

螺旋形塑料光纤表面等离子体共振折射率传感器

徐跃 薛鹏 张瑞 陈媛媛

Plasmon resonance refractive index sensor of spiral-shaped plastic optical fiber surface

XU Yue, XUE Peng, ZHANG Rui, CHEN Yuanyuan

引用本文:

徐跃, 薛鹏, 张瑞, 等. 螺旋形塑料光纤表面等离子体共振折射率传感器[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 226–233. DOI: 10.5768/JAO202344.0108002

XU Yue, XUE Peng, ZHANG Rui, et al. Plasmon resonance refractive index sensor of spiral-shaped plastic optical fiber surface[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 226–233. DOI: 10.5768/JAO202344.0108002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0108002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

侧边抛磨的U型金溅射塑料光纤等离子体共振传感器

Side-grinding U-shaped gold sputter plastic fiber SPR sensor

应用光学. 2019, 40(3): 511–516 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0308002>

基于PDMS薄膜的等离子体光栅仿真分析

Simulation analysis of plasma grating based on PDMS thin films

应用光学. 2021, 42(2): 371–376 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0208002>

基于平面波导激励的修正长程表面波的传感器研究

Modified long-range surface plasmon wave sensor based on planar waveguide excitation

应用光学. 2018, 39(2): 246–251 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0205002>

金纳米颗粒掺杂光致聚合物的体全息混合光栅模型

Volume holographic mixed-gratings model in photopolymer doped with gold nanoparticles

应用光学. 2018, 39(5): 707–713 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0505002>

基于塑料镜片防水加硬抗老化光学薄膜的研制

Fabrication of anti-water hard and anti-aging optical film based on plastic lens

应用光学. 2017, 38(1): 83–88 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0105002>

高灵敏度光纤应变传感器

High sensitive fiber strain sensor

应用光学. 2017, 38(5): 848–851 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0508002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 01-0226-08

螺旋形塑料光纤表面等离子体共振折射率传感器

徐 跃^{1,3,4}, 薛 鹏^{2,3,4}, 张 瑞^{1,3,4}, 陈媛媛^{1,4}

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051;
3. 中北大学 前沿交叉科学研究院, 山西 太原 030051; 4. 山西省光电信息与
仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

摘 要: 研究了基于波长调制的螺旋形塑料光纤 (plastic optical fiber, POF) 表面等离子体共振 (surface plasmon resonance, SPR) 折射率传感器。采用机械热压和扭曲法将塑料光纤制备成螺旋形, 在螺旋形 POF 上通过磁控溅射蒸镀一定厚度 (约 50 nm) 的金属薄膜来激励 SPR 效应, 从而形成螺旋形 POF-SPR 传感器。通过对螺旋形 POF-SPR 传感器的结构进行修饰, 研究不同结构参数对折射率传感特性的影响。实验结果表明: 由厚度为 500 μm 扁平形 POF 扭曲、螺纹数为 4 的螺旋形 POF-SPR 传感器具有较好的线性度和折射率传感特性, 在折射率为 1.335~1.400 范围内测得的灵敏度为 1 262 nm/RIU。该传感器具有成本较低、制备简单、结构稳定等优点。

关键词: 塑料光纤; 螺旋形; 折射率传感; 表面等离子体共振

中图分类号: TN253; O433.4

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0108002

Plasmon resonance refractive index sensor of spiral-shaped plastic optical fiber surface

XU Yue^{1,3,4}, XUE Peng^{2,3,4}, ZHANG Rui^{1,3,4}, CHEN Yuanyuan^{1,4}

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. Institute of Frontier and Interdisciplinary Science, North University of China, Taiyuan 030051, China; 4. Shanxi Province Optoelectronic Information and Instrument Engineering Technology Research Center, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A spiral-shaped plastic optical fiber (POF) surface plasmon resonance (SPR) refractive index sensor based on wavelength modulation was studied. First, the plastic optical fiber was prepared into a spiral by mechanical hot pressing and deforming method, and then a metal film with a certain thickness (about 50 nm) was deposited on the spiral-shaped POF by magnetron sputtering to stimulate the SPR effect, thereby forming a spiral-shaped POF-SPR sensor. By modifying the structure of the spiral-shaped POF-SPR sensor, the effects of different structural parameters on the refractive index sensing properties were studied. The experimental results show that the spiral-shaped POF-SPR sensor deforming from a flat POF with a thickness of 500 μm and a thread number of 4 has the better linearity and refractive index sensing characteristics, and the measured sensitivity in the refractive index range of 1.335~1.400 is 1 262 nm/RIU. The proposed sensor has the advantages of low cost, simple preparation and stable structure.

