

## 基于 D 型光子晶体光纤的低折射率化学物传感器

赵海英<sup>1</sup>, 赵丽娟<sup>1,2,3\*</sup>, 徐志钮<sup>4</sup><sup>1</sup>华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003;<sup>2</sup>华北电力大学河北省电力物联网技术重点实验室, 河北 保定 071003;<sup>3</sup>华北电力大学保定市光纤传感与光通信技术重点实验室, 河北 保定 071003;<sup>4</sup>华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003

**摘要** 为实现低折射率药物、化学材料的高灵敏度监测,基于 D 型光子晶体光纤(PCF)设计了一种在开环内镀有金薄膜的表面等离子体共振(SPR)传感器。采用有限元法系统地研究了开环半径、D 型结构与纤芯的距离和金膜厚度对所提传感器的波长灵敏度的影响。结果表明,当分析物折射率范围为 1.28~1.32 时,该 PCF-SPR 传感器的最大波长灵敏度高达 15346 nm/RIU(RIU 为折射率单位),相应的分辨率为  $6.52 \times 10^{-9}$  RIU。与现有的研究相比,在同一折射率测量范围内,该 PCF-SPR 传感器的波长灵敏度和分辨率分别是已有的典型 PCF-SPR 传感器的 1.28~6.67 倍和 153/1000~783/1000。因此,该 PCF-SPR 传感器在生物医学、食品安全和物质监测等领域中具有较好的应用前景。

**关键词** 光纤光学; 表面等离子体共振; 光子晶体光纤; 低折射率传感; 高灵敏度

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2006002

## Sensor Based on D-Shaped Photonic Crystal Fiber for Detecting Chemicals with Low Refractive Index

Zhao Haiying<sup>1</sup>, Zhao Lijuan<sup>1,2,3\*</sup>, Xu Zhiniu<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China;

<sup>2</sup>Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China;

<sup>3</sup>Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China;

<sup>4</sup>School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China

**Abstract** In order to achieve high-sensitivity monitoring of drugs and chemical materials with low refractive index, a surface plasmon resonance (SPR) sensor with gold film plated in an open loop is designed based on the D-shaped photonic crystal fiber (PCF). The finite element method is adopted to systematically investigate the effects of open loop radius, the distance between the D-shaped structure and fiber core, and the thickness of gold film on the wavelength sensitivity of the proposed sensor. The results reveal that the maximum wavelength sensitivity of the PCF-SPR sensor reaches 15346 nm/RIU (RIU is refractive index unit) when the refractive index of analytes ranges from 1.28 to 1.32, and the corresponding resolution is  $6.52 \times 10^{-9}$  RIU. In view of the existing researches, the wavelength sensitivity and resolution of the proposed PCF-SPR sensor are 1.28-6.67 times and 153/1000-783/1000 of that of typical available PCF-SPR sensors within the same range of refractive index, respectively. Therefore, the proposed PCF-SPR sensor can be widely applied in fields such as biomedicine, food safety, and material monitoring.

**Key words** fiber optics; surface plasmon resonance; photonic crystal fiber; low refractive index sensor; high sensitivity

收稿日期: 2022-02-25; 修回日期: 2022-04-14; 录用日期: 2022-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(62171185,61775057)、中央高校基本科研业务费专项资金(2021MS072)、河北省自然科学基金(E2019502177,E2020502010)、河北省省级科技计划(SZX2020034)

通信作者: hdzlj@126.com

## 1 引言

当倏逝波与金属表面的自由电子相匹配时,会发生表面等离子体共振(SPR),在共振波长处可以得到一个较窄的吸收峰,该吸收峰对介质折射率的任何变化都非常敏感。由于SPR效应具有高灵敏度、实时和无标签监测的优点,故在医学诊断、环境监测和生化研究的折射率传感中得到了广泛的研究和应用<sup>[1-6]</sup>。金和银是SPR传感器的传感层中最常用的金属:银具有尖锐的损耗峰和较高的检测精度,但它容易被氧化,稳定性较差;金在具有较高检测精度的同时,具有良好的生物相容性和化学稳定性,因此成为了最适合的等离子性材料。在各种SPR传感器中,基于光子晶体光纤(PCF)的SPR传感器因其优良的传输性能、灵活的设计和较小的尺寸而越来越受科学界的关注<sup>[7-8]</sup>。在化学、医疗等领域中,低折射率的医疗用品和化学材料较为常见,如:医用氧气、液态二氧化碳和含氟有机物的折射率在1.2~1.3范围内;七氟醚的折射率为1.27<sup>[9]</sup>;气凝胶的折射率在1.004~2.200范围内<sup>[10]</sup>。然而,可用于低折射率药物和化学材料监测的传感器仍存在较大的发展空间。因此,设计适用于此类低折射率化学材料、医疗用品的PCF-SPR传感器在化学、医疗和食品监测等领域中都具有重要的现实意义。

