

一种用于液体折射率测量的空芯光纤F-P干涉传感器

杨颜新^{1,2},李立彤¹,席佳伟²,邓理²,李金泽²,见超超²,宋欣²,孙浩²,洪登^{1*}

(1.长飞光纤光缆股份有限公司 光纤光缆先进制造与应用技术全国重点实验室,武汉 430073;

2.西安电子科技大学 光电工程学院,西安 710071)

摘要:为实现溶液折射率的快速检测,设计了一种基于空芯光纤的法布里-珀罗干涉传感器。采用单模光纤-空芯光纤-单模光纤结构,以不同浓度的甘油水溶液为待测样品进行实验研究,系统考察了空芯光纤长度(50~300 μm)对传感器灵敏度的影响。实验结果表明,传感器输出峰值功率随溶液折射率降低而增大,且空芯光纤长度越短,灵敏度越高;当空芯光纤长度为50 μm 时,传感器灵敏度达到61.395 77 dBm/RIU,拟合优度 $R^2=0.977\ 41$,为检测折射率的最优长度。

关键词:光纤传感;空芯光纤;法布里-珀罗干涉

中图分类号:TN253.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)02-0012-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.02.003

Hollow fiber F-P interferometric sensor for refractive index measurement

YANG Yanxin^{1,2}, LI Litong¹, XI Jiawei², DENG Li²,

LI Jinze², JIAN Chaochao², SONG Xin², SUN Hao², HONG Deng^{1*}

(1. State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Yangtze Optical Fibre and Cable Joint Stock Limited Company (YOFC), Wuhan 430073, China; 2. School of Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: To achieve rapid detection of solution refractive index, a Fabry-Perot interferometric sensor based on hollow-core fiber is designed. The single-mode fiber-hollow-core fiber-single-mode fiber structure is adopted, and glycerol-water solutions with different concentrations are used as the test samples for experimental investigation. The influence of hollow-core fiber length (50~300 μm) on sensor sensitivity is systematically examined. The experimental results show that the output peak power of the sensor increases with the decrease of solution refractive index, and a shorter hollow-core fiber leads to higher sensitivity. When the hollow-core fiber length is 50 μm , the sensor sensitivity reaches 61.395 77 dBm/RIU with a goodness of fit of $R^2 = 0.977\ 41$, which is the optimal length for refractive index detection.

Key words: fibre-optic sensing, hollow-core fibre, Fabry-Perot interference

0 引言

随着现代科学与技术不断发展,对样品折射率的检测方法正日益呈现出多元化的态势。传统的阿贝

收稿日期:2025-02-28。

基金项目:国家自然科学基金项目(12304047,62305259)资助;陕西省自然科学基金项目(2023-JC-QN-0851)资助;光纤光缆先进制造与应用技术全国重点实验室(长飞公司)开放课题项目(SKLD1907)资助。

作者简介:杨颜新(2000—),女,硕士研究生,现就读于西安电子科技大学光电工程学院光学工程专业,先后荣获国家奖学金、企业奖学金等荣誉,曾参与大应变光纤传感系统及其他项目,主要从事光纤传感器的结构设计、传感特性方面的研究工作。

***通信作者:**洪登(1988—),男,硕士,中级工程师,主要研究方向为光纤传感、特种光纤。



折射仪^[1]、马赫-曾德尔干涉仪^[2]、光栅衍射^[3]等检测方法凭借其各自独特的原理与优势,在众多检测领域中均有广泛应用。然而,随着科研探索的深入和实际应用需求的不断拓展,现有的检测装置暴露出一定的局限性。特别是在对各类液体折射率的精细测量和生物分子折射率的高精度检测方面,传统设备难以满足日益严苛的要求。随着光纤传感技术取得重大突破,利用光纤传感技术检测折射率已成为光学传感领域的研究热点。相较于传统检测手段,光纤传感技术的抗电磁干扰能力强,可在复杂电磁环境中稳定工作^[4-5],避免了外界电磁信号对检测结果的干扰,确保了数据的准确性。

