

引用本文:熊明强,黄勇林,詹平,等. 双侧抛 D 型光子晶体光纤表面等离子体温度传感器[J]. 光通信技术,2023,47(2):23-27.

# 双侧抛 D 型光子晶体光纤表面等离子体温度传感器

熊明强,黄勇林\*,詹平

(南京邮电大学 电子与光学工程、柔性电子学院,南京 210023)

**摘要:**为了降低传感器结构复杂度和提高传感器温度灵敏度,提出一种双侧抛 D 型、包层为正六边形和正八边形的光子晶体光纤表面等离子体共振(SPR)温度传感器,利用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件分别研究了偏振方向、空气孔径、银膜厚度对传感器的性能影响,找出各项数据的最优值,并以此为基础对传感器的温度传感特性进行了分析。仿真结果表明:在  $x$  偏振方向模式下,当包层空气孔  $d_1=1\ \mu\text{m}$ 、 $d_2=0.5\ \mu\text{m}$ ,金属银膜厚度  $t_{\text{Ag}}=35\ \text{nm}$  时,传感器的性能最优,在  $0\sim 120\ ^\circ\text{C}$  时传感器的温度灵敏度最高可达  $-7.99\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ 。

**关键词:**光子晶体光纤;表面等离子体;有限元法;温度传感器

**中图分类号:**TN253 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2023)02-0023-05

**DOI:**10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.02.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Surface plasma temperature sensor based on double-side throw D-type photonic crystal fiber

XIONG Mingqiang, HUANG Yonglin\*, ZHAN Ping

(School of Electronic and Optical Engineering&Flexible Electronics,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** In order to reduce the complexity of the sensor structure and improve the sensitivity of the sensor temperature, a dual-side throw D-type photonic crystal fiber surface plasmon resonance (SPR) temperature sensor with regular hexagon and regular octagon cladding is proposed. By using COMSOL multiphysics finite element simulation software, the influence of polarization direction, air aperture and silver film thickness on the performance of the sensor is studied respectively, and the optimal value of each data is found out. Based on this, the temperature sensing characteristics of the sensor are analyzed. The simulation results show that when the cladding air hole  $d_1=1\ \mu\text{m}$ ,  $d_2=0.5\ \mu\text{m}$ , and the thickness of the metal silver film  $t_{\text{Ag}}=35\ \text{nm}$ , the performance of the sensor is the best, and the maximum temperature sensitivity of the sensor can reach  $-7.99\ \text{nm}/^\circ\text{C}$  at  $0\sim 120\ ^\circ\text{C}$ .

**Key words:** photonic crystal fiber, surface plasmon, finite element method, temperature sensor

### 0 引言

表面等离子体共振(SPR)是一种发生在金属-电介质表面的物理现象,基于 SPR 的传感技术具有高灵敏度、高分辨的特点<sup>[1-2]</sup>。光子晶体光纤(PCF)自问世以来,由于其结构设计灵活、双折射高、损耗低等特性被广泛应用于温度、折射率等传感领域。近年来,科研人

员将 PCF 和表面等离子体技术相结合,在不同的传感领域获得了良好的传感性能<sup>[2]</sup>。2019 年,ZHAO L 等人<sup>[3]</sup>提出一种 D 型全固态 PCF-SPR,能同时对温度和折射率进行测量,测量温度范围为  $-3\sim 15\ ^\circ\text{C}$ 、最高灵敏度为  $4.22\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ 。2021 年,魏方皓等人<sup>[4]</sup>提出了一种包层为正六边形的 D 型 PCF-SPR 双通道光纤传感器,在纤芯上下两侧各设一个待测物通道,当温度为  $-80\sim 80\ ^\circ\text{C}$  时,温度灵敏度最高可达  $3\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ ;同年,王双双等人<sup>[5]</sup>提出一种包层为正十六边形的 D 型 PCF-SPR,选取纤芯下方的一个空气孔注入待测物溶液作为温度传感通道,当温度为  $5\sim 85\ ^\circ\text{C}$  时平均灵敏度为  $-3\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ 。然而,上述传感器存在结构复杂、制备工艺繁琐、纤芯泄露的光与金属表面接触面过小、传感器灵敏度不高等缺点。基于此,本文提出一种具有 3 个传感通道的双