Key words: plastic optical fiber; spiral; refractive index sensor; surface plasmon resonance

收稿日期: 2022-03-18; 修回日期: 2022-05-13

基金项目: 山西省基础研究计划资助项目 (20210302124269); 国家自然科学基金 (62105302); 国家自然科学基金面上项目 (201901D111145)

作者简介: 徐跃 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感技术研究。E-mail: xu_saywill@163.com

通信作者: 薛鹏 (1991—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事光纤传感技术研究。E-mail: xuepeng@nuc.edu.cn

引言

表面等离子体共振 (SPR) 折射率传感器技术是近年来研究的热点之一,通过在光纤表面涂覆某种贵金属纳米颗粒 (Au、Ag 等)、石墨烯、金属氧化物等材料来激励 SPR 效应,由于其可检测微小的折射率 (refractive index, RI) 变化,因此在生化领域有重要的应用^[1-3]。在目前已报道的多种类型 SPR 折射率传感器中,光纤 SPR 折射率传感器因具有高灵敏、低成本、尺寸紧凑和可远距离监测等优点而备受关注。目前,常见的光纤 SPR 折射率传感器有:腐蚀布拉格光栅 SPR 传感器^[4]、倾斜布拉格光栅 SPR 传感器^[5]、长周期光栅 SPR 传感器^[6]、光子晶体光纤 SPR 传感器^[7]、马赫曾德干涉仪 SPR 传感器^[8]和微腔结构光纤 SPR 传感器^[9]等。然而,通常用于制造 SPR 传感器的光纤为单模、多模或微结构石英光纤,由于石英材料的质地坚硬、韧性较差,使得制作过程较为复杂且石英光纤易碎,封装工艺复杂昂贵。

近年来,由于螺旋形塑料光纤 (POF) 低温软化易于热定型的特性,与石英光纤传感器相比,POF 传感器具有制备工艺简单和测试成本低廉的优势,从而被认为是石英光纤折射率传感器的最具价值的潜在替代品之一。迄今为止,研究人员通过改变支持 SPR 的纳米结构的材料、薄膜厚度、形状、结构、大小、分布、组成和密度来调整光谱的共振波长,研究出多种不同结构的 POF 基 SPR 折射率传感器。如 2014 年, N.Cennamo 等人^[10]提出了一种基于等离子体传感器平台的锥形 POF-SPR 折射率传感器,研究了传感探头中锥形部分的存在与否和放置位置对传感特性的影响。2017 年, S.Jiang 等人^[11]提出了一种基于 U 形 POF 的局部 SPR (LSPR) 传感器,在 U 形 POF 上沉积一层 Ag 薄膜后,再覆盖一层由聚乙烯醇 (PVA)、石墨烯 (G) 和银纳米颗粒 (AgNPs) 合成的包覆层,形成 PVA/G/AgNPs@Ag 薄膜,证明了石墨烯可以提高 LSPR 传感器的灵敏度,有效延缓 AgNPs 的氧化过程,从而维持 LSPR 传感器的稳定性。2019 年, Murias 等人^[12]提出一种尖形 POF-SPR 传感器,通过在光纤尖端端面涂有金属层作为传感探头,测量液体折射率及液位的变化;而且,选用热光学系数高的热响应材料覆盖传感区域,还可实现温度测量。2020 年, C.Teng 等人^[13]提出了基于侧抛宏弯 POF-SPR 折射率传感器,并研究了金属层厚度、抛光深度、

宏弯半径和抛光角度等结构参数对传感性能的影响,通过优化结构参数,提高了传感灵敏度。同年, Y.Hu 等人^[14]提出了一种窄沟槽结构的 POF-SPR 折射率传感器,在整个光纤表面溅射了一层金膜,并研究沟槽间距对折射率响应的影响。

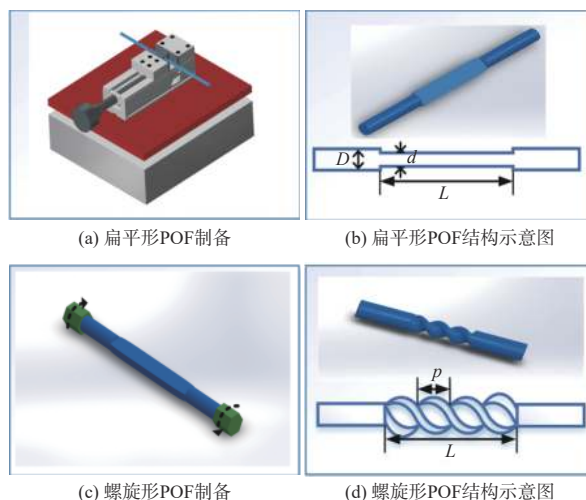
本课题组选用成本低廉的商用塑料光纤作为原材料制备螺旋形 POF,该结构类似于螺旋形的长周期光栅 (LPG),其在制备成为探测稳定性更好,灵敏度更高的波长调制型 SPR 折射率传感器方面具有巨大潜力。为此,本文通过对螺旋形 POF 区域蒸镀一层 Ag 膜,将其制备成螺旋形 POF-SPR 传感器,并针对修饰光纤结构参数来提升折射率传感特性展开了相关研究。

1 螺旋形 POF-SPR 折射率传感器的制备及传感原理

1.1 螺旋形 POF-SPR 探头的制备

本文采用商业多模 POF (CK-40, Super Eska) 制备螺旋形 POF-SPR 传感探头。POF 的纤芯材料为聚甲基丙烯酸甲酯聚合物 (polymethyl methacrylate, PMMA), 直径为 980 μm , 折射率为 1.492, 包层材料为氟化聚合物, 厚度为 10 μm , 折射率为 1.402^[15]。

