

D型环光子晶体光纤表面等离子体共振传感器

刘旭安¹, 杨克成¹, 胡新广¹, 姜小刚², 罗伟濂³, 陈达如³

(1. 黄山学院 信息工程学院, 安徽 黄山 245041; 2. 衢州学院 教师教育学院, 浙江 衢州 324000;
3. 浙江师范大学 杭州高等研究院, 浙江 杭州 311200)

摘要:提出了一种中红外波段宽范围低折射率检测的D型环双芯光子晶体光纤表面等离子体共振传感器。该结构为一个D型环,并在其内外表面都沉积一层金属层。采用全矢量有限元方法分析了该传感器的性能。结果表明,该传感器可以在中红外波段实现低折射率传感,并具有高传感灵敏度特性。分析物的折射率可检测范围为1.20~1.38,平均波长灵敏度和最大波长灵敏度可分别达到13717 nm/RIU和21150 nm/RIU,分辨率可达到 1.94×10^{-5} RIU。该传感器可在化学、生物以及环境检测等领域有重要的应用。

关键词: 光纤传感器; 光子晶体光纤; 表面等离子体共振; 波长灵敏度

中图分类号:O436; TP242.4⁺4 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.05.024

D-ring shaped photonic crystal fiber surface plasmon resonance sensor

LIU Xu-an¹, YANG Ke-cheng¹, HU Xin-guang¹, JIANG Xiao-gang², LUO Wei-xuan³, CHEN Da-ru³

(1. School of Information Engineering, Huangshan University, Huangshan 245041, China;
2. College of Teacher Education, Quzhou University, Quzhou 324000, China;
3. Hangzhou Institute of Advanced Studies, Zhejiang Normal University, Hangzhou 311231, China)

Abstract: In this paper, a wide range of low refractive index (RI) detection surface plasmon resonance (SPR) sensors based on D-ring-shaped side double-core photonic crystal fiber in the mid-infrared band is proposed. A metal layer is deposited on both the inner and outer surfaces of the D-ring. The full vector finite element method is used to analyze the performance of the sensor, and its sensing characteristics are studied. The results show that the sensor can achieve low and high external refractive index sensing sensitivity in the mid-infrared band. The detectable refractive index range of the analyte is 1.20~1.38, and the average wavelength sensitivity and maximum wavelength sensitivity can reach 13717 nm/RIU and 21150 nm/RIU respectively, with a resolution of 1.94×10^{-5} RIU. The designed sensor plays an important role in the fields of chemical, biological, and environmental detection.

Keywords: fiber optics sensors; photonic crystal fiber; surface plasmon resonance; wavelength sensitivity

1 引言

表面等离子体共振 (Surface Plasmon Resonance, SPR) 是光子与自由电子在电介质和金属层分界面上相互作用而形成的一种独特光学现象^[1-2]。当入射光波的波长或频率满足一定条件时,在界面处光波能量被金属大量吸收,导致出现强烈的共振吸收峰^[3-5],共振吸收峰对应的共振波长

对金属表面附近传感介质折射率的变化非常敏感。因此可制作成为高灵敏的折射率传感器。由于该传感器具有灵敏度高、体积小、实时检测等优点,在化学、生物医学和环境监测等领域具有很大的发展前景^[6-8]。光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF) 因其独特的导光特性和灵活的结构设计,已成为一种新的传感器设计平台^[9-12]。通过对光子晶体

基金项目:安徽省教育厅高校自然科学重点研究项目 (No. 2022AH051958); 黄山学院校级人才基金启动项目 (No. 2020xkj015); 大学生创新创业训练计划项目 (No. 2210375103); 黄山学院校级质量工程教学研究项目 (No. 2022JXYJ36) 资助。

作者简介:刘旭安 (1984 -), 男, 博士, 现主要从事光纤结构设计、光纤传感技术的研究。E-mail: liuxan@hsu.edu.cn

收稿日期:2023-12-17

光纤的结构进行针对性的设计并填充或镀上金属介质,可以将其制作成具有高传感性能的表面等离子体共振光子晶体光纤传感器(Photonic Crystal Fiber based on Surface Plasmon Resonance, PCF-SPR)^[13]。