目前,已报道了多种类型的PCF-SPR传感器,如D型<sup>[11]</sup>、H型<sup>[12]</sup>、蜂窝型<sup>[13]</sup>和螺旋型<sup>[14]</sup>等。大多数基于SPR的传感器都依赖于外部传感技术,即将样品直接放置在平坦的抛光表面上,而D型PCF结构能够避免待测样品选择性填充到空气孔中所带来的繁琐流程,简化镀金属的步骤,进而更适用于外部传感<sup>[11,15]</sup>。2017年,Gangwar和Singh<sup>[16]</sup>提出了一种在PCF的顶部平坦部分覆有金层的D型光纤传感器,利用在基模和表面等离子极化激元(SPP)模式之间观察到的SPR效应监测待测样品折射率的变化,在1.43~1.46折射率变化范围内得到的平均波长灵敏度和分辨率分别为7700 nm/RIU(RIU为折射率单位)和 $1.30 \times 10^{-5}$  RIU。同年,An等<sup>[17]</sup>提出了一种镀金的D型折射率传感器,通过改变金层厚度的方式来观察PCF的传感性能,发现当折射率值在1.33~1.38范围内时,最高灵敏度可达到10493 nm/RIU,分辨率为 $9.53 \times 10^{-6}$  RIU。2018年,Chen等<sup>[18]</sup>提出了一种D型PCF-SPR传感器,结果表明,该传感器的传感范围为1.20~1.29,当待测样品的折射率为1.29时,最大光谱灵敏度为11055 nm/RIU,分辨率为 $9.05 \times 10^{-6}$  RIU。2019年,Yang等<sup>[19]</sup>提出了一种覆有氧化铟锡的凹形PCF-SPR传感器,当折射率测量范围为1.19~1.29时,波长灵敏度为1700~10700 nm/RIU。2020年,Paul等<sup>[20]</sup>通过空芯PCF和两个水平抛光面将可监测折射率范围扩展至1.42。同年,肖功利等<sup>[15]</sup>设计了一种新颖的D型对称双芯PCF-SPR折射率传感器,在1.32~1.43折射率范围内,与双峰对应的平均灵敏度分别高达6209.09 nm/RIU和8390.91 nm/RIU。

由此可见,虽然已经提出了多种D型PCF-SPR传感器来改善传感性能,但是现有的适用于折射率小于1.32的医用氧气、液态二氧化碳、含氟有机物和卤代醚等化学医疗用品的传感器的灵敏度仍不够高,无法满足实际的工程需求。

本文设计了一种适用于低折射率传感范围的高灵敏度D型PCF-SPR传感器,该传感器结构中包括两层呈六边形排列的空气孔,纤芯右侧设置了待测样品开环通道,开环中镀了金薄膜,结构简单,易于制造。本文采用有限元法系统地研究了结构参数对该传感器灵敏度的影响,并根据研究结果对该传感器进行了结构优化。与现有的PCF-SPR传感器相比,本文设计的传感器的制备更为容易且波长灵敏度更高,在医用氧气、液态二氧化碳、含氟有机物和卤代醚等化学医疗用品的传感中具有较大的参考价值。

## 2 结构与模型

本文所设计的基于PCF的D型SPR传感器的横截面如图1所示。该PCF结构包含两层按六边形排列的圆形空气孔,两层圆形空气孔交错分布,第一层空气孔的直径 $d_1$ 为0.8  $\mu\text{m}$ ,第二层空气孔的直径 $d_2$ 为2.0  $\mu\text{m}$ ,将第二层空气孔中最右侧的空气孔设置为开环,光纤半径 $r$ 为5.4  $\mu\text{m}$ 。光纤外有厚度为 $a=1.7 \mu\text{m}$ 的传感区域层,待测样品可充斥其中,光纤右侧抛光的D型结构位于距纤芯 $h$ 的位置处,开环通道的半径为 $r_s$ ,金薄膜的厚度为 $t$ 。在该PCF中,交错分布的两层圆形空气孔将光纤中传输的能量较好地限制在纤芯中,并降低了光纤的限制性损耗。此外,在开环中镀金膜来促使光纤中SPR效应的发生。相较于传统的D型SPR传感器,开环避免了待测样品填充到空气孔中、减少了所镀金属面积,且激励的SPP模式的能量相对集中<sup>[11]</sup>。

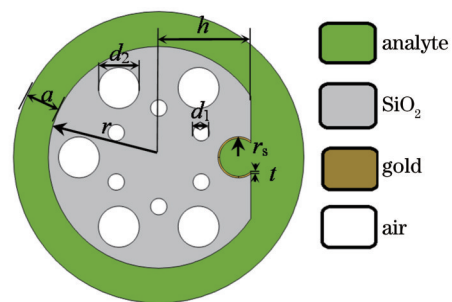


图1 所设计的D型PCF-SPR传感器的横截面

Fig. 1 Cross section of designed D-shaped PCF-SPR sensor

金的介电常数可由Drude模型<sup>[18]</sup>表示,即

$$\epsilon_{\text{Au}} = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\omega_c)}, \quad (1)$$