收稿日期:2022-12-23。

基金项目:江苏省光通信工程技术研究中心项目(ZXF201804)资助。

**作者简介:**熊明强(1996—),男,硕士研究生,现就读于南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子学院光学工程专业,主要研究方向为光纤通信、光纤传感等,现在从事光子晶体光纤表面等离子体传感器的研究与仿真验证工作。

**\*通信作者:**黄勇林(1964—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事光电子与光通信技术方面的研究工作。



熊明强, 黄勇林, 詹平, 等: 双侧抛 D 型光子晶体光纤表面等离子体温度传感器

侧抛 D 型 PCF-SPR 温度传感器, 研究不同结构参数下的最优结果。

## 1 传感器结构设计

本文设计的双侧抛 D 型 PCF-SPR 温度传感器的结构如图 1 所示。

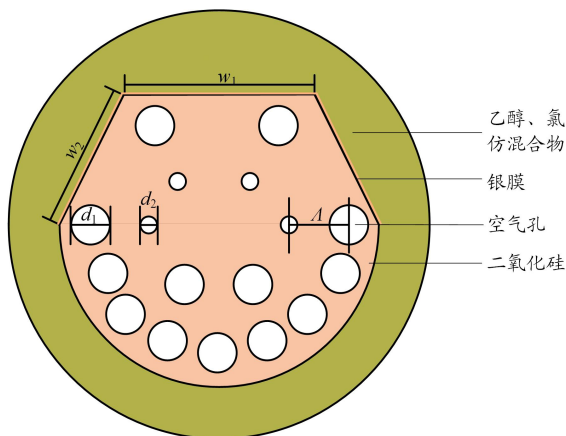


图 1 双侧抛 D 型 PCF-SPR 温度传感器结构横截面图

传感器包层由 2 层空气孔构成, 内层和外层空气孔间距  $\Lambda=1.7 \mu\text{m}$ 。内层空气孔由直径为  $d_2$  ( $d_2=0.5 \mu\text{m}$ ) 的小圆空气孔构成, 呈正六边形。内层六边形排布空气孔上方的 4 个较小的空气孔保证纤芯处的光更容易泄露到包层中, 激发表面等离子体效应。外层空气孔由直径为  $d_1$  ( $d_1=1 \mu\text{m}$ ) 的圆形空气孔构成, 呈正八边形。其中, 外层正八边形排布空气孔上半部顶边和双侧边的部分空气孔被移除 (这样设计能保证纤芯泄露的光可控且尽可能多地与金属表面接触, 产生 SPR 效应), 形成 3 个检测通道。相较于传统的正六边形包层, 正八边形包层具有更加优秀的色散和双折射特性<sup>[5]</sup>。基底材料由熔融二氧化硅组成, 折射率  $n^2(\lambda)$  由 Sellmeier 公式<sup>[6]</sup>可得

$$n^2(\lambda)=1+\frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2-C_1}+\frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2-C_2}+\frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2-C_3} \quad (1)$$

其中,  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  分别为对应的 Sellmeier 相应系数,  $B_1=0.6961663$ 、 $B_2=0.4079426$ 、 $B_3=0.8974794$ 、 $C_1=0.0684043$ 、 $C_2=0.1162414$ 、 $C_3=9.896161$ ;  $\lambda$  为入射光波长。

金属材料的选择是激发 SPR 至关重要的因素。常用的金属材料包括金、银等, 但同等条件下, 涂覆银膜的传感器比涂覆金膜的传感器损耗峰更加尖锐, 半峰宽度更小<sup>[7]</sup>, 更加有利于检测。另外, 银相对于金更加经济, 能降低传感器的制作成本。因此, 本文选择金属