当 PCF-SPR 传感器的折射率(Refractive Index, RI)检测上限小于或等于 1.33 时,一般把它定义为低 RI 检测 PCF-SPR 传感器。这种传感器在化学、生物和环境分析领域具有广阔的应用前景^[14-16]。然而,我们发现大多数低 RI 检测 PCF-SPR 传感器都工作在可见光或近红外波段,而工作中红外波段的传感器并不常见^[17-19]。中红外光波与各种有机和无机化合物的特征吸收带重合,比如在环境监测领域,由于大多数低折射率气体分子的吸收带往

往位于中红外光谱区,因此中红外波段低折射率检测 PCF-SPR 传感器在环境检测领域有着重要的应用。

本文提出并研究了一种新型 D 型环双芯 PCF-SPR 传感器。该传感器可用于中红外波段的低折射率宽范围检测,其共振波长范围可以从 2628 ~ 5097 nm,折射率检测范围为 1.20 ~ 1.38。采用有限元分析方法对该 PCF-SPR 传感器进行分析,研究结果表明,所提出的传感器的最大和平均波长灵敏度(Wavelength Sensitivity, WS)分别为 21150 nm/RIU 和 13717 nm/RIU,最大分辨率为 1.94×10^{-5} RIU。如表 1 所示,与已有的研究相比,所提出的 PCF-SPR 传感器具有高的波长灵敏度和分辨率。

表 1 本文所提出的传感器性能与已有传感器性能对比

Tab. 1 Performance comparisons of the proposed PCF-SPR RI sensor and other reported PCF-SPR RI sensors

Refs.	Wavelength/ μm	RI range	The maximum WS($\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$)	Resolution/RIU
[17]	2.4 ~ 2.8	1.20 ~ 1.29	11055	9.05×10^{-6}
[18]	2.9 ~ 3.6	1.36 ~ 1.37	11500	9.7×10^{-6}
[19]	2.505 ~ 3.181	1.12 ~ 1.37	12000	8.33×10^{-6}
This work	2.628 ~ 5097	1.20 ~ 1.38	21150	1.94×10^{-5}

2 传感器结构设计和理论建模

图 1 为所设计的 PCF-SPR 传感器的截面示意图。两纤芯都是实心结构,位于光纤端面水平方向的两侧,分别标记为 A 芯和 B 芯。纤芯周围两相邻气孔之间的距离为 $\Lambda = 6 \mu\text{m}$,气孔的直径为 $D_2 = 3.2 \mu\text{m}$ 。沿着 D 型环圆周均匀分布着五个大小和间距都相等的空气孔,其直径为 $D_1 = 12.8 \mu\text{m}$ 。D 型环的内侧和外侧半径分别为 $R_1 = 21 \mu\text{m}$ 和 $R_2 = 36 \mu\text{m}$ 。D 型环传感器的水平截面与该传感器的中心之间的距离为 $H = 8 \mu\text{m}$ 。金膜的厚度为 $m = 40 \text{ nm}$ 。背景材料是 SiO_2 ,其折射率由 Sellmeier 方程^[18]给出。

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

这里, λ 是入射电磁波的波长; n 是 SiO_2 的 RI; $B_1 = 0.69616300$, $B_2 = 0.4079426$, $B_3 = 0.8974794$, $C_1 = 0.00467914826 \mu\text{m}^2$, $C_2 = 0.0135120631 \mu\text{m}^2$, $C_3 = 97.9340025 \mu\text{m}^2$ 。金的介电常数可从 Johnson 和 Christy 在 1972 年提供的实验数据中检索出^[20]。在本文中, D 型环 PCF-SPR 传感器周围的区域充满被测分析物,其折射率用 na 表示,气孔中空气的折射率被设定为 1。