式中: $\epsilon_{\infty}$ 为金在高频极限时的介电常数,取值为9.75; $\omega_p$ 为金的等离子体频率,取值为 $1.36 \times 10^{16}$  Hz; $\omega_c$ 为电子散射频率,取值为 $1.45 \times 10^{14}$  Hz<sup>[11]</sup>; $\omega$ 为入射光的角频率。

### 3 光谱分析方法与模型分析

#### 3.1 光谱分析方法

当 PCF 中的光波入射到金膜表面时,其波矢在切向上的分量为

$$k_x = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_{co}(\lambda)} \sin \theta, \quad (2)$$

式中: $\lambda$ 为入射波长; $\epsilon_{co}(\lambda)$ 为 PCF 纤芯材料的介电常数; $\theta$ 为光波在界面处的入射角。在金膜与待测样品界面处激发的表面等离子体的本征波数为

$$k_{sp} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon_s(\lambda)\epsilon_m(\lambda)}{\epsilon_s(\lambda) + \epsilon_m(\lambda)}}, \quad (3)$$

式中: $\epsilon_s(\lambda)$ 和 $\epsilon_m(\lambda)$ 分别为样品和金膜的介电常数。PCF 中传播的纤芯基模发生泄漏,入射到开环内的金膜表面上并激发等离子体。当纤芯基模与 SPP 模式之间满足相位匹配条件时,即当 $k_x = k_{sp}$ 时,产生的 SPR 效应最强,此时 PCF 透射光谱中的相关波长位置出现尖锐的损耗峰<sup>[21]</sup>。因此,PCF 透射光谱上的损耗峰处对应的波长和强度只与待测样品的介电常数有关,而从数值角度来看,介电常数的平方为折射率,即可认为损耗峰波长和强度只与样品的折射率有关。

当光波在光纤中传输时,其损耗光谱可由光纤的限制性损耗 $L_c$ 表征, $L_c$ 的表达式为

$$L_c = \frac{20}{\ln 10} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (4)$$

式中: $n_{\text{eff}}$ 为光纤有效折射率; $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为光纤有效折射率的虚部。

当待测样品的折射率发生改变时,损耗谱上峰值对应的共振波长会发生漂移。PCF-SPR 传感器的光谱灵敏度<sup>[21]</sup>可表示为

$$S_\lambda = \frac{\Delta\lambda_{\text{peak}}}{\Delta n_a}, \quad (5)$$

式中: $\Delta\lambda_{\text{peak}}$ 为损耗峰对应的共振波长的漂移量; $\Delta n_a$ 为待测样品折射率的变化量。此时,折射率分辨率为

$$R = \frac{\Delta n_a \Delta\lambda_{\text{min}}}{\Delta\lambda_{\text{peak}}}, \quad (6)$$

式中: $\Delta\lambda_{\text{min}}$ 为最小光谱仪分辨率。

#### 3.2 模型分析

首先,建立本文所设计的 D 型 PCF-SPR 传感器的仿真模型并确定待测样品折射率,模型如图 2 所示。同时,采用完美匹配层模拟边界条件和较细化网格剖分来提高结果的准确性。然后,利用有限元法对本文所设计的 D 型 PCF-SPR 传感器的电磁场进行求解,可得到不同波长下纤芯基模和 SPP 模式的有效折射率。最后,将波长和相应波长下纤芯基模的有效折射率虚部代入式(4)中,可得到所设计传感器的限制性损耗。进一步地,一段波长范围内的限制性损耗共同构成了损耗谱。当纤芯基模与 SPP 模式之间满足相位匹配条件时,相关波长位置处会出现尖锐的损耗峰,此时的波长为共振波长。

待测样品折射率和传感器结构参数的变化都有可

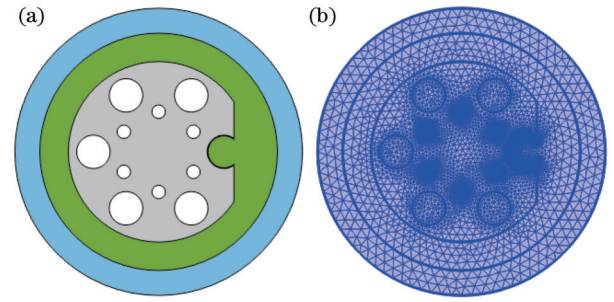


图 2 PCF-SPR 传感器的仿真模型。(a)未剖分;(b)较细化网格剖分

Fig. 2 Simulation model of PCF-SPR sensor. (a) No subdivision; (b) finer mesh subdivision

能会使损耗谱的共振波长发生漂移。由式(5)和式(6)可知,由待测样品折射率改变所导致的共振波长变化体现了该传感器的光谱灵敏度和折射率分辨率。传感器结构参数的变化会导致共振波长发生漂移,表明该参数对传感器的性能有一定的影响,进而需要进行系统分析以确定该传感器的最佳参数选择。