螺旋形 POF-SPR 传感探头制作过程如图 1 所示。首先将一对表面光滑的金属模具固定在虎钳 (OZO, QGG) 的钳口中, 将 POF 夹在 2 个金属模具之间, 通过旋拧虎钳将其夹紧, 如图 1(a) 所示。为了使 POF 在一定应力下更容易形变, 将夹有 POF 的虎钳放在恒温加热平台 (ET-200, ETOOL, 温度范围 20 $^{\circ}\text{C}$ ~ 350 $^{\circ}\text{C}$) 上, 设定平台温度为 150 $^{\circ}\text{C}$, 连续加热虎钳约 10 min。然后旋转虎钳按压光纤, 持续几秒钟后, 松开虎钳, 取出光纤, 此时圆柱形 POF



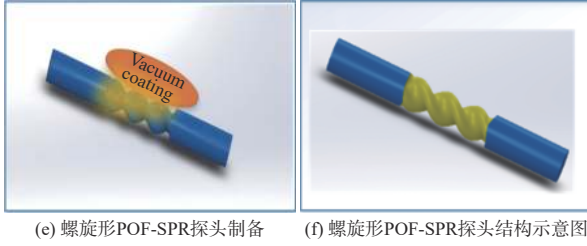


图1 螺旋形 POF-SPR 探头制作工艺

Fig.1 Manufacturing process of spiral-shaped POF-SPR probe

在力的作用下形变成扁平形,其结构如图1(b)所示, L 为扁平形 POF 的长度, d 为厚度, D 为直径。接下来,采用扭曲法将扁平形 POF 制备成螺旋形,如图1(c)所示。使用光纤夹具将扁平形 POF 两端夹紧,并将其置于图1(a)中恒温加热台(温度控制在 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$)上方 $1\text{ mm}\sim 2\text{ mm}$ 处,待光纤稍微软化后,将扁平状 POF 的两端朝相反方向同时扭转一定的角度 θ ,大约持续 10 s 后,远离热源并保持这种状态约 1 min ,使光纤自然冷却到室温。操作结束以后,即可形成图1(d)所示传感长度 L ,螺距为 p 的螺旋形 POF。如图1(e)所示,为了激励 SPR 效应,采用磁控溅射蒸镀的方法在螺旋形 POF 表面沉积一定厚度的金属薄膜,最终得到的如图1(f)所示螺旋形 POF-SPR 传感探头。

图2为不同螺纹数螺旋形 POF-SPR 探头照片。

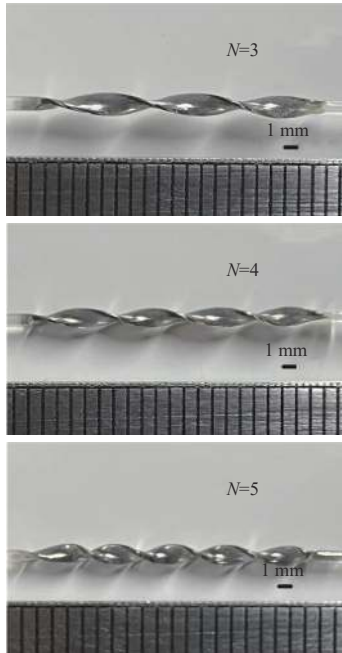


图2 不同螺纹数螺旋形 POF-SPR 探头照片

Fig.2 Photos of spiral-shaped POF-SPR probes with different number of threads

1.2 螺旋形 POF-SPR 传感器的基本原理

螺旋形 POF 结构类似于具有周期性螺旋状的长周期光栅 (helical long period grating, HLPG)^[16]。在 1991 年, C.D. Poole 等人^[17]首次提出这种新型 LPG 光子器件, 可将低阶纤芯模转为高阶纤芯模、包层模和辐射模, 有效增强了其表面的消逝场强度。

螺旋形 POF 结构如图1(d)所示, 螺距 p 即螺旋形 POF 的周期 Λ_g , 它可以通过以下公式计算:

$$\Lambda_g = \frac{L}{N} \quad (1)$$

式中: L 是 POF 扭转部分的长度; N 是扭转光纤的圈数(螺纹数)。由此可知, 螺旋形 POF 的周期可以通过调整 POF 被扭转的圈数或被加热的长度来调整。该结构 POF 相位匹配公式满足:

$$\lambda^{(m)} = (n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl,m}}^{\text{eff}}) \Lambda \quad (2)$$

式中: $\lambda^{(m)}$ 为谐振波长; Λ 为螺旋形 POF 的周期; $n_{\text{co}}^{\text{eff}}$ 、 $n_{\text{cl,m}}^{\text{eff}}$ 分别为纤芯模和包层模的有效折射率。上式两边对待测物质折射率 n_{sur} 取微分得到:

$$\frac{d\lambda^{(m)}}{dn_{\text{sur}}} = \left(\frac{dn_{\text{co}}^{\text{eff}}}{dn_{\text{sur}}} - \frac{dn_{\text{cl,m}}^{\text{eff}}}{dn_{\text{sur}}} \right) \Lambda + (n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl,m}}^{\text{eff}}) \frac{d\Lambda}{dn_{\text{sur}}} \quad (3)$$