空芯光纤(HCF)是一类结构独特的特种光纤,其纤芯区域为空气。其中,基于三明治结构的HCF传感器具有制备工艺简单、成本低廉、检测过程便捷以及灵敏度高优点,已被广泛应用于传感检测领域^[6]。1995年,Sirkis J等人^[7]首次提出将一小段HCF拼接于两端单模光纤(SMF)之间,构成法布里-珀罗(F-P)应变传感器。实验表明,该传感器的应变响应与电阻应变片的测量结果高度吻合,并证实HCF的长度会影响传感器性能,其最优长度在微米量级。2013年,Fei Qi等人^[8]提出一种基于HCF的全光纤多模态干涉仪,采用单模-空心-单模(SHS)传感结构。该结构可实现应变与温度的双参量检测,其应变灵敏度为 $-1.21 \text{ pm}/\mu\text{e}$,温度灵敏度为 $21.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。HCF的微结构能够与待测物质直接相互作用。2016年,Hou Maoxiang等人^[9]提出在SMF-HCF-SMF结构基础上,采用激光钻孔技术在HCF的环形包层上制作开放微通道,将其用作气体压力传感通道。该传感器高压灵敏度达 $3.592 \text{ nm}/\text{MPa}$,低温交叉灵敏度为 $7.5 \text{ kPa}/^\circ\text{C}$,其传感机理在于空芯内空气压力可诱导折射率变化。该结构进一步拓展了HCF F-P传感器的应用范围。由于气体压力检测易受温度影响,Liu Yinggang等人^[10]提出一种可实现温度补偿的级联微腔全光纤F-P干涉传感器,用于气压和温度双参量检测。该传感器由SMF及其末端的2段微小HCF构成,且2段不同纤芯直径的HCF之间采用错位熔接。实验结果表明,该传感器具有2种不同的线性温度灵敏度和线性气压灵敏度,可实现气压和温度的同时区分测量。

然而,上述基于HCF级联形成的微腔传感结构主要适用于气体和温度检测^[11-12]。本文设计一种应用于液体折射率测量的HCF F-P干涉传感器。

1 传感器设计与仿真

1.1 传感器结构设计

本文设计的用于液体折射率测量的HCF F-P干涉传感器,其核心传感单元采用HCF结构,如图1所示。该结构由中心空气孔、包层介质以及外层折射率介质组成^[13],是实现F-P干涉效应的核心物理载体,其主要结构参数为:空气孔直径 $d_{\text{core}}=75 \mu\text{m}$,包层厚度 $d_{\text{cladd}}=25.5 \mu\text{m}$,纤芯折射率 $n_0=1$ 。包层材料为熔融石英,

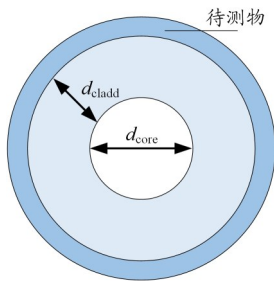


图1 HCF结构示意图

其折射率^[14]为

$$n(\lambda)^2 = 1 + \frac{0.696\ 166\ 3\lambda^2}{\lambda^2 - 0.068\ 404\ 3^2} + \frac{0.407\ 942\ 6\lambda^2}{\lambda^2 - 0.116\ 241\ 4^2} + \frac{0.897\ 479\ 4\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896\ 161^2} \quad (1)$$

式中: λ 为波长。

1.2 传感器工作原理

HCF的折射率分布具有特殊的反波导特性,其纤芯折射率低于包层介质,最简结构为单空芯薄壁管结构。其中,玻璃包层的折射率为 n_1 ,厚度为 t 。光在传播过程中,从空气芯透过双层包层薄壁后的相位变化为 ϕ_0 ;而经包层薄壁2次反射后,到达薄壁另一侧的光相位变化为 ϕ_1 ,二者形成的相位差为 $\Delta\phi$ 。当该相位差为 π 的偶数倍时,光在玻璃薄壁外侧发生相干相长,此时光无法被限制在空气芯内,即为谐振效应,该相位条件为谐振条件;反之,当相位差为 π 的奇数倍时,光在玻璃薄壁外侧发生相干相消,光被有效束缚在空气芯内,此为反谐振状态。

HCF的仿真模场分布如图2所示。可以看出,由于包层和纤芯折射率的差异,部分光不再完全局限于纤芯内,而是发生散射并进入包层,在纤芯周围形成较强的倏逝场分布。这为利用倏逝场检测外层待测介质的折射率变化提供了可行途径。