银膜为传感器表面涂覆材料。此双侧抛 D 型 PCF-SPR 传感器有 3 个检测通道, 双侧抛面宽度  $w_2=4.25 \mu\text{m}$ , 顶部抛面宽度  $w_1=4.25 \mu\text{m}$ , 2 个顶角为  $120^\circ$ 。分别在 D 型表面和双侧抛面镀上一层金属银膜作为传感通道, 金属银的折射率  $n_{\text{Au}}(\lambda)$  可根据 Drude 模型<sup>[8]</sup>进行分析。

$$n_{\text{Au}}(\lambda)=\sqrt{1-\frac{\lambda^2\lambda_c}{\lambda_p^2(\lambda_c+i\lambda)}} \quad (2)$$

其中,  $\lambda_c$ 、 $\lambda_p$  分别为金属银的等离子体的碰撞波长、共振波长,  $\lambda_c=1.7614\times 10^{-5} \text{ m}$ 、 $\lambda_p=1.4541\times 10^{-7} \text{ m}$ 。由于金属膜镀在光纤表面, 暴露在空气中时易发生氧化, 需要在银的表面镀一层二氧化硅防止氧化。

传感器传感介质的选取需要考虑温敏液体的折射率和热光系数, 常用的包括甲苯、甘油、乙醇氯仿混合溶液, 但选取的温敏液体折射率必须小于光纤基底材料折射率, 否则无法激发 SPR, 并且热光系数必须尽可能大<sup>[9]</sup>。因此, 本文设计的传感器温敏液体采用乙醇、氯仿的等比例混合溶液。

## 2 仿真与分析

### 2.1 模式分析仿真结果

首先, 将设计的双侧抛 D 型 PCF-SPR 温度传感器浸润在温敏液体中, 保证 3 个检测通道与待测溶液充分接触。待测溶液的折射率计算公式<sup>[10]</sup>如式(3)所示。

$$n_m = x\% \times \left[ n_{\text{ethanol}} \Big|_{T=20^\circ\text{C}} + \frac{dn_{\text{ethanol}}}{dT} \times (T-20) \right] + (100-x)\% \times \left[ n_{\text{chloroform}} \Big|_{T=20^\circ\text{C}} + \frac{dn_{\text{chloroform}}}{dT} \times (T-20) \right] \quad (3)$$

其中,  $T$  为环境温度,  $x\%$ 、 $(100-x)\%$  分别为混合溶液中乙醇、氯仿所占的比例;  $dn_{\text{ethanol}}/dT$ 、 $dn_{\text{chloroform}}/dT$  分别表示乙醇、氯仿的热光系数, 其值分别为  $-3.94\times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 、 $-6.328\times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ , 热光系数越大, 温敏液体折射率随温度变化越明显。

然后, 使用有限元软件 COMSOL Multiphysics 中的光学仿真模块分别对传感器的  $x$  偏振方向和  $y$  偏振方向进行模式分析。仿真结果表明, 传感器存在  $x$ 、 $y$  偏振方向的模式, 且  $x$  偏振方向的损耗谱峰值强度远大于  $y$  偏振方向的损耗谱峰值强度。

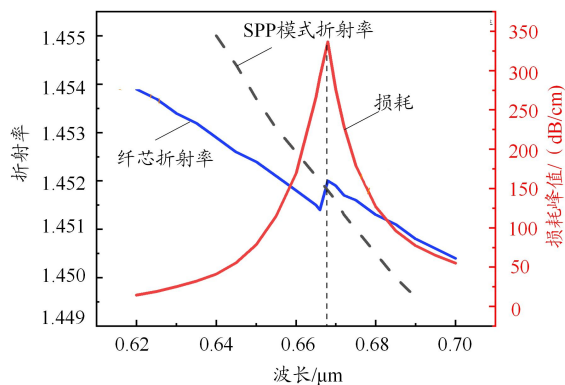
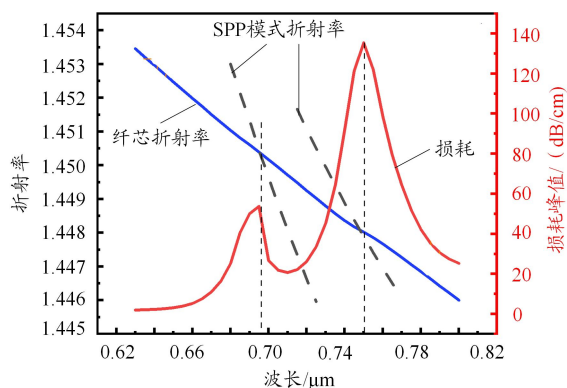
纤芯基膜的损耗值  $\alpha_{\text{loss}}$  可根据式(4)<sup>[11]</sup>计算。