考虑到光纤传播时产生的模式色散和波导色散, 可以得出:

$$\frac{d\lambda^{(m)}}{dn_{\text{sur}}} = \lambda^{(m)} \cdot \gamma^m \cdot \Gamma_{\text{sur}}^m \quad (4)$$

式中: γ^m 表示光纤波导色散因子; Γ_{sur}^m 表示折射率灵敏度因子, 定义为

$$\Gamma_{\text{sur}}^m = \frac{u_m^2 \lambda^3 n_{\text{sur}}}{8\pi r_{\text{cl}}^3 n_{\text{cl}} (n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl,m}}^{\text{eff}}) (n_{\text{cl}}^2 - n_{\text{sur}}^2)^{3/2}} \quad (5)$$

式中: u_m 为第一类零阶 Bessel 方程的 m 个根; r_{cl} 和 n_{cl} 是光纤包层半径和折射率。根据(5)式分析, 影响折射率灵敏度的因素有很多, 包括周期 Λ 和包层有效折射率等。

为了增强螺旋形 POF 的折射率灵敏度特性, 利用有机溶剂化学刻蚀的方法, 将塑料光纤中一小部分的包层去除, 代之以敏感材料进行膜层增敏来制备成基于 SPR 的传感器是有效方法之一。当光从螺旋形 POF 的一端入射, 经过光纤探头两侧螺旋条纹, 由全反射产生的倏逝波 (evanescent wave, EW) 的 p 偏振分量将会进入金属膜, 与金属膜中的自由电子相互作用, 从而激发出沿金属膜表面传播的表面等离子体波 (surface plasmon wave, SPW)^[18]。当入射光波长达到某一特定值时, 入射光的大部分能量会转换成 SPW 的能量, 在透射光

谱上则会出现一个吸收(共振)峰。吸收峰可用共振波长、半峰全宽和吸收峰深度等特征参数描述^[19]。当螺旋形 POF-SPR 传感探头周围环境折射率产生变化时,共振峰将会发生漂移,通过监测漂移量就能得到待测样品折射率的变化,从而实现对折射率的测量。

2 螺旋形 POF-SPR 折射率传感器的传感特性研究

2.1 折射率测量实验装置

如图 3 所示,螺旋形 POF-SPR 折射率传感器实验装置由光源、光纤跳线、光纤耦合器、传感探头、光纤光谱仪和数据采集系统等基本单元组成。采用波长范围为 360 nm~2 600 nm 的可见光源(LS-3000, ocean optics)发射复色光,检测波长范围 185 nm~1 100 nm、分辨率为 0.7 nm 的可见光谱仪(QE Pro, ocean optics)分析透射光谱。折射率

匹配液采用去离子水与丙三醇(甘油, $C_3H_8O_3$, 纯度 $\geq 99\%$, 国药集团化学试剂有限公司)按不同比例进行混合制成。

在室温环境下,将螺旋形 POF-SPR 传感探头浸入装有折射率匹配液($RI=1.335\sim 1.400$)的溶液池中,多次重复测量取平均值,每次测量结束后,使用去离子水对传感探头进行冲洗并清理表面残余水分,然后进行下一次测量^[20]。传感器的输出响应可以使用归一化透过率表征,其表达式为

$$T = \frac{I_i}{I_o} \quad (6)$$

式中: I_o 为传感器在空气($RI=1$)中的输出光强; I_i 为在不同折射率匹配液下传感器的输出光强。

具有波长调制的螺旋形 POF-SPR 传感器的灵敏度 $S(\text{nm}/\text{RIU})$ 定义为每单位折射率变化引起的共振波长的偏移,可以表示为

$$S(\text{nm}/\text{RIU}) = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \quad (7)$$