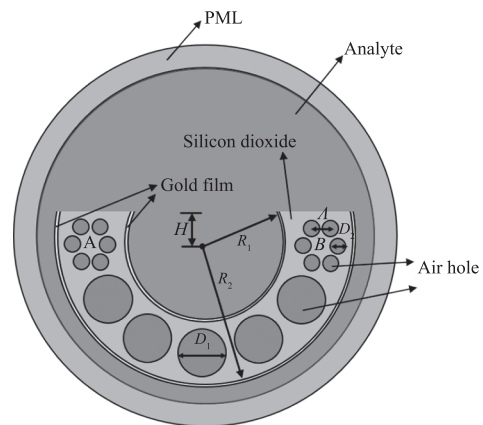


图 1 所设计的传感器的横截面图

Fig. 1 The cross-section view of the proposed sensor

在 PCF-SPR 传感器中,传输基模的限制损耗表示如下^[21]:

$$L[\text{dB/cm}] = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda[\mu\text{m}]} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^4 \quad (2)$$

其中, λ 为入射光的波长; $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 是基模有效折射率的虚数部分。PCF-SPR 传感器的波长灵敏度由以下公式得到^[21]:

$$S_{\lambda}[\text{nm/RIU}] = \frac{\Delta\lambda_{\text{peak}}}{\Delta na} \quad (3)$$

其中, $\Delta\lambda_{\text{peak}}$ 是两个共振波长之间的波长差; Δna 是

分析物的 RI 的变化量。传感器的分辨率可以通过以下公式计算^[21]：

$$R(RIU) = \frac{\Delta n}{\Delta \lambda_{\text{peak}}} \Delta \lambda_{\text{min}} = \frac{\Delta \lambda_{\text{min}}}{S_{\lambda}} \quad (4)$$

其中,光谱仪的波长分辨率假定为 $\Delta \lambda_{\text{min}} = 0.1 \text{ nm}$,分析物 RI 的变化步长为 $\Delta na = 0.02$ 。

3 传感器性能分析与讨论

本文通过有限元方法对该传感器的传输模式特征进行计算并分析。在数值计算过程中采用完全匹配层(PML)来处理计算区域的边界条件。

图2显示的是在 $2.50 \mu\text{m}$ 波长下,分析物 RI 为 1.30 时,光纤基模的电场分布。其中图2(a)和(c)分别为纤芯A的 x 和 y 偏振方向基模电场分布。图2(b)和(d)分别为纤芯B的 x 和 y 偏振方向基模电场分布。我们可以看到, y 偏振基模的大部分能量都被限制在纤芯中。相反, x 偏振基模中,有更多的能量从纤芯转移到金膜上,这说明与 y 偏振基模相比, x 偏振基模的SPR耦合效应更强。

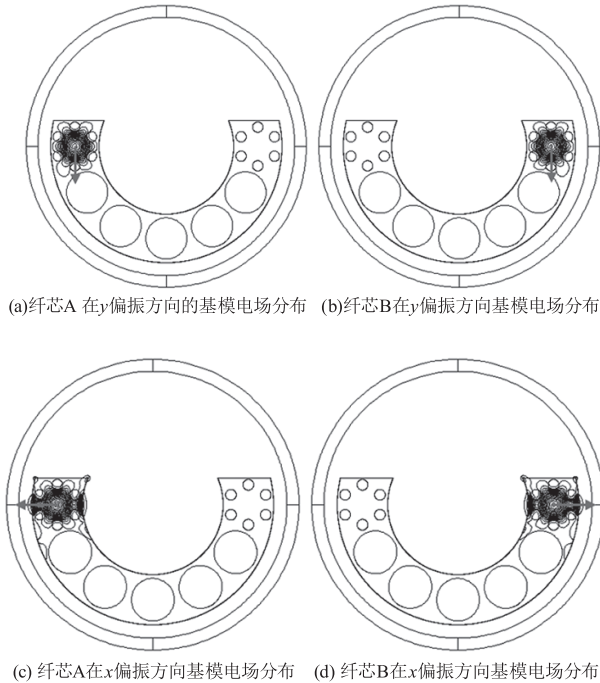


图2 所设计的传感器在波长为 $2.5 \mu\text{m}$,分析物折射率为 1.30 时基模电场分布情况

Fig. 2 Optical field distribution of core guided mode for the proposed sensor at $2.50 \mu\text{m}$ for analyte RI of 1.30