### 4 结果与讨论

色散关系能够反映该传感器是否会发生 SPR 效应,因此需要对其进行分析以确保该传感器能对折射率进行传感。然而,该 PCF-SPR 传感器的结构参数对传感性能可能存在较大影响,因此需要对其进行系统的分析以确定最佳结构。该传感器的目标是实现折射率小于 1.32 的低折射率物质的传感,故不考虑折射率大于 1.32 的情况。研究表明,该传感器的传感位置处所涉及的参数(开环半径 $r_s$ 、D 型结构与传感区域外侧的距离 $h$ 、金膜厚度 $t$ )对传感器性能有较为明显的影响。在以上结构参数取不同值时,利用所设计的传感器分别对折射率小于 1.32 的不同待测样品进行了传感。结果表明,该传感器的光谱灵敏度在待测样品的折射率小于 1.28 时均明显降低,故该传感器可高灵敏度测量的待测样品折射率范围为 1.28~1.32(待测样品的折射率用 $n_a$ 表示)。本文采用有限元法分析了该 PCF-SPR 传感器的色散关系,并系统地研究了结构参数对该传感器的灵敏度的影响。

#### 4.1 色散关系

本节分析了该 PCF-SPR 传感器结构参数取不同值时的色散关系以验证该 PCF-SPR 传感器是否能够发生 SPR 效应并对折射率进行传感。研究表明,该 PCF-SPR 传感器在 $0.8 \mu\text{m} \leq r_s \leq 1.4 \mu\text{m}$ 、 $4.0 \mu\text{m} \leq h \leq 4.8 \mu\text{m}$ 和 $t \geq 35 \text{ nm}$ 范围内均可发生 SPR 效应并对折射率进行传感。以金属膜厚度为 $t=45 \text{ nm}$ 、D 型结构与纤芯距离为 $h=4.8 \mu\text{m}$ 和开环半径为 $r_s=1.0 \mu\text{m}$ 为例,在图 3 中展示了此时的色散关系。图 3(a)为对 $n_a=1.28$ 的待测样品进行分析所得的色散关系。图 3(b1)~(b5)为图 3(a)中标注的各点的纤芯基模或 SPP 模式的电场分布。共振现象发生在纤芯基模和 SPP 模式的有效折射率实部相等时,即图 3(a)中的 C 点处,



可以发现,在共振波长附近,纤芯基模的损耗急剧增加,这是因为纤芯基模的能量转移到了 SPP 模式中,

从图 3(b3)可观察到该现象。

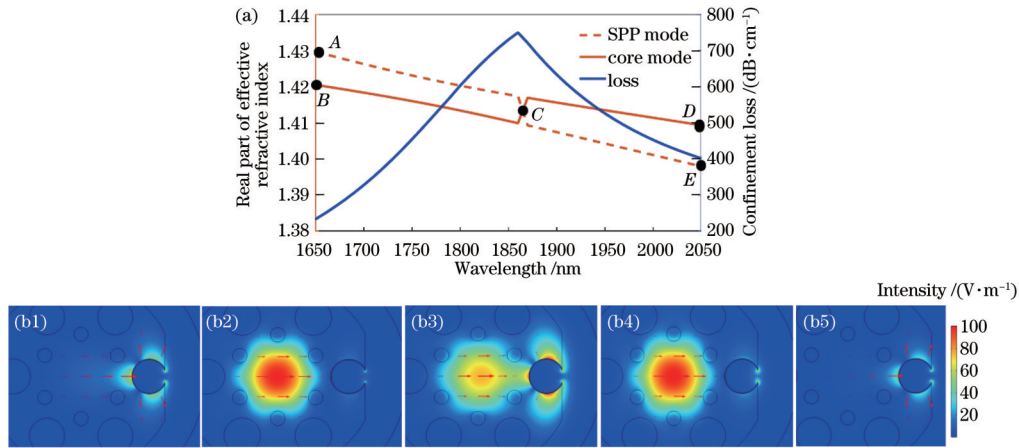


图 3 色散关系。(a)纤芯基模与 SPP 模式的有效折射率实部和纤芯基模的损耗谱;(b1)~(b5)图 3(a)中各点的电场分布  
Fig. 3 Dispersion relation. (a) Real part of effective refractive index of fundamental mode and SPP mode, and loss spectrum of fundamental mode; (b1)~(b5) electric field distribution of each point marked in Fig. 3(a)

图 4 展示了该传感器的损耗谱随待测样品折射率的变化情况。可以发现,随着折射率的增加,损耗峰红移,共振波长逐渐增大,也就是说,随着  $n_a$  的增大,损耗峰发生漂移。因此,本文所设计的 PCF-SPR 传感器可以通过损耗峰的漂移量来测量待测样品折射率的变化。