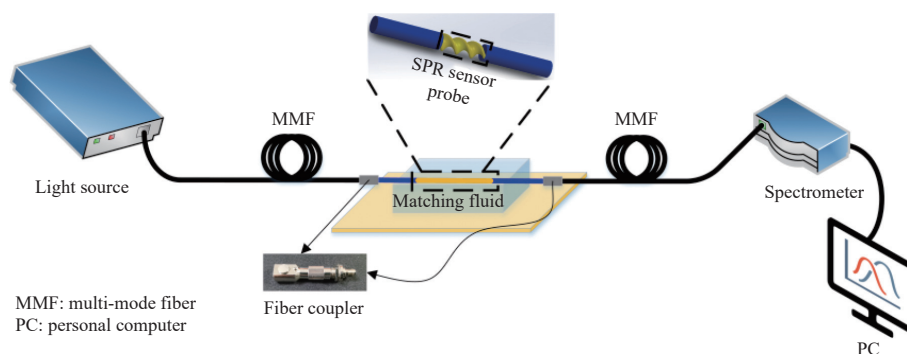


图 3 实验装置示意图

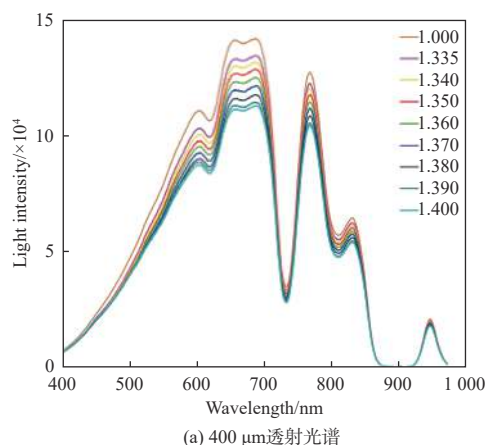
Fig. 3 Schematic diagram of experimental device

2.2 折射率传感特性

1) 扁平形 POF 的厚度对传感特性的影响

按照图 2 所示的制备工艺,首先将 POF 压制传感区域长度 $L=20\text{ mm}$,厚度 d 分别为 $400\text{ }\mu\text{m}$ 、 $500\text{ }\mu\text{m}$ 和 $600\text{ }\mu\text{m}$ 的扁平形,然后将它们分别扭制成螺纹数为 4 的螺旋形 POF,最后采用真空磁控溅射镀膜的方法在螺旋形 POF 表面蒸镀一层厚度约为 50 nm 的银膜。使用图 3 所示的实验装置分别测试了它们的折射率传感特性,测试结果如图 4 所示。可以看到,由厚度 $d=600\text{ }\mu\text{m}$ 扁平形 POF 扭制而成的螺旋形 POF-SPR 传感探头 SPR 透射谱透射深度过浅,SPR 共振峰随折射率增加变化不明显,导致折射率测量精度极低。而由厚度 $d=400\text{ }\mu\text{m}$ 和 $d=500\text{ }\mu\text{m}$ 制成的螺旋形 POF-SPR 传感探头,在

透射光谱中具有明显的共振特征吸收峰,且 SPR 共振波长随折射率的增加发生红移。



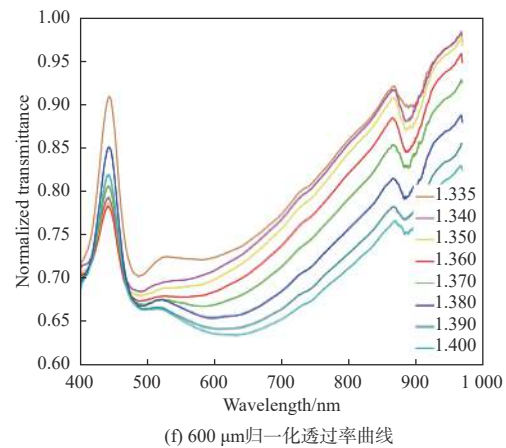
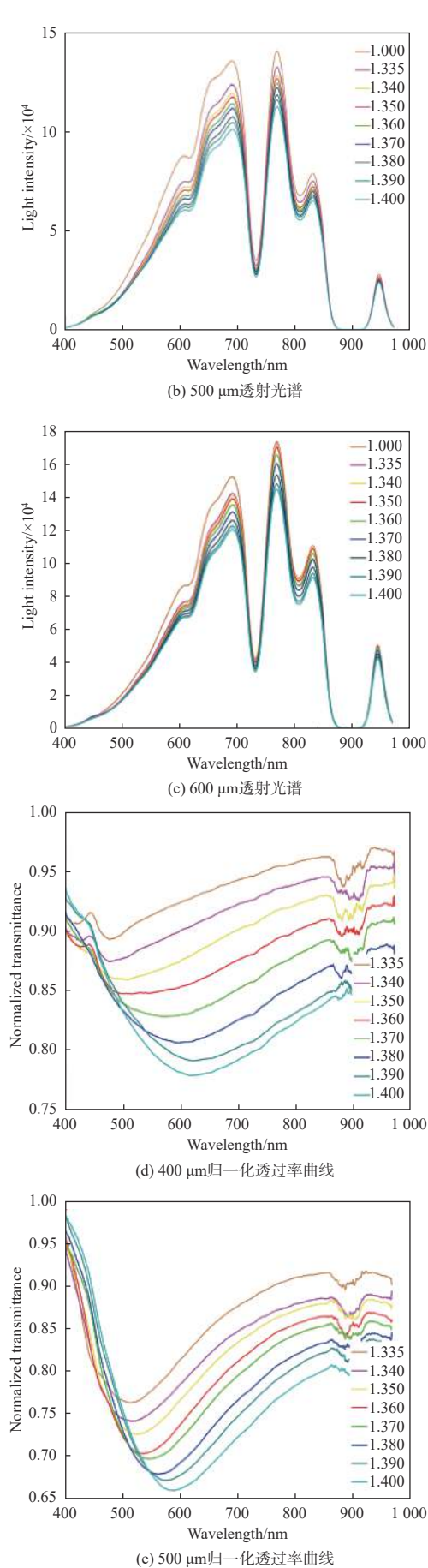
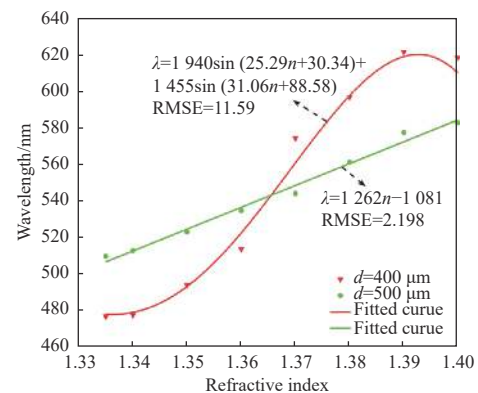