图3描述的是当分析物 RI 为 1.3 时,D型环PCF-SPR传感器的两个纤芯A和B在 x 偏振方向的基模限制损耗曲线。我们可以看出两条损耗曲线完全重合,这意味着两个纤芯是独立的,具有相同的等离子体共振特性。因此,所提出的传感器可以做成一个具有两

个独立传感通道的传感器。在接下来的数值分析中,本文选择A芯的 x 偏振基模(图2(c)所示)作为分析对象来研究该传感器的性能。

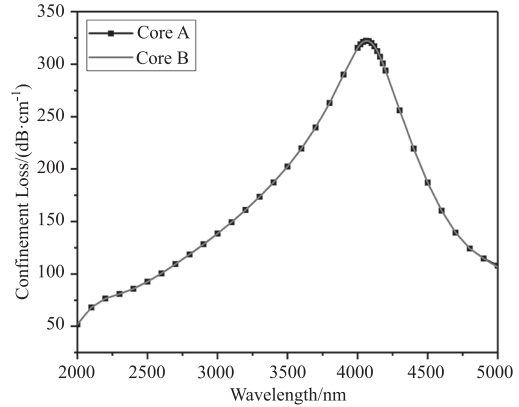


图3 D型环PCF-SPR传感器的芯A和芯B的限制损耗随波长的变化曲线

Fig. 3 Loss spectrums of fiber core A and B for the bilaterally coated PCF-SPR sensor

图4给出的是当分析物的 RI 为 1.30 时, x 偏振基模与表面等离子体激元(surface plasmon polariton, SPP)模的有效折射率随波长的变化曲线,以及 x 偏振基模的限制损耗变化曲线(图4(a)、(b)、(c)分别为各点的电场分布, $\Lambda = 6 \mu\text{m}$, $D_1 = 12.8 \mu\text{m}$, $D_2 = 3.2 \mu\text{m}$, $R_1 = 21 \mu\text{m}$, $R_2 = 36 \mu\text{m}$, $W = 7.4 \mu\text{m}$, $H = 8 \mu\text{m}$, $m = 40 \text{ nm}$, $na = 1.30$)。可以发现,随着波长的增加,在纤芯基模的有效折射率曲线和SPP模式的有效折射率曲线出现了一个交点,该处的限制损耗值达到最大值,这意味着这两种模式满足相位匹配的条件,金属层吸收的光能量达到最大值,此时的波长为共振波长,其值为 4065.5 nm 。

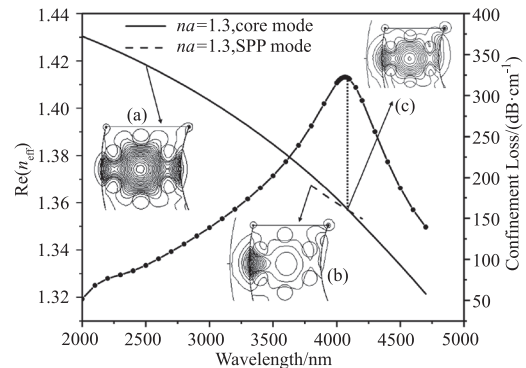


图4 有效折射率与限制损耗随波长的变化曲线

Fig. 4 Dispersion relationship of the core mode

由于限制损耗对传感器周围环境 RI 的变化高度敏感,相应的损耗峰会随着分析物 RI 的变化而变化。图5(a)给出了分析物 RI 在 $1.20 \sim 1.38$ 之间变化时, x 偏振基模的限制损耗曲线,分析物 RI 的变化步长

设置为 0.02 (其中 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $D_1 = 12.8 \mu\text{m}$, $D_2 = 3.2 \mu\text{m}$, $R_1 = 21 \mu\text{m}$, $R_2 = 36 \mu\text{m}$, $W = 7.4 \mu\text{m}$, $H = 8 \mu\text{m}$, $m = 40 \text{ nm}$)。可以看到,随着分析物 RI 的增大,共振峰向长波长方向移动,且共振峰的强度随波长增大而增大。共振波长与分析物的 RI 的变化关系进行多项式曲线拟合,得到拟合方程为:

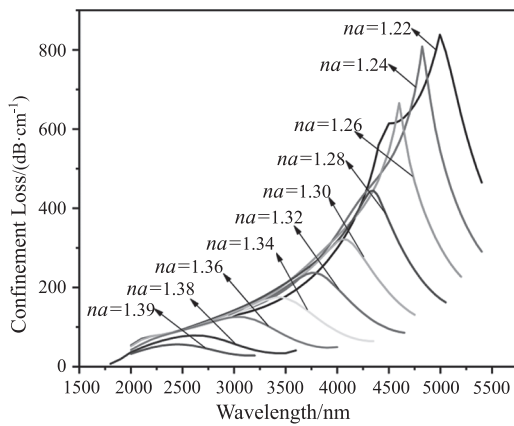
$$y = 98219.39x^2 - 43411.93x - 50236.098 \quad (6)$$

其中, x 为分析物的 RI; y 为共振波长。多项式线性拟合曲线显示 R^2 值为 0.9996。根据式(3)和式(4)可以计算传感器的波长灵敏度和分辨率,所计算的结果如表 1 所示。分析物的折射率可检测范围为 1.20 ~ 1.38,平均波长灵敏度和最大波长灵敏度可分别达到 13717 nm/RIU 和 21150 nm/RIU,分辨率可达到 1.94×10^{-5} RIU。

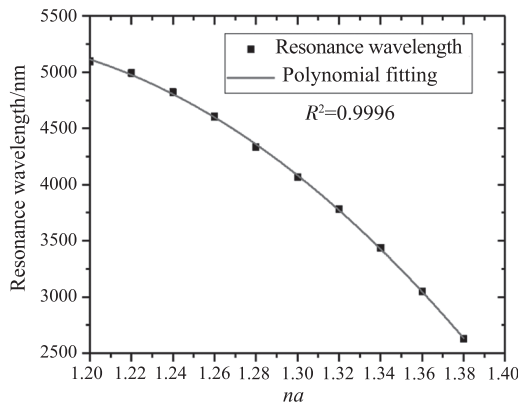
表 1 不同分析物 RI 条件下所设计的传感器的性能参数

Tab. 1 Parameter of sensor with different RI of analyte

Analyte RI/RIU	Resonant wavelength/nm	Peak loss/(dB · cm ⁻¹)	Wavelength sensitivity/(nm · RIU ⁻¹)	Resolution/RIU
1.20	5097	860.95	5150	1.94×10^{-5}
1.22	4994	838.66	8550	1.17×10^{-5}
1.24	4823	808.76	10900	9.17×10^{-6}
1.26	4605	668.09	13500	7.44×10^{-6}
1.28	4335	444.96	13475	7.42×10^{-6}
1.30	4065.5	322.50	14170	7.06×10^{-6}
1.32	3782.1	237.37	17205	5.81×10^{-6}
1.34	3438	175.63	19350	5.17×10^{-6}
1.36	3051	125.91	21150	4.73×10^{-6}
1.38	2628	78.96	/	/