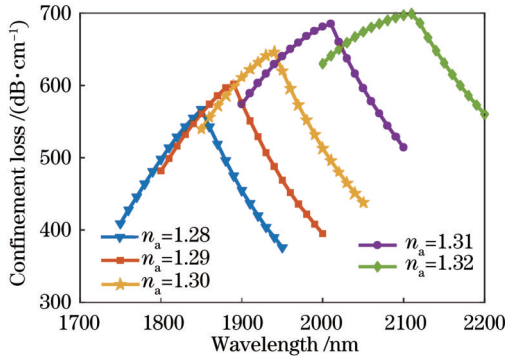


图 4 损耗谱随待测样品折射率的变化

Fig. 4 Loss spectrum varying with refractive index of analyte

## 4.2 结构参数的影响

### 4.2.1 开环半径

由于该 PCF-SPR 传感器主要是通过金膜上的 SPR 现象实现的,因此镀有金膜的开环的半径对其传感性能有着较大的影响。由 4.1 节可知,该 PCF-SPR 传感器在  $0.8 \mu\text{m} \leq r_s \leq 1.4 \mu\text{m}$ 、 $4.0 \mu\text{m} \leq h \leq 4.8 \mu\text{m}$  和  $t \geq 35 \text{ nm}$  范围内均可发生 SPR 效应并对折射率进行传感,故本文对开环半径在  $0.8 \sim 1.4 \mu\text{m}$  范围内、待测样品折射率在  $1.28 \sim 1.32$  范围内 PCF-SPR 传感器传感性能的变化进行了分析,分析结果如图 5 所示。图 5(a)展示了  $h=4.5 \mu\text{m}$ 、 $t=40 \text{ nm}$  时的损耗谱,可以发现:当  $r_s=0.8 \mu\text{m}$  时,虽然损耗谱较窄,但是损耗峰值较大;当  $r_s=1.2 \mu\text{m}$  或  $r_s=1.4 \mu\text{m}$  时,虽然损耗峰值

较小,但是损耗谱宽度过大,进而会引入过多的噪声,降低信噪比和影响传感准确性;当  $r_s=1.0 \mu\text{m}$  时,损耗峰值与损耗谱宽度都处于较优的状态。图 5(b)展示了  $h=4.5 \mu\text{m}$ 、 $t=40 \text{ nm}$  时,不同开环半径下共振波长随待测样品的折射率的变化情况。由式(5)可知,图中曲线的斜率代表了所提传感器的波长灵敏度。从图 5(b)可以发现,相比于  $r_s=1.4 \mu\text{m}$  的情况,  $r_s=0.8 \mu\text{m}$ 、 $r_s=1.0 \mu\text{m}$  和  $r_s=1.2 \mu\text{m}$  时曲线斜率较大,即波长灵敏度较高。同时,由图 5(a)可知,不同折射率的待测样品的损耗谱在不同  $r_s$  下具有相同的规律,故本文以  $n_a=1.3$  为例,对  $r_s$  的数值选择是否受其他参数的影响进行分析。

为探究金膜厚度、D 型结构与纤芯的距离对开环半径选择的影响,本文通过改变金膜厚度和 D 型结构与纤芯的距离的方式对损耗谱进行了分析,结果如图 6(a)、(b)所示。图 6(a)展示了当  $h=4.5 \mu\text{m}$ 、 $n_a=1.3$  时,金膜厚度对所提传感器损耗谱的影响。可以发现,  $t$  取不同值时损耗谱的损耗峰值和谱宽都在  $r_s=1.0 \mu\text{m}$  处具有更优的状态,即金膜厚度不影响开环半径的选择。图 6(b)展示了当  $t=45 \text{ nm}$ 、 $n_a=1.3$  时, D 型结构与纤芯的距离对所提传感器损耗谱的影响。可以发现:当  $h=4.8 \mu\text{m}$ 、 $r_s=0.8 \mu\text{m}$  时,所提传感器无法实现传感;  $h$  取不同值时损耗谱的损耗峰值和谱宽都在  $r_s=1.0 \mu\text{m}$  处具有更优的状态,即 D 型结构与纤芯距离不影响开环半径的选择。因此,综合损耗峰值、损耗谱的谱宽和波长灵敏度,本文选择开环半径为  $r_s=1.0 \mu\text{m}$ 。

### 4.2.2 D 型结构与纤芯的距离

在所提 PCF-SPR 传感器中, D 型结构与纤芯的距离  $h$  决定着可充斥于传感区域的待测样品的体积,故也对其传感性能有着重要影响。由 4.2.1 节可知,  $r_s=1.0 \mu\text{m}$  是开环半径的最优选择,故本文在  $r_s=1.0 \mu\text{m}$