$$\alpha_{\text{loss}}=8.686\times\frac{2\pi}{\lambda}\times\text{Im}(n_{\text{eff}})\times 10^4 \quad (4)$$

其中,  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  为纤芯基膜有效折射率的虚部。

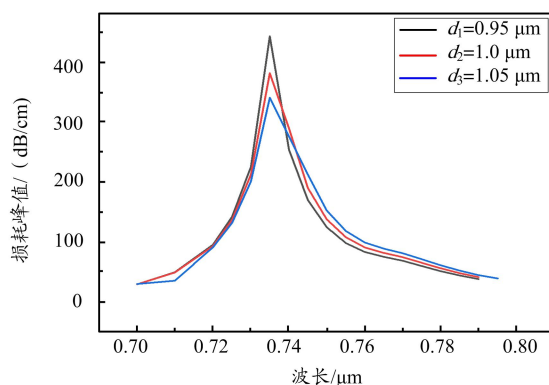
当环境温度为  $30^\circ\text{C}$ 、待测溶液折射率为 1.39 时,

$x$  偏振和  $y$  偏振对应的 SPP 模式折射率、纤芯折射率、约束损耗曲线如图 2、图 3 所示。可以看出, 当纤芯折射率和 SPP 模式折射率相等时, 对应波长即为共振波长, 此时纤芯中能量最大程度地耦合到金属表面等离子体中, 纤芯能量骤降, 损耗达到最大值而出现损耗峰, 之后能量逐渐从金属表面回到纤芯, 损耗峰呈下降趋势<sup>[12-14]</sup>。另外,  $x$  偏振方向的损耗谱只存在一个主峰,  $y$  偏振方向出现了主峰和次峰。这是因为  $y$  偏振方向的光同时在金属膜的上方和两侧发生了表面等离子体效应, 而  $x$  偏振方向的光只在两侧的金属膜发生等离子体效应。对比  $x$  偏振和  $y$  偏振方向的损耗峰峰值,  $x$  偏振方向的损耗峰峰值为 338.3 dB/cm 远大于  $y$  偏振方向的 135.31 dB/cm, 更有利于共振波长检测。因此, 下文主要讨论  $x$  偏振方向的损耗值。

图2  $x$  偏振方向 SPP 模式折射率、纤芯折射率和约束损耗曲线图3  $y$  偏振方向 SPP 模式折射率、纤芯折射率和约束损耗曲线

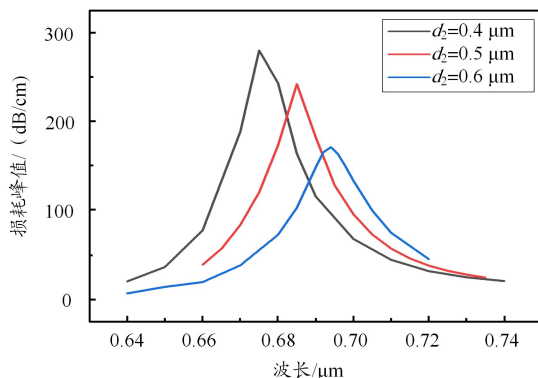
## 2.2 空气孔径对传感器的影响

包层空气孔的排列方式和空气孔的直径是传感器性能至关重要的影响因素, 本文采用控制变量法<sup>[15]</sup>研究空气孔径对传感器温度灵敏度的影响。保持 PCF-SPR 的其它结构参数不变, 改变  $d_1$  的大小, 得到  $d_1$  对传感器损耗谱的影响如图 4 所示。可以看出, 随着  $d_1$  从 0.95  $\mu\text{m}$  增加到 1、1.05  $\mu\text{m}$ , 损耗峰峰值分别

