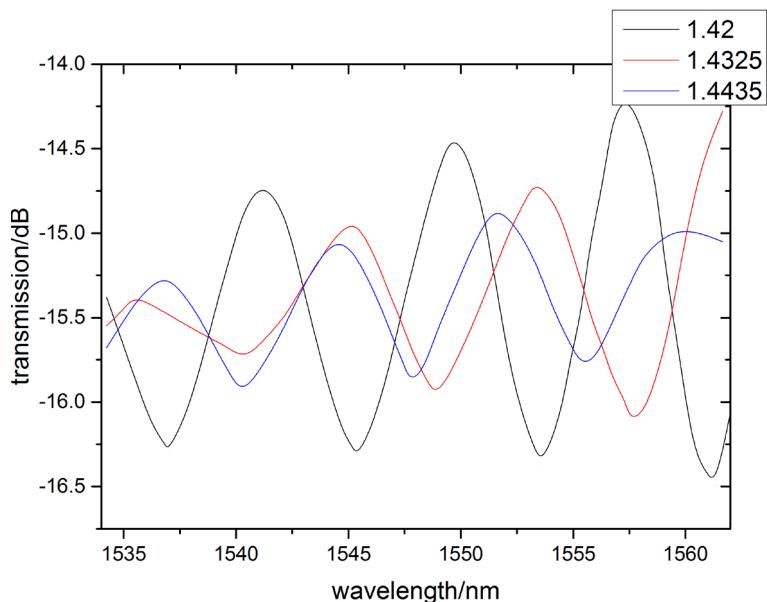


Figure 9. The interference spectra of the refractive index region 1.42~1.4435 after etching

图 9. 腐蚀后折射率 1.42~1.4435 干涉谱

4个波谷都向短波方向漂移,且漂移量由短波向长波方向依次为6.8 nm、13.633 nm、18.6 nm 和 18.667 nm。

根据实验数据我们对其进行分三段拟合后发现,与腐蚀前相比折射率在1.3341~1.3765范围内时,腐蚀后灵敏度依然很低,甚至与未腐蚀前相比都稍有不如;但是在1.3845~1.4108范围内,腐蚀后灵敏度有了较大的提高,4个波段处由短波长到长波长依次为-135.33、-126.47、-131.07 和-91.701 nm/RIU;尤其是在1.42~1.4435这个高折射率范围内,折射率在长波长处最高达到了-564.09 nm/RIU,波二、波三和波四处分别提高了0.9655、0.71 和 0.7倍。

4. 结论

本文对单模 - 细芯 - 单模光纤结构测量溶液折射率的实验进行了研究，研究发现该结构对于低折射率区有响应但是不敏感而且没有很好的线性关系；对于高折射率区该结构显示的很高的灵敏度，在长波段灵敏度最高达 -332.05 nm/RIU 。为了在低折射率区能够得到较高的灵敏度也为了提高该传感器的整体灵敏度，我们对细芯光纤进行了腐蚀试验。腐蚀前后对比发现，腐蚀后在低折射率区数据具有很好的线性关系，数据拟合度达到了 0.9748，与腐蚀前相比有了很大的提高。在高折射率区 $1.3845\sim1.4108$ 范围内，腐蚀后灵敏度有了较大的提高，尤其是在 $1.42\sim1.4435$ 这个高折射率范围内，折射率在长波长处最高达到 -564.09 nm/RIU ，并且第二、三和四个波段处灵敏度与未腐蚀前相比分别提高了 0.9655、0.71 和 0.7 倍。这为以后该结构传感器测量折射率实验提供了初略的数据参考。

参考文献 (References)

- [1] Chen, J.P., Zhou, J. and Shu, L. (2013) High-Sensitivity Mach-Zehnder Interferometer Refractive Index Sensor Based on Cladding-Etched Fiber. *Opto-Electronic Engineering*, **40**, 52-56.
- [2] 白春河, 罗云瀚, 陈哲, 等. 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.
- [3] 张桂娜, 袁雪梅. SMS 光纤结构用于液体折射率测量的特性[J]. 电子质量, 2016(6): 78-85.
- [4] 宋海峰, 龚华平, 等. 基于波长与强度双解调的光纤温度传感器[J]. 光电子激光, 2013, 24(9): 1694-1697.
- [5] 刘凡凡. SMS 结构光纤温度传感器[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [6] 苏丹. 基于保偏光纤的应变传感器研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2015.
- [7] 王栋远, 孙明伟, 金永兴, 等. 同时测量温度和曲率的光纤传感器[J]. 光子学报, 2015, 44(11): 20-24.
- [8] 傅海威, 闫旭, 李辉栋, 邵敏, 等. 基于纤芯失配型马赫 - 曾德尔光纤折射率和温度同时测量传感器研究[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 58-63.
- [9] 高平安, 荣强周, 孙浩, 忽满利, 等. 纤芯失配熔接的高灵敏度光纤折射率传感器[J]. 应用光学, 2013, 34(3): 542-546.
- [10] 谢灵骁, 张信普, 李丽霞, 彭伟, 等. 基于弯曲光纤的折射率传感器研究[J]. 光电子激光, 2016, 27(3): 247-252.
- [11] 李辉栋, 傅海威, 邵敏, 等. 基于光纤气泡和纤芯失配的 Mach-Zehnder 干涉液折射率传感器[J]. 物理学报, 2013, 62(2): 65-71.

Hans 汉斯

知网检索的两种方式：

1. 打开知网首页 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5450，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱：oe@hanspub.org