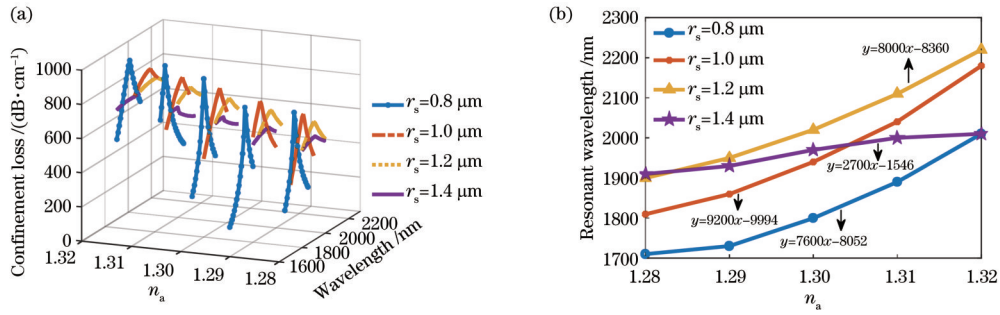


图 5 当  $h=4.5 \mu\text{m}$ 、 $t=40 \text{ nm}$  时,不同  $r_s$  下的损耗谱和共振波长。(a) 不同折射率的待测样品的损耗谱;(b) 共振波长随  $n_a$  的变化  
Fig. 5 Loss spectra and resonant wavelengths under different  $r_s$  when  $h=4.5 \mu\text{m}$  and  $t=40 \text{ nm}$ . (a) Loss spectra of analyte with different  $n_a$ ; (b) resonant wavelength varying with  $n_a$

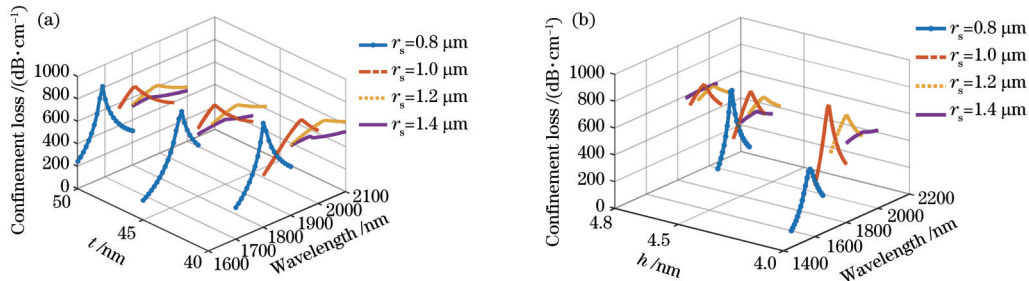


图 6 不同  $r_s$  下的损耗谱。(a) 当  $h=4.5 \mu\text{m}$ 、 $n_a=1.3$  时,待测样品的损耗谱;(b) 当  $t=45 \text{ nm}$ 、 $n_a=1.3$  时,待测样品的损耗谱  
Fig. 6 Loss spectra under different  $r_s$ . (a) Loss spectra of analyte when  $h=4.5 \mu\text{m}$  and  $n_a=1.3$ ; (b) loss spectra of analyte when  $t=45 \text{ nm}$  and  $n_a=1.3$

的情况下,对  $t=40 \text{ nm}$ 、 $4.0 \mu\text{m} \leq h \leq 4.8 \mu\text{m}$  和  $1.28 \leq n_a \leq 1.32$  下的 PCF-SPR 传感器进行了分析,研究结果如图 7 所示。由图 7(a) 可知:当  $h=4.0 \mu\text{m}$  时,虽然所提传感器的损耗谱较窄,但是损耗峰值较大;当  $h=4.8 \mu\text{m}$  时,虽然所提传感器的损耗峰值较小,但是损耗谱宽度过大,进而会影响传感的准确性;

当  $h=4.5 \mu\text{m}$  时,损耗峰值与损耗谱宽度都处于较优的状态。图 7(b) 为  $r_s=1.0 \mu\text{m}$ 、 $t=40 \text{ nm}$  时, $h$  取不同值的情况下共振波长随待测样品折射率的变化情况。图中曲线的斜率代表所提传感器的波长灵敏度,可以发现, $h=4.5 \mu\text{m}$  时曲线斜率最大,即折射率灵敏度最高。

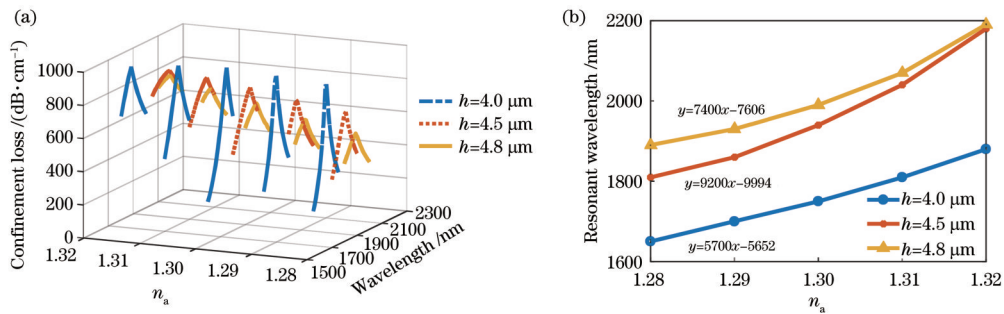


图 7 当  $r_s=1.0 \mu\text{m}$ 、 $t=40 \text{ nm}$  时,不同  $h$  下的损耗谱和共振波长。(a) 不同折射率待测样品的损耗谱;(b) 共振波长随  $n_a$  的变化  
Fig. 7 Loss spectra and resonant wavelengths under different  $h$  when  $r_s=1.0 \mu\text{m}$  and  $t=40 \text{ nm}$ . (a) Loss spectra of analyte with different  $n_a$ ; (b) resonant wavelength varying with  $n_a$