图4 空气孔直径  $d_1$  对传感器损耗谱的影响

为 443.09、381.14、340.35 dB/cm, 损耗谱峰值随着  $d_1$  的增加而降低。这是因为  $d_1$  增大导致 PCF 的占空比增大, 包层的等效折射率减小, 更多的能量被限制在纤芯区域, 无法到达金属表面, 使得纤芯基模损耗减少<sup>[16-18]</sup>。此外, 当  $d_1$  变化时, 共振波长基本没有变化, 这表明  $d_1$  的变化对共振波长的影响甚微, 因此降低了对制造精度的要求。

改变  $d_2$  的大小, 得到  $d_2$  对传感器损耗谱的影响如图 5 所示。可以看出, 当  $d_2$  分别为 0.4、0.5、0.6  $\mu\text{m}$  时, 共振波长依次为 0.67、0.685、0.694  $\mu\text{m}$ 。由此可知, 随着  $d_2$  增大共振波长红移, 损耗峰峰值逐渐减小。当  $d_2=0.6 \mu\text{m}$  时, 损耗谱较为平缓, 不利于共振波长的检测; 当  $d_2=0.5 \mu\text{m}$  时, 半峰宽度最小, 损耗峰最尖锐, 使共振波长的检测更加精确。因此, 本文选取  $d_2=0.5 \mu\text{m}$ 。

图5 空气孔直径  $d_2$  对传感器损耗谱影响

## 2.3 银膜厚度对传感器的影响

光纤表面银膜厚度也是影响 PCF-SPR 温度灵敏度的主要因素之一<sup>[19]</sup>, 保持空气孔直径不变, 仅改变银膜厚度得到的共振波长的曲线如图 6 所示。可以看出, 当银膜厚度  $t_{\text{Ag}}$  由 25 nm 依次增大到 30、35 nm 时, 传输损耗增加, 损耗谱半峰宽减小, 共振波长发生



熊明强, 黄勇林, 詹平, 等: 双侧抛 D 型光子晶体光纤表面等离子体温度传感器

红移, SPR 效应增强; 当银膜厚度为 40 nm 时, 损耗峰值下降, SPR 效应减弱。相邻损耗峰间的距离呈下降趋势, 依次为 0.04、0.027、0.013  $\mu\text{m}$ 。这是因为银膜厚度过厚, 阻碍了倏逝波的穿透<sup>[20]</sup>, 导致 SPR 效应减弱, 故本文取银膜厚度最优值为  $t_{\text{Ag}}=35 \text{ nm}$ 。

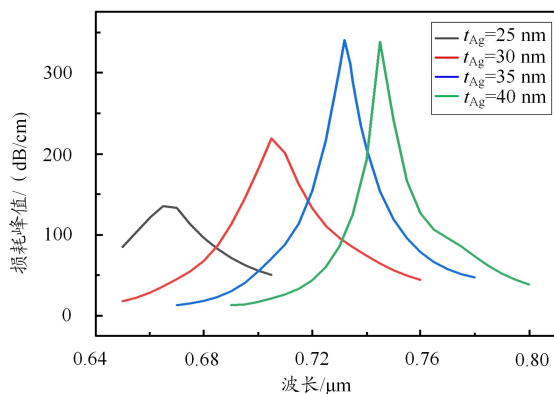
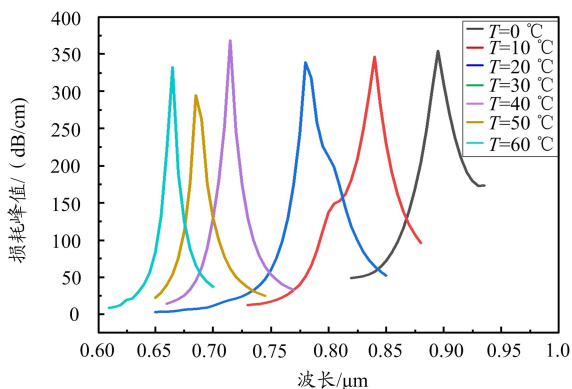