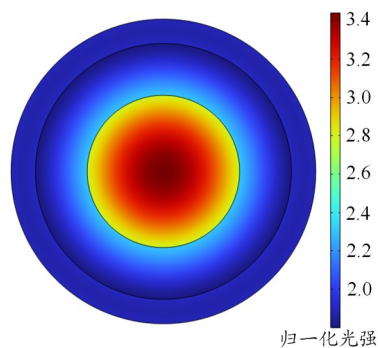
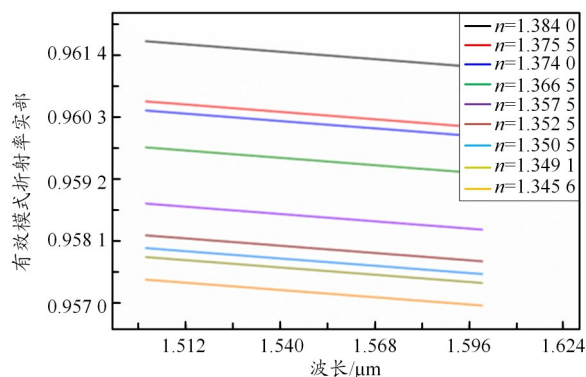


图2 HCF仿真模场图

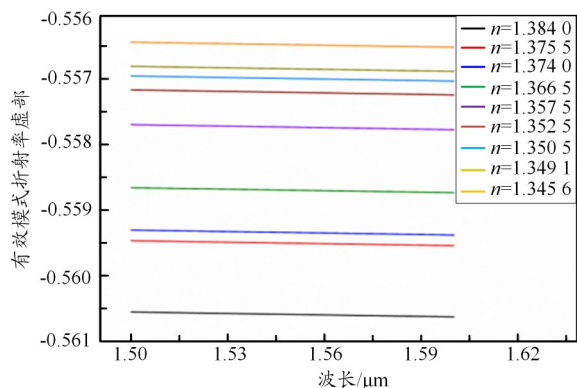
1.3 传感器性能仿真

本文仿真计算不同外部待测介质折射率 n 下传感器模场的有效模式折射率实部和虚部,得到光纤模场有效模式折射率实部与波长的关系,如图3(a)所示。随着 n 逐渐降低,光纤有效模式折射率实部随之呈降低趋势。究其原因,光纤中的光场空间分布由纤芯、包层及外部待测介质的折射率分布共同决定:当外部待测折射率较高时,部分光场会分布于包层与外部待测介质中;而随着 n 逐渐降低,光场会更倾向于集中在纤芯和包层区域。由于纤芯折射率小于包层折射率,光场更多集中在纤芯时,整体的有效模式折射率实部会向纤芯折射率靠近,所以呈现出逐渐降低的趋势。光纤有效模式折射率虚部与波长的关系如图3(b)所示。可以看出,随着 n 的减小,有效模式折射率虚部同

杨颜新, 李立彤, 席佳伟, 等: 一种用于折射率测量的空芯光纤F-P干涉传感器



(a) 实部



(b) 虚部

图3 不同外部折射率下,有效模式折射率实部和虚部与波长关系

样呈逐渐减小趋势。这是因为待测物折射率降低后,光场被更紧密地束缚在纤芯内,包层区域倏逝场的光损耗随之逐渐减小,光纤整体的传输损耗也相应降低,而有效模式折射率的虚部直接表征光纤的光场损耗特性,因此呈现出与待测物折射率一致的变化趋势。

上述分析表明,所仿真光纤能够用于外部检测折射率变化,对折射率变化较为敏感,具备作为光纤传感器的潜力。

2 实验与结果分析

2.1 实验装置与样品制备

为探究实际性能并确定最优传感长度,本文开展了实验研究,搭建的实验装置如图4所示。该系统由宽带光源(S5FC1005S,带宽为50 nm)、光谱仪(AQ6370B)及SMF-HCF-SMF结构构成,其中HCF长度为100 μm。该长度选取旨在平衡传感器性能:过长易引入噪声干扰,过短则可能导致灵敏度不足^[18]。实验使用丙三醇与去离子水配制不同浓度的甘油水溶