由图 7(a) 可知不同折射率的待测样品的损耗谱在不同  $h$  下具有相同的规律,故本文以  $n_a=1.3$  为例对  $h$  的数值选择是否受其他参数的影响进行分析。由 4.2.1 节可知, $r_s=1.0 \mu\text{m}$  是开环半径的最优选择,而金膜厚度  $t$  对  $h$  的选择的影响需要进一步分析。本文在  $r_s=1.0 \mu\text{m}$ 、 $n_a=1.3$  时改变金膜厚度  $t$  分析了其对  $h$  的选择的影响,结果如图 8 所示。可以发现, $t$  取不同值时损耗谱的损耗峰值和谱宽都在  $h=4.5 \mu\text{m}$  时更

优,即金膜厚度不影响  $h$  的选择。因此,综合损耗峰值、损耗谱的谱宽和波长灵敏度,本文选择 D 型结构与纤芯的距离  $h$  为  $4.5 \mu\text{m}$ 。

### 4.2.3 金膜厚度

所提 PCF-SPR 传感器主要是通过光入射到金属表面上激发的 SPP 模式与纤芯基模耦合实现的。当金膜较薄时,辐射阻尼会引发强阻尼。当金膜过厚时,电场无法穿过金膜,进而导致波长灵敏度和损耗峰值

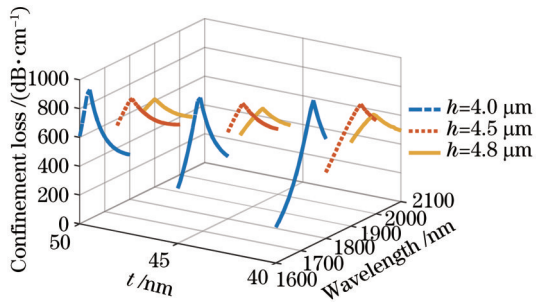


图 8  $r_s=1.0 \mu\text{m}$ 、 $n_a=1.3$  时待测样品的损耗谱随  $h$  的变化  
Fig. 8 Loss spectrum of analyte varying with  $h$  when  $r_s=1.0 \mu\text{m}$  and  $n_a=1.3$

显著降低<sup>[22-23]</sup>。因此,金膜的厚度是影响纤芯基模与

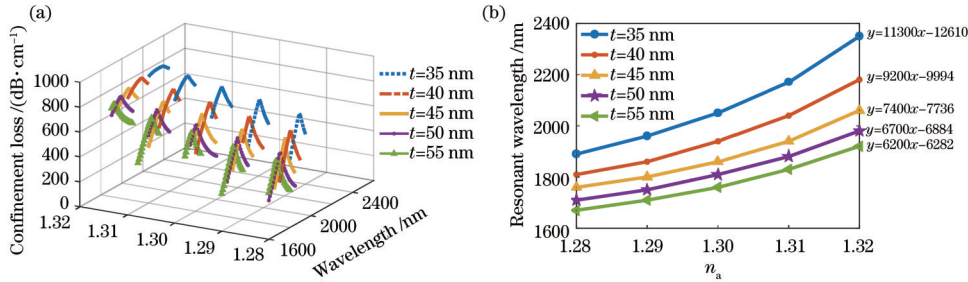


图 9  $r_s=1.0 \mu\text{m}$ 、 $h=4.5 \mu\text{m}$  时不同  $t$  下的损耗谱和共振波长。(a) 不同折射率待测样品的损耗谱;(b) 共振波长随  $n_a$  的变化  
Fig. 9 Loss spectra and resonant wavelengths under different  $t$  when  $r_s=1.0 \mu\text{m}$  and  $h=4.5 \mu\text{m}$ . (a) Loss spectra of analyte with different  $n_a$ ; (b) resonant wavelength varying with  $n_a$

### 4.3 PCF-SPR 传感器的折射率灵敏度

根据 4.2 节中对影响所提 PCF-SPR 传感器的结构参数的分析,确定了该传感器的最佳参数,即开环的半径为  $r_s=1.0 \mu\text{m}$ 、D 型结构与纤芯的距离为  $h=4.5 \mu\text{m}$  和金膜厚度为  $t=40 \text{ nm}$ 。本文分析了该 PCF-SPR 传感器对折射率范围在 1.28~1.32 内的待测样品的传感性能,得到了不同折射率的待测样品的损耗谱,结果如图 10 所示。利用式(4)~(6)可得到所设计的 PCF-SPR 传感器对不同折射率的待测样品的损耗谱、波长灵敏度和分辨率。