图6 银膜厚度对损耗谱的影响

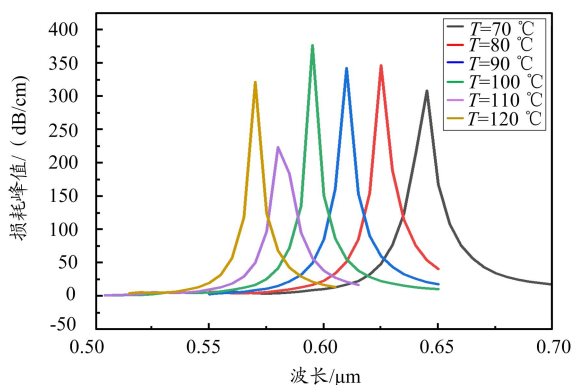
## 2.4 温度传感特性分析

环境温度变化会引起乙醇、氯仿混合液的折射率发生变化, 从而改变相位匹配条件, 导致共振波长发生变化<sup>[21]</sup>。当外层空气孔直径  $d_1=1 \mu\text{m}$ , 内层小空气孔直径  $d_2=0.5 \mu\text{m}$  且金属膜厚度  $t_{\text{Ag}}=35 \text{ nm}$  时, 不同温度下的损耗谱曲线如图 7 所示。可以看出, 当温度  $T$  为 0~120  $^{\circ}\text{C}$  时, 随着温度的升高, 共振波长发生蓝移且相邻损耗谱峰间的距离减小。

当温度大于 120  $^{\circ}\text{C}$  时, 待测物的折射率和包层的折射率接近, 纤芯无法束缚能量, 传输损耗增加, 相邻损耗峰间的间距小于 0.01  $\mu\text{m}$ , 共振波长的变化很小, 不利于区别; 当温度小于 0  $^{\circ}\text{C}$  时, 损耗峰过于平缓, 同样不利于共振波长的检测。因此, 本文将检测的温度设为 0~120  $^{\circ}\text{C}$ , 对共振波长随温度变化的散点图进行多项式拟合, 得到温度与共振波长的关系曲线如图 8 所示, 曲线的拟合表达式为  $y=-7.996\ 902\ 144x-$



(a) 温度为 0~60  $^{\circ}\text{C}$



(b) 温度为 70~120  $^{\circ}\text{C}$

图7 0~120  $^{\circ}\text{C}$  时损耗谱曲线

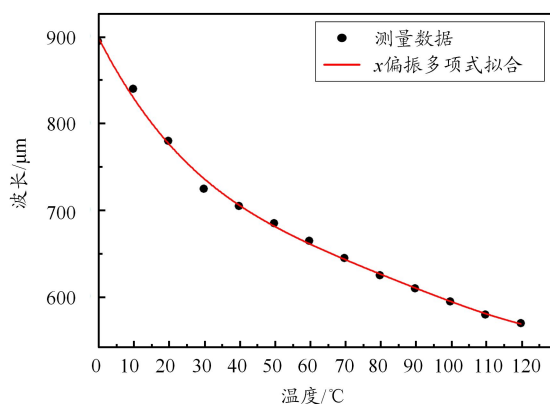


图8 共振波长随温度  $T$  的变化曲线

$0.024\ 69x^2+0.000\ 009\ 96x^3$ , 由此可得该传感器的最大温度灵敏度为  $-7.99 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。

## 3 结束语

本文提出了一种双侧抛 D 型的 PCF-SPR 温度传感器, 与其它结构传感器相比, 该温度传感器具有结构简单、温度灵敏度较高、双折射特性较好等优点, 在 0~120  $^{\circ}\text{C}$  时传感器的温度灵敏度最高可达  $-7.99 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ , 可以广泛应用于温度传感领域, 有很高的研究价值。