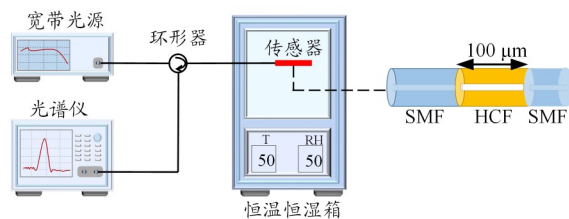


图4 实验装置示意图

液作为待测样品,其折射率由阿贝折射仪标定。

实验采用SMF-HCF-SMF结构进行折射率检测。传感器制备时,将切割至目标长度的HCF(纤芯直径为75 μm)与2段SMF(纤芯直径长约10 μm)依次熔接,熔接过程借助光学显微镜监测对准状态与端面质量,确保形成平整、低损耗的熔接点。显微镜下制备完成的HCF传感器如图5所示。

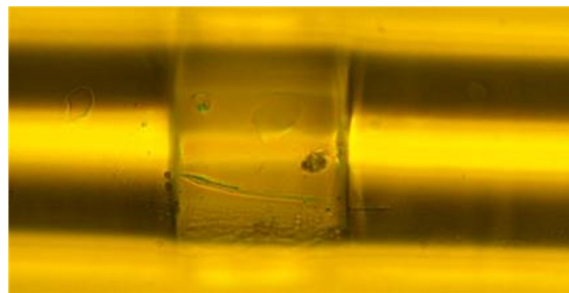


图5 光学显微镜下制备完成的HCF传感器

本文使用丙三醇与去离子水配制不同浓度的甘油水溶液作为待测样品,其折射率由阿贝折射仪标定,如表1所示。由于HCF对温度敏感,所有检测均在25 °C恒温环境下进行,样品测试前置置于恒温恒湿箱中保存。

表1 不同浓度甘油水溶液对应折射率

体积比 (丙三醇:水)	浓度/%	折射率
1:1	31.50	1.384 0
1:1.5	25.00	1.375 5
1:2	23.85	1.374 0
1:2.5	21.55	1.366 5
1:3	16.05	1.357 5
1:3.5	13.00	1.352 5
1:4	11.75	1.350 5
1:4.5	10.80	1.349 1
1:5	8.5	1.345 6

2.2 不同HCF长度下的折射率检测结果

为探究HCF长度对传感器性能的影响,本文分别

制备了HCF长度为50、100、125、150、300 μm的传感器,在1 518~1 600 nm波段内,采用SMF-HCF-SMF结构对不同折射率的甘油水溶液进行检测。

当HCF长度为100 μm时,反射光谱如图6所示。可以看出,在1 520~1 600 nm波段范围内存在多个反射峰。本文选取4号峰作为主峰,该峰波形对折射率变化响应显著。针对其峰值功率随折射率的变化关系开展3次重复测量,以减小因溶液浓度间隔较小(体积比为0.5)导致的个别数据点波动误差。结果如表2所示。可以看出,3次实验中峰值功率均随折射率降低而升高。

当HCF长度为50 μm时,反射光谱如图7所示。可以看出,与100 μm相比,反射峰数量减少,谱线较缓。本文选择2号峰作为主峰,该峰在光谱中位置独

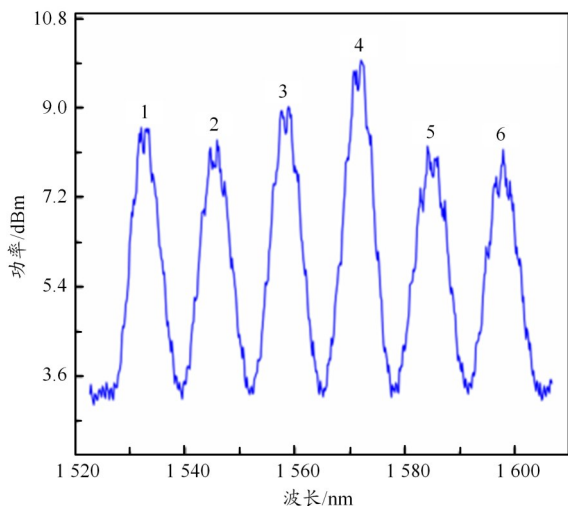


图6 HCF长度为100 μm时,完整反射光谱

表2 HCF长度为100 μm时,峰值功率值随外部折射率变化情况

外部折射率 n	峰值功率/dBm		
	实验一	实验二	实验三
1.384 0	9.951	9.980	9.864
1.375 5	10.266	10.011	9.913
1.374 0	10.398	10.423	9.985
1.366 5	10.435	10.535	10.314
1.357 5	10.459	10.564	10.729
1.352 5	10.508	10.642	10.745
1.350 5	10.579	10.709	10.759
1.349 1	11.109	11.138	11.279
1.345 6	11.155	11.271	11.095