图4 透射光谱和归一化透射率曲线

Fig. 4 Curves of transmission spectrum and normalized transmittance

如图5(a)所示,为厚度 $d=400\ \mu\text{m}$ 和 $d=500\ \mu\text{m}$ 扁平形POF扭制而成的螺旋形POF-SPR传感探头测得共振波长与折射率的关系曲线。从图5(a)可以看出,由厚度 $d=400\ \mu\text{m}$ 扁平形POF扭制而成的传感探头测得共振波长随折射率的增加虽具有较大的红移量,但呈非线性关系,其原因可能是对POF压制太薄破坏了光纤内部结构,且薄POF在冷却过程中更易发生收缩形变。图5(b)所示为厚度 $d=400\ \mu\text{m}$ 扁平形POF扭制而成的传感探头的灵敏度与折射率间的关系。当折射率为1.37时,折射率灵敏度可达3 935.3 nm/RIU。相比之下,厚度 $d=500\ \mu\text{m}$ 扁平形POF扭制而成的螺旋形POF-SPR传感探头共振波长随折射率的增加虽红移量较小,但在整个折射率测量范围内线性度较好,经拟合计算得到的均方根误差为2.198。因此,为更好地满足实际应用需求,后面研究选用厚度 $d=500\ \mu\text{m}$ 的扁平形POF扭制而成的螺旋形POF-SPR传感探头作为研究对象,研究不同螺纹数对折射率传感特性的影响。

(a) 厚度 $d=400\ \mu\text{m}$ 和 $d=500\ \mu\text{m}$ 扁平形POF扭制而成的螺旋形POF-SPR传感探头共振波长与折射率之间关系

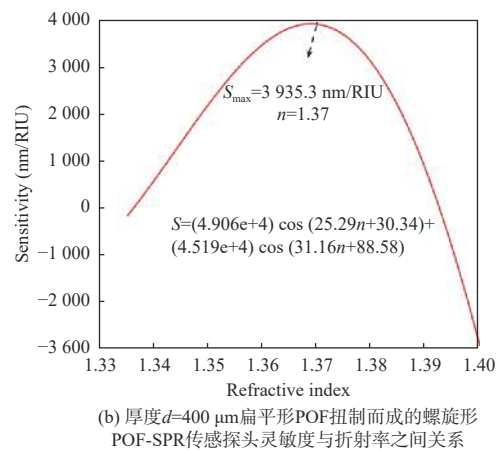


图 5 扁平形 POF 的厚度对传感特性的影响

Fig. 5 Influence of thickness of flattened POF on sensing characteristics

2) 螺纹数对传感特性的影响

接下来, 研究将传感长度 L 为 20 mm, 厚度为 500 μm 的扁平状 POF 分别扭制螺纹数为 3、4 和 5 的螺旋形 POF, 并在螺旋形 POF 表面蒸镀相同银膜厚度(约 50 nm)的传感器折射率传感特性, 测试结果如图 6 所示。可以看出, 随着溶液折射率递增, 不同螺纹数传感探头的 SPR 共振峰均产生了红移, 且透射深度也越来越深。但从整体上看, 当螺纹数超过 4 时, 传输特性反而变差, 这可能是由

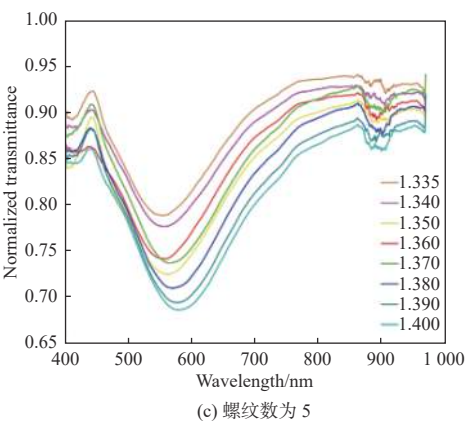
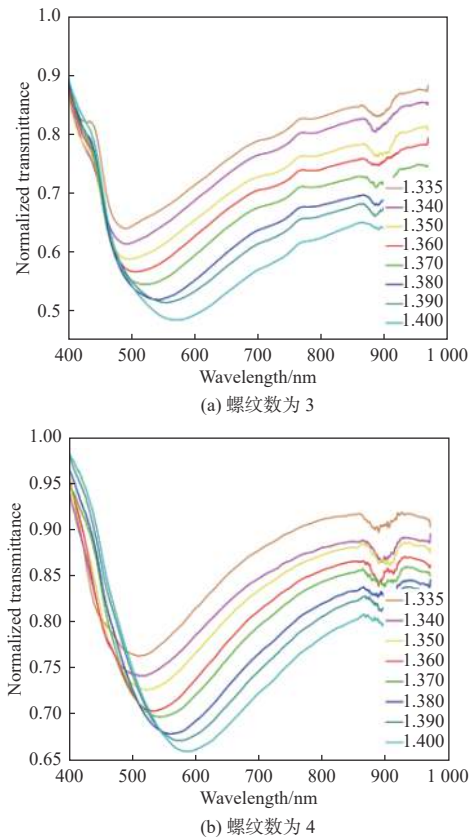