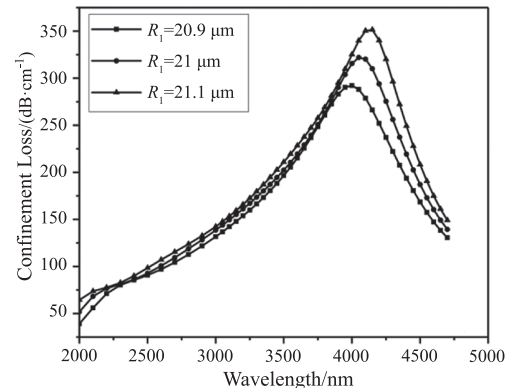
(a) PCF-SPR 传感器检测不同 RI 分析物时其基模限制损耗变化曲线



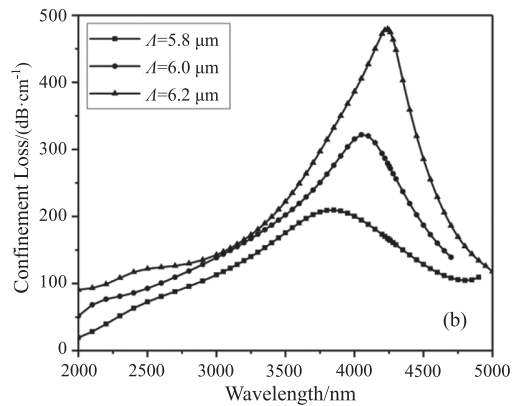
(b) 基模共振波长与分析物 RI 在 1.20~1.38 之间的多项式拟合线

图 5 分析物不同折射率时 PCF-SPR 传感器基模共振峰特性
Fig. 5 Characteristics of fundamental mode resonance peak of the PCF-SPR sensor for different analytes

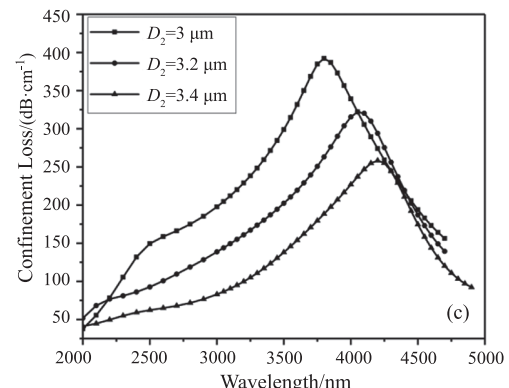
通常,传感器的结构参数对传感器的性能有很大影响。本文最后讨论了 D 环 PCF-SPR 光纤的内径 R_1 和外径 R_2 、纤芯空气孔直径 D_2 和纤芯空气孔间距 Λ 对该传感器传感性能的影响。如图 6 所示, PCF-SPR 传感器的基本结构参数为 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $D_1 =$



(a) D 型环内侧半径 R_1



(b) 小空气孔间距 Λ



(c) 小空气孔直径 D_2

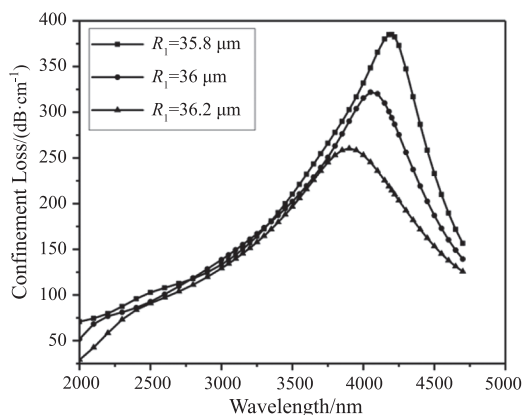
(d) D型环外侧半径 R_2

图6 不同结构参数条件下,限制损耗随波长变化的曲线

Fig. 6 Loss curve with varying for wavelength under different structural parameter

12.8 μm , $D_2 = 3.2 \mu\text{m}$, $R_1 = 21 \mu\text{m}$, $R_2 = 36 \mu\text{m}$, $H = 8 \mu\text{m}$, $m = 40 \text{ nm}$, $na = 1.30$ 。在分析时,采用控制变量法进行讨论,即当其中一个参数发生变化时,所有其他结构参数保持不变。图6(a)给出的是D型环PCF-SPR传感器的内径 R_1 对损耗的影响。当 R_1 从20.9 μm 变为21.1 μm 时,共振波长向长波长移动,限制损耗值逐渐增大。图6(b)显示了不同空气孔间距 Λ 对芯模损耗的影响。如图所示,当 Λ 从5.8 μm 增加到6.2 μm 时,限制损耗峰值从3839 nm红移到4235 nm,且损耗值随着 Λ 的增加而增加。这是因为当 R_1 增加和空气孔间距 Λ 增加时,金膜镀层和光纤纤芯之间的距离减小,表面等离子体共振效应增强,更多的光波能量进入金镀层,光纤纤芯基模场的能量减小,限制损耗峰值增加。纤芯气孔直径 D_2 对PCF-SPR传感器限制损耗的影响如图所示6(c)所示。从图中可以看出, D_2 的增加导致共振波长向长波长方向逐渐漂移,即从3806 nm移到了4199 nm,而限制损耗峰从392.3 dB/cm逐渐减小到258.3 dB/cm。图6(d)显示的是D型环PCF-SPR传感器的外半径 R_2 对限制损耗的影响。当 R_2 从35.8 μm 变为36.2 μm 时,共振波长向短波长移动,损耗强度逐渐减小。