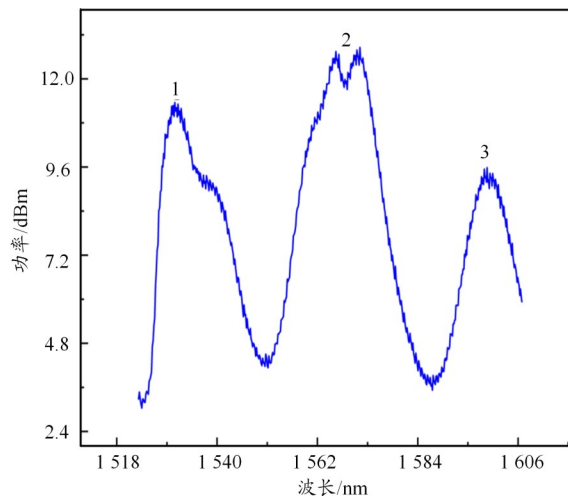


图7 HCF长度为50 μm时,完整反射光谱

立、受相邻峰干扰较小。对其峰值功率随折射率变化进行了3次重复测量,结果如表3所示。可以看出,3次实验中峰值功率随折射率的变化规律保持一致,均呈现折射率降低、峰值功率增大的趋势,且本结构峰值功率整体高于100 μm长度传感器,表明HCF长度越小,传输损耗越小,峰值功率越高。

表3 HCF长度为50 μm时,峰值功率值随外部折射率变化情况

外部折射率 n	峰值功率/dBm		
	实验一	实验二	实验三
1.384 0	12.866	12.968	12.855
1.375 5	13.244	13.008	13.113
1.374 0	13.499	13.058	13.223
1.366 5	13.718	13.104	13.604
1.357 5	13.911	13.159	13.826
1.352 5	13.953	13.212	13.857
1.350 5	13.991	13.285	14.027
1.349 1	14.031	13.316	14.162
1.345 6	14.108	13.392	14.205

当HCF长度为150 μm时,反射光谱如图8所示。可以看出,反射峰数量增至15个。本文选择10号峰作为主峰,对其峰值功率随折射率变化进行了3次重复测量,结果如表4所示。可以看出,前2次实验中,峰值功率随折射率降低而增大,与HCF长度为50、100 μm的规律一致。第三次实验数据出现明显异常,推测因甘油分子残留于HCF表面干扰了检测,该组数据仅用于误差对比分析。