图 6 不同螺纹数螺旋形 POF-SPR 传感探头归一化透射率曲线

Fig. 6 Normalized transmittance curves of spiral-shaped POF-SPR sensor probe with different number of threads

于过大的扭转度, 引入了过高的弯曲损耗, 劣化了光传输质量造成的。

图 7(a) 所示, 为不同螺纹数螺旋形 POF-SPR 传感探头共振波长与折射率之间的关系, 从中可

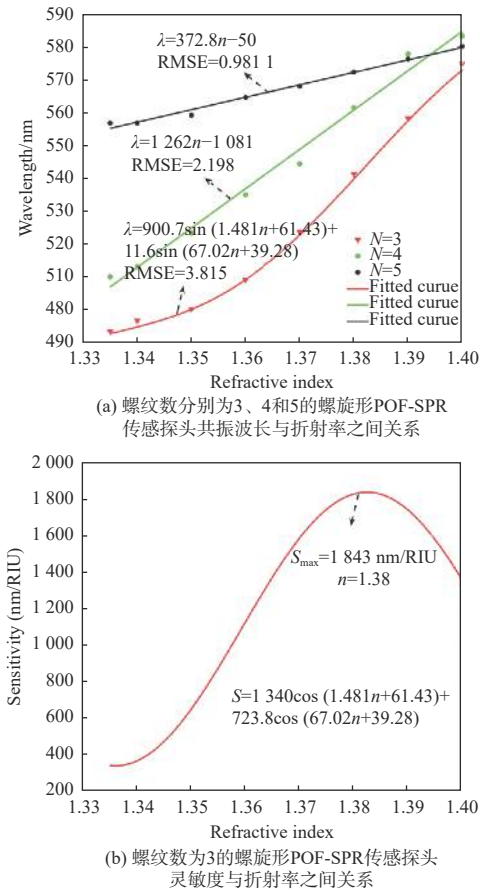


图 7 螺纹数对传感特性的影响

Fig. 7 Influence of the number of threads on sensing characteristics

以看出, 螺纹数为 4 的螺旋形 POF-SPR 传感探头在整个折射率测量范围内具有较好的灵敏度和线性度, 在折射率 1.335~1.400 范围测得灵敏度为 1 262 nm/RIU, RMSE 为 2.198。图 7(b)所示, 为螺纹数为 3 的螺旋形 POF-SPR 传感探头测得灵敏度与折射率之间的关系, 结果显示, 当折射率为 1.38 时, 灵敏度最大, 为 1 843 nm/RIU。

表 1 所示为本文所提出传感器与其他不同结构的基于 POF-SPR 传感器的传感性能的比较结果, 可以看出, 本文所提出的折射率传感器总体来说, 系统加工工艺大为简化, 并且具有较高的折射率灵敏度。

表 1 基于不同类型 POF-SPR 传感器的性能比较

Table 1 Performance comparison for different types of POF-SPR sensors

Sensor structure	$S/(\text{nm}/\text{RIU})$	Dynamic range	Ref.
Parallel polished POF	1 174	1.335~1.370	[21]
D-shaped	1 325	1.332~1.378	[22]
U-Bent	1 040	1.33~1.361	[23]
Screw-shaped	1 262	1.335~1.400	Our work

3 结论

本文采用一种简单的机械热压和扭曲法将商用 POF 改造成螺旋形结构, 并通过蒸镀 Ag 膜制备成螺旋形 POF-SPR 传感探头。通过改变螺旋形 POF-SPR 传感探头的结构参数(扁平形 POF 厚度, 螺纹数), 研究了其对折射率传感特性的影响。结果表明, 由厚度为 500 μm 扁平形 POF, 螺纹数为 4 制备得到的螺旋形 POF-SPR 折射率传感器, 线性度最优, 且在折射率 1.335~1.400 范围内, 测得的灵敏度为 1 262 nm/RIU。研究表明, 该传感器兼具制备工艺简单和成本低廉的优势, 可成为折射率传感领域中一个很有前途的解决方案。

参考文献:

- [1] TAMANG J S, DHAR R S, BHOI A K, et al. Bio-sensing application of chalcogenide thin film in a graphene-based surface plasmon resonance (SPR) sensor[J]. *Sādhanā*, 2021, 46(3): 1-10.
- [2] KUMAR S, SHARMA G, SINGH V. Sensitivity of tapered optical fiber surface plasmon resonance sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(4): 333-335.
- [3] SRIVASTAVA S K, GUPTA B D. A multitapered fiber-optic SPR sensor with enhanced sensitivity[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(13): 923-925.
- [4] TSIGARIDAS G, POLYZOS D, IOANNOU A, et al. Theoretical and experimental study of refractive index sensors based on etched fiber Bragg gratings[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2014, 209: 9-15.
- [5] MIAO Yinping, LIU Bo, TIAN Shuang, et al. Temperature-insensitive refractive index sensor based on tilted fiber Bragg grating[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2009, 51(2): 479-483.
- [6] 石胜辉, 吴德操, 王鑫, 等. 氧化石墨烯包覆金纳米壳修饰长周期光栅的免疫传感器[J]. *光学学报*, 2020, 40(18): 21-30.
SHI Shenghui, WU Decao, WANG Xin, et al. An immunosensor based on the graphene-oxide-encapsulated Au-nanoshell-coated long-period fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 21-30.
- [7] 肖功利, 张开富, 杨宏艳, 等. D型对称双芯光子晶体光纤双谐振峰折射率传感器[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 68-75.
XIAO Gongli, ZHANG Kaifu, YANG Hongyan, et al. Refractive index sensor with double resonance peaks for D-type symmetric two-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 68-75.
- [8] 张平, 刘彬, 刘正达, 等. 基于氧化石墨烯涂层的侧抛光纤马赫-曾德尔干涉仪温湿度传感器[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 39-48.
ZHANG Ping, LIU Bin, LIU Zhengda, et al. Temperature and humidity sensor based on a graphene oxide-coated side-polished fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 39-48.
- [9] DOMINGUES M F, ANTUNES P, ALBERTO N, et al. Cost effective refractive index sensor based on optical fiber micro cavities produced by the catastrophic fuse effect[J]. *Measurement*, 2016, 77: 265-268.
- [10] CENNAMO N, D'AGOSTINO G, PESAVENTO M, et al. High selectivity and sensitivity sensor based on MIP and SPR in tapered plastic optical fibers for the detection of l-nicotine[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 191: 529-536.
- [11] JIANG Shouzheng, LI Zhe, ZHANG Chao, et al. A novel U-bent plastic optical fibre local surface plasmon resonance sensor based on a graphene and silver nanoparticle hybrid structure[J]. *Journal of Physics D: Applied Phys-*

- ics, 2017, 50(16): 165105.
- [12] DEL CARMEN ALONSO-MURIAS M, VELÁZQUEZ-GONZÁLEZ J S, MONZÓN-HERNÁNDEZ D. SPR fiber tip sensor for the simultaneous measurement of refractive index, temperature, and level of a liquid[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4808-4814.
- [13] TENG Chuanxin, ZHENG Jie, LIANG Qiuyu, et al. The influence of structural parameters on the surface plasmon resonance sensor based on a side-polished macrobending plastic optical fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(8): 4245-4250.
- [14] HU Yanjun, HOU Yulong, GHAFAR A, et al. A narrow groove structure based plasmonic refractive index sensor[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 97289-97295.
- [15] XUE Peng, WU Bingcheng, BAO Haiyang, et al. Screw-shaped plastic optical fibers for refractive index sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(10): 5237-5242.
- [16] 薛鹏. 塑料光纤的周期性结构修饰及其折射率传感特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- XUE Peng. Investigation on periodic structure modification of the plastic optical fibers and their refractive index sensing[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [17] POOLE C D, TOWNSEND C D, NELSON K T. Helical-grating two-mode fiber spatial-mode coupler[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(5): 598-604.
- [18] 郭铖. 波长调制式表面等离子激元共振传感器与多通道技术的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- GUO Cheng. Study on wavelength-modulated surface plasmon resonance sensor and multi-channel technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [19] 郑荣升. 表面等离子体共振技术与聚合物光纤传感应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- ZHENG Rongsheng. Research on the sensing applications of surface plasmon resonance and polymer optical fiber[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.
- [20] 孙思文, 尹悦鑫, 王曙敏, 等. 湿腐蚀法制备U形塑料光纤折射率传感器[J]. *吉林大学学报(信息科学版)*, 2021, 39(2): 166-172.
- SUN Siwen, YIN Yuexin, WANG Shumin, et al. U-shaped plastic optical fiber refractive index sensor prepared by wet etching technique[J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2021, 39(2): 166-172.
- [21] LIU Lian, ZHENG Jie, DENG Shijie, et al. Parallel polished plastic optical fiber-based SPR sensor for simultaneous measurement of RI and temperature[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-8.
- [22] CENNAMO N, MASSAROTTI D, GALATUS R, et al. Performance comparison of two sensors based on surface plasmon resonance in a plastic optical fiber[J]. *Sensors*, 2013, 13(1): 721-735.
- [23] CHRISTOPHER C, SUBRAHMANYAM A, SAI V V R. Gold sputtered U-bent plastic optical fiber probes as SPR- and LSPR-based compact plasmonic sensors[J]. *Plasmonics*, 2018, 13(2): 493-502.