## 参考文献:

- [1] GUPTA B D, VERMA R K. Surface plasmon resonance-based fiber optic sensors: principle, probe designs, and some applications [EB/OL]. [2022-12-23]. <https://www.docin.com/p-1531293310.html>.
- [2] 马健, 余海湖, 熊家国, 等. 光子晶体光纤传感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 69-80.
- [3] ZHAO L, HAN H, LIAN Y, et al. Theoretical analysis of all-solid D-type photonic crystal fiber based plasmonic sensor for refractive index and temperature sensing[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 50: 165-171.
- [4] 魏方皓, 张祥军. 基于表面等离子体共振的双通道光子晶体光纤温度传感器[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(4): 77-79.
- [5] 王双双, 黄勇林, 詹平. 基于正十六边形光子晶体光纤的表面等离子

体共振传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(7): 74–80.

[6] 朱晟昇, 谭策, 王琰, 等. 基于 SPR 效应和缺陷耦合的光子晶体光纤高灵敏度磁场与温度传感器[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 253–261.

[7] 白育堃, 马颖, 魏仁霄. 基于氮化钛薄膜表面等离子体共振特性的双芯光子晶体光纤温度传感器(英文)[J]. 光子学报, 2016, 45(8): 56–60.

[8] 范振凯, 张子超, 王保柱, 等. 基于表面等离子体共振效应的光子晶体光纤折射率传感器的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 53–62.

[9] 叶楚妮, 陈鹤鸣. 基于表面等离子体共振的光子晶体光纤温度传感器[J]. 光通信技术, 2021, 45(11): 1–5.

[10] YU Y, LI X, HONG X, et al. Some features of the photonic crystal fiber temperature sensor with liquid ethanol filling[J]. Optics express, 2010, 18(15): 15383–15388.

[11] 陈强华, 韩文远, 孔祥悦, 等. 基于光纤表面等离子体共振检测溶液折射率变化[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 161–167.

[12] AN G, HAO X, LI S, et al. D-shaped photonic crystal fiber refractive index sensor based on surface plasmon resonance[J]. Applied optics, 2017, 56(24): 6988–6992.

[13] CHEN X, XIA L, LI C. Surface plasmon resonance sensor based on a novel D-shaped photonic crystal fiber for low refractive index detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1): 1–9.

[14] CHEN N, CHANG M, LU X, et al. Numerical analysis of midinfrared D-shaped photonic-crystal-fiber sensor based on surface-plasmon-resonance

effect for environmental monitoring[J]. Applied Sciences, 2020, 10(11): 3897–3902.

[15] DASH J N, JHA R. Highly sensitive side-polished birefringent PCF-based SPR sensor in near IR[J]. Plasmonics, 2016, 11(6): 1505–1509.

[16] SANTOS D F, GUERREIRO A, BAPTISTA J M. Simultaneous plasmonic measurement of refractive index and temperature based on a D-type fiber sensor with gold wires[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(8): 2439–2446.

[17] GANGWAR R K, SINGH V K. Highly sensitive surface plasmon resonance based D-shaped photonic crystal fiber refractive index sensor[J]. Plasmonics, 2017, 12(5): 1367–1372.

[18] 冯李航, 曾捷, 梁大开, 等. 楔形结构光纤表面等离子体共振传感器研究[J]. 物理学报, 2013, 62(12): 281–288.

[19] ZHU Z, LIU L, LIU Z, et al. Surface-plasmon-resonance-based optical-fiber temperature sensor with high sensitivity and high figure of merit[J]. Optics Letters, 2017, 42(15): 2948–2951.

[20] YANG X, LU Y, LIU B, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on SPR in D-shaped MOF[J]. Applied Optics, 2017, 56(15): 4369–4374.

[21] XIAO R, RONG Z, PANG Y, et al. Effects of structure parameters on the sensor performance of photonic crystal fiber[J]. Optics Communications, 2015, 336: 116–119.