杨颜新, 李立彤, 席佳伟, 等: 一种用于折射率测量的空芯光纤F-P干涉传感器

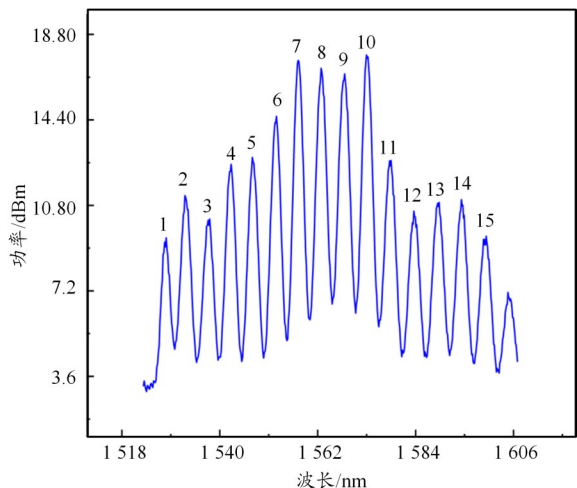


图8 HCF长度为150 μm时,完整反射光谱

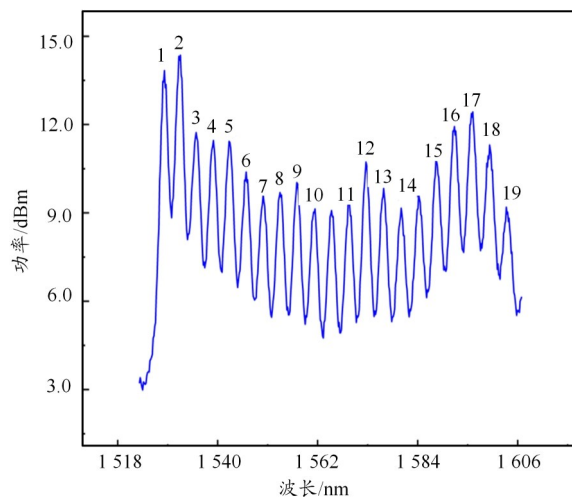


图9 HCF长度为300 μm时,完整反射光谱

表4 HCF长度为150 μm时,峰值功率随外界溶液折射率变化值

外部折射率 n	峰值功率/dBm		
	实验一	实验二	实验三
1.384 0	16.638	16.780	9.289
1.375 5	16.775	18.035	9.287
1.374 0	17.749	18.047	9.372
1.366 5	17.999	18.076	9.325
1.357 5	18.103	18.124	9.377
1.352 5	18.133	18.197	9.440
1.350 5	18.142	18.449	9.460
1.349 1	18.209	18.708	9.468
1.345 6	18.235	18.733	9.492

表5 HCF长度为300 μm时,峰值功率随外界溶液折射率变化值

外部折射率 n	峰值功率/dBm		
	实验一	实验二	实验三
1.384 0	14.353	14.327	13.727
1.375 5	14.468	14.427	14.298
1.374 0	14.484	14.453	14.323
1.366 5	14.521	14.516	14.373
1.357 5	14.556	14.570	14.386
1.352 5	14.586	14.594	14.436
1.350 5	14.618	14.627	14.471
1.349 1	14.633	14.695	14.519
1.345 6	14.680	14.710	14.573

当HCF长度为300 μm时,反射光谱如图9所示。可以看出,反射峰最为密集(19个),本文选择2号峰作为主峰,该峰在密集光谱中仍保持较好的辨识度。对其峰值功率随折射率变化进行了3次重复测量,结果如表5所示。可以看出,3次实验中,峰值功率变化规律与前文一致,均随折射率降低而增大,但数据波动较HCF长度50、100 μm时更为明显,推测因传感区域过长引入了额外的抖动和噪声干扰。

综上所述,HCF长度较短时($\leq 100 \mu\text{m}$)传感器具有较稳定的检测能力;当HCF长度增至150 μm时,已出现异常数据,检测重复性下降;而300 μm时数据波动明显增大,光谱质量显著降低。

3 实验结果分析

根据2.2节的实验数据,本文对不同HCF长度下

传感器峰值功率与折射率的关系进行线性拟合,对应的灵敏度及拟合优度(调整后 R^2)汇总如表6~表9所示。

由表6~表9可知,不同HCF长度下传感器拟合灵敏度存在显著差异:HCF长度为50 μm时,3次实验灵敏度分别为53.888 82、27.144 51、61.395 77 dBm/RIU,第三次实验拟合效果最优($R^2=0.977 41$);HCF长度为100 μm时,分别为43.088 34、49.856 21、60.210 54 dBm/RIU,同样以第三次实验拟合效果最佳($R^2=0.907 02$);HCF长度为150 μm时,前两次实验灵敏度为39.831 31、35.716 45 dBm/RIU,第三次数据异常且拟合优度偏低,检测精度与稳定性较差;HCF长度为300 μm时,灵敏度分别为24.237 66、26.992 68、24.940 11 dBm/RIU,第二次实验拟合效果最好($R^2=0.962 75$),峰值功率与折射率相关性较强。

对比不同HCF长度的传感器灵敏度,当HCF长度

表6 HCF长度为50 μm时,3次实验线性拟合折射率灵敏度数值

实验次数	功率峰值灵敏度/(dBm/RIU)	调整后 R^2
第一次	53.881 62	0.918 60
第二次	27.144 51	0.927 87
第三次	61.395 77	0.977 41

表7 HCF长度为100 μm时,3次实验线性拟合折射率灵敏度数值

实验次数	功率峰值灵敏度/(dBm/RIU)	调整后 R^2
第一次	43.088 34	0.702 75
第二次	49.856 21	0.800 19
第三次	60.210 54	0.907 02

表8 HCF长度为150 μm时,3次实验线性拟合折射率灵敏度数值

实验次数	功率峰值灵敏度/(dBm/RIU)	调整后 R^2
第一次	39.831 31	0.735 05
第二次	35.716 45	0.688 12
第三次	5.320 18	0.844 12

表9 HCF长度为300 μm时,3次实验线性拟合折射率灵敏度数值

实验次数	功率峰值灵敏度/(dBm/RIU)	调整后 R^2
第一次	24.237 66	0.946 1
第二次	26.992 68	0.962 75
第三次	24.940 11	0.873 5