可以看出,当参数 R_2 和 D_2 增加时,限制损耗峰值降低,这是因为当两参数增大时,金镀层和光纤纤芯之间的距离增加,光纤纤芯对光场的限制作用增加,这将导致等离子体共振效应减弱,光能量不容易进入金镀层,因此更多的光场能量会被限制在纤芯中,损耗峰值降低。

金层厚度决定了光场的阻尼损耗,对传感器的极限损耗和灵敏度有重要影响。图7显示了不同金

层厚度时传感器的限制损耗变化曲线(其中 $\Lambda = 6 \mu\text{m}$, $D_1 = 12.8 \mu\text{m}$, $D_2 = 3.2 \mu\text{m}$, $R_1 = 21 \mu\text{m}$, $R_2 = 36 \mu\text{m}$, $W = 7.4 \mu\text{m}$, $H = 8 \mu\text{m}$)。当金层厚度从35 nm变为45 nm时,损耗峰值不断增大,共振波长从3547 nm变为4457 nm,出现红移。通过调节金层的厚度,我们可以灵活地调节传感器的性能。通过参数优化,金层的最佳厚度为 $m = 40 \text{ nm}$ 。

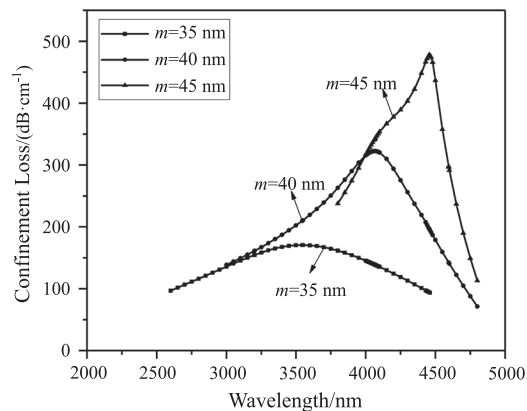


图7 不同金镀层厚度条件下,限制损耗随波长变化的曲线

Fig. 7 Loss spectra of core mode for different gold thickness at

4 结论

综上所述,本文提出了一种新型D型环双芯PCF-SPR传感器。通过在D型环内外通道上镀金膜以激发双SPR效应,以提高传感器的性能。采用全矢量有限元方法分析了该传感器的传感特性。结果表明,所提出的PCF-SPR传感器可以在很宽的范围内实现对低折射率分析物的检测,检测范围为1.20~1.38。平均波长灵敏度和最大波长灵敏度分别达到13717 nm/RIU和21150 nm/RIU,分辨率可以达到 1.94×10^{-5} RIU。所设计的传感器具有体积小、检测范围大、灵敏度高等特点。它在化学检测、药物筛选、水质监测等领域发挥着重要作用。

参考文献:

- [1] S Jain, K Choudhary, S Kumar. Photonic crystal fiber-based SPR sensor for broad range of refractive index sensing applications [J]. Optical Fiber Technology, 2022, 73:103030.
- [2] J Wang, C Liu, F Wang, et al. Surface plasmon resonance sensor based on coupling effects of dual photonic crystal fibers for low refractive indexes detection [J]. Results in Physics, 2020, 18:103240.
- [3] J He, J Wang, L Yang, et al. Ring-core photonic crystal fiber sensor based on SPR for extra-wide refractive index detection [J]. Coatings, 2023, 13(7):1207-1220.
- [4] V S Chaudhary, D Kumar, S Kumar. Gold-immobilized photonic crystal fiber-based SPR biosensor for detection of

- malaria disease in human body[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(16):17800–17807.
- [5] C Liu, J Lü, W Liu, et al. Overview of refractive index sensors comprising photonic crystal fibers based on the surface plasmon resonance effect[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(10):102202.
- [6] H N Rafi, M R Kaysir, M J Islam. Air-hole attributed performance of photonic crystal fiber-based SPR sensors[J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2020, 29:100364.
- [7] A A Rifat, R Ahmed, A K Yetisen, et al. Photonic crystal fiber based plasmonic sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 243:311–325.
- [8] Dora Juan Juan Hu, Ho Pui Ho. Recent advances in plasmonic photonic crystal fibers: design, fabrication and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2017, 9(2):257–314.
- [9] Liu Xu'an, Cheng Heping, Jiao Zheng, et al. Research on temperature sensing characteristics of photonic crystal fiber with symmetrical structure[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(4):477–481. (in Chinese)
刘旭安, 程和平, 焦铮, 等. 对称结构光子晶体光纤温度传感特性的研究[J]. *激光与红外*, 2019, 49(4):477–481.
- [10] Gong Jiamin, Mao Junjie, Tian Ning, et al. Multi-pumped gain-flattened Raman fiber amplifier based on photonic crystal fiber[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(10):1260–1265. (in Chinese)
巩稼民, 毛俊杰, 田宁, 等. 多泵浦增益平坦光子晶体拉曼光纤放大器[J]. *激光与红外*, 2019, 49(10):1260–1265.
- [11] Zeng Weiyou, Wang Qinglan, Xu Li, et al. Research on temperature sensing properties of asymmetric dual-core photonic crystal fiber[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(12):1455–1460. (in Chinese)
曾维友, 王晴岚, 徐利, 等. 非对称双芯光子晶体光纤的温度传感特性研究[J]. *激光与红外*, 2019, 49(12):1455–1460.
- [12] Zhang Dongliang, Zhou Kangpeng, Zhong Guoshun, et al. Study on temperature characteristics of PCF Fabry-Perot sensor fabricated by femtosecond laser[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(9):1124–1129. (in Chinese)
张东亮, 周康鹏, 钟国舜, 等. 基于飞秒激光制备的光子晶体光纤 Fabry-Perot 温度传感器[J]. *激光与红外*, 2019, 49(9):1124–1129.
- [13] Bing Pibin, Yao Jianquan, Huang Xiaohui, et al. Surface plasmon resonance sensor based on near-panda cladding photonic crystal fiber[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(7):784–787. (in Chinese)
邴丕彬, 姚建铨, 黄晓慧, 等. 表面等离子体共振类熊猫型光子晶体光纤传感器[J]. *激光与红外*, 2011, 41(7):784–787.
- [14] C Liu, L Yang, Q Liu, et al. Analysis of a surface plasmon resonance probe based on photonic crystal fibers for low refractive index detection[J]. *Plasmonics*, 2018, 13:779–784.
- [15] N Luan, L Zhao, Y Lian, et al. A high refractive index plasmonic sensor based on D-shaped photonic crystal fiber with laterally accessible hollow-core[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(5):1–7.
- [16] E Haque, M A Hossain, T Pham, et al. Surface plasmonic resonance sensor for wider range of low refractive index detection[C]//2019 26th International Conference on Telecommunications(ICT). *IEEE*, 2019:479–484.
- [17] X Chen, L Xia, C Li. 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.
- [18] N Chen, M Chang, X Lu, 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):3897–3908.
- [19] Hao Dan, Wang Jianshui, Xie Yuheng, et al. Surface plasmon resonance sensor based on dual-core photonic crystal fiber for low refractive index detection in mid-infrared spectrum[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(6):0628001–0628008. (in Chinese)
郝丹, 王建帅, 解宇恒, 等. 基于双芯光子晶体光纤的中红外表面等离子体共振低折射率传感器[J]. *光子学报*, 2020, 49(6):0628001–0628008.
- [20] A K Paul, M S Habib, H H Hai, et al. An air-core photonic crystal fiber based plasmonic sensor for high refractive index sensing[J]. *Optics Communications*, 2020, 464:125556–125561.
- [21] W Liu, F Wang, C Liu, et al. A hollow dual-core PCF-SPR sensor with gold layers on the inner and outer surfaces of the thin cladding[J]. *Results in Optics*, 2020, 1:100004–100011.