为300 μm时,传感器功率峰值灵敏度大幅降低。由于传感器的传感区域过长,光功率的损耗增大,使得传感器噪声增大,无法对微小信号检测,因此造成传感器检测灵敏度降低。当HCF长度为50 μm时,传感器的功率峰值灵敏度最大,能够达到61.395 77 dBm/RIU,此时传感器的传输损耗最小,检测时引入的弯曲损耗同样最小,保证了光信号的传输质量。因此,在此3段式传感结构中,HCF的长度不宜过长,只有较短的HCF才能精准完成检测。证明在使用SMF-HCF-SMF传感结构检测溶液折射率时,最合适的HCF长度为50 μm。

4 结束语

本文设计并验证了一种基于HCF的法布里-珀罗干涉折射率传感器。仿真分析了HCF中的模场分布及有效模式折射率随外部折射率的变化规律,证实该结构对折射率变化具有敏感响应。实验采用SMF-HCF-SMF结构对不同浓度的甘油水溶液进行检测,系统研究了HCF长度(50~300 μm)对传感器性能的影响。

实验结果表明,传感器输出峰值功率随溶液折射率降低而增大,且HCF长度越短,传输损耗越小、灵敏度越高。其中,HCF长度为50 μm时灵敏度最佳,达61.395 77 dBm/RIU,拟合优度 $R^2=0.977 41$ 。该长度下传感器检测精度高、稳定性好,是本文结构检测折射率的最优选择。本研究为液体折射率检测提供了一种结构简单、制备便捷、灵敏度较高的技术方案,相关数据可为后续传感器优化设计与应用拓展提供参考。

参考文献:

- [1] 陈振华,陈爱霞,余剑敏. 几何画板模拟阿贝折射仪测折射率[J]. 大学物理实验, 2015, 28(2): 77-79.
- [2] 潘文,冯晓军,刘星雨,等. 光纤马赫-曾德尔干涉微位移测量系统[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(3): 202-207.
- [3] 宋梁. 光栅衍射法测量溶液性质[D]. 吉林: 东北师范大学, 2014.
- [4] Yariv A, Winsor H V. Proposal for detection of magnetic fields through magnetostrictive perturbation of optical fibers[J]. Optics Letters, 1980, 5: 87.
- [5] Wu Yue, Li Pei, Jin Wenxing, et al. Highly sensitive curvature sensor based on asymmetrical twin core fiber and multimode fiber[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 92: 74-79.
- [6] Zhao Yong, Li Xuegang, Cai Lu, et al. Measurement of RI and temperature using composite interferometer with hollow-core fiber and photonic crystal fiber[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(11): 2631-2636.
- [7] Sirkis J, Berkoff T A, Jones R T, et al. In-line fiber etalon(ILFE) fiber-optic strain sensors[J]. Lightwave Technol, 1995, 13(7): 1256-1263.
- [8] Fei Qi, Hu Limin, Dong Xinyong, et al. A hollow core fiber-based intermodal interferometer for measurement of strain and temperature[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(9): 3468-3471.
- [9] Hou Maoxiang, Zhu Feng, Wang Ying, et al. Antiresonant reflecting guidance mechanism in hollow-core fiber for gas pressure sensing[J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27890.
- [10] Liu Yinggang, Wang Yuxi, Yang Danqing, et al. Hollow-core fiber-based all-fiber FPI sensor for simultaneous measurement of air pressure and temperature[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(23): 11236-11241.
- [11] Koziol P, Bojęs P, Jaworski P, et al. Enhancing gas diffusion in antiresonant hollow-core fiber gas sensors using microchannels[J]. Photonic Sensors, 2025, 15(3): 250336.
- [12] Chen Mingyang, Su Xinqi, Gong Tianyi, et al. Temperature-insensitive curvature sensor based on hollow-core fiber assisted microbubble Mach-Zehnder interferometer[J]. Applied Physics B, 2024, 130(4): 57.
- [13] Xu Ronghui, Ke Chengran, Xue Yipu, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on SMF-HCF-FCF-HCF-SMF fiber structure[J]. Sensors, 2022, 22: 8897.
- [14] Ghosh G, Endo M, Iwasaki T. Temperature-dependent Sellmeier coefficients and chromatic dispersions for some optical fiber glasses[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(8): 1338-1342.