图 11 给出了不同折射率的待测样品的共振波长,并给出了该 PCF-SPR 传感器的共振波长随待测样品

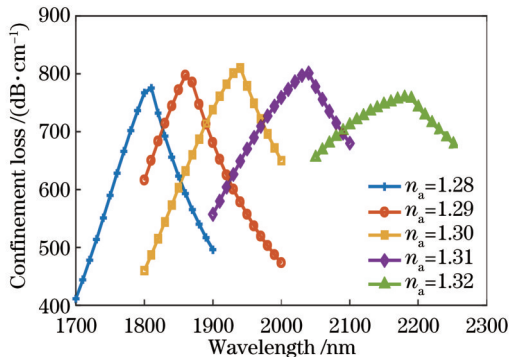


图 10 不同折射率的待测样品的损耗谱  
Fig. 10 Loss spectra of analyte with different  $n_a$

SPP 模式之间共振耦合的一个重要参数。由 4.2.1 节和 4.2.2 节可知,  $r_s=1.0 \mu\text{m}$ 、 $h=4.5 \mu\text{m}$  是最优选择,故本文在  $r_s=1.0 \mu\text{m}$  和  $h=4.5 \mu\text{m}$  的条件下,对金膜厚度  $t$  在 35~55 nm 范围内、待测样品折射率在 1.28~1.32 范围内时传感特性的变化进行了分析,结果如图 9 所示。图 9(a) 表明损耗谱的峰值和谱宽会随着金膜厚度的减小而增大,此时传感的检测精度会大大降低。当  $t=35 \text{ nm}$ 、 $n_a=1.32$  时,损耗谱的峰值过大且谱宽过宽,而当  $t=40 \text{ nm}$  时,不同折射率的分析物的损耗谱的峰值和谱宽均处于较好的状态。从图 9(b) 可以发现,随着金属膜厚度的减小,曲线的斜率逐渐增大,即波长灵敏度增大。因此,综合考虑损耗谱的损耗峰值、谱宽和波长灵敏度,应选择金膜厚度为  $t=40 \text{ nm}$ 。

折射率的变化拟合结果。插图中给出了多项式拟合结果,该拟合曲线的斜率代表了所提 PCF-SPR 传感器的灵敏度,该拟合的校正系数  $R^2$  为 0.9999,表明拟合一致性较好。其中,SSE 为和方差, RMSE 为均方根误差。由拟合方程可知,该 PCF-SPR 传感器的最大波长灵敏度在待测样品折射率为 1.32 时取得。此时,由式(6)可得最大波长灵敏度为 15346 nm/RIU,由式(7)可得在最小光谱仪分辨率为 0.1 nm 时折射率分辨率为  $6.52 \times 10^{-9}$  RIU。

表 1 为所提 PCF-SPR 传感器与现有典型 PCF-SPR 传感器在相同折射率测量范围、相同最小光谱仪分辨率条件下的性能比较。可以发现,与现有研究<sup>[24-28]</sup>相比,在同一折射率测量范围内,所提 PCF-SPR 传感器的波长灵敏度是现有典型 PCF-SPR 传感器的 1.28~6.67 倍,分辨率是现有典型 PCF-SPR 传感器的 153/1000~783/1000。较高的波长灵敏度使所提传感器在折射率为 1.28~1.32 之间的医用氧气、液态二氧化碳、含氟有机物和卤代醚等化学医疗用品的传感应用中具有较大的应用潜力。

此外,相比于图 12 所示的现有适用于低折射率传感范围的凹形结构<sup>[19]</sup>、负曲率结构<sup>[26]</sup>、空芯负曲率结构<sup>[27]</sup>和镀氧化锡结构<sup>[28]</sup>的 PCF-SPR 传感器,所设计的 D 型镀有金薄膜的 PCF-SPR 传感器中都是常见的圆形空气孔,且空气孔的个数较少、布局对称、结构简单。开环传感通道避免了待测样品选择性填充到空气



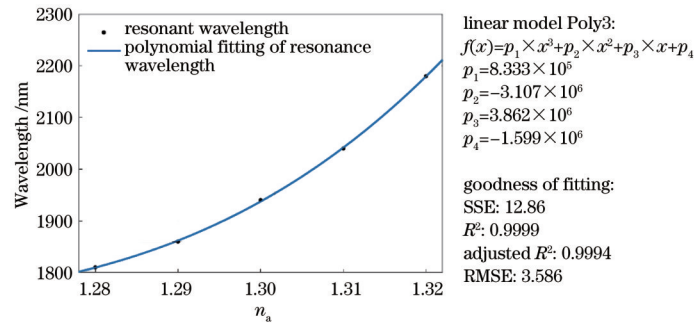


图 11 共振波长随折射率的变化和拟合曲线

Fig. 11 Resonant wavelength varying with refractive index and its polynomial fitting

表 1 所提 PCF-SPR 传感器与现有典型 PCF-SPR 传感器的比较

Table 1 Comparison between proposed PCF-SPR sensor and existing typical PCF-SPR sensors

Ref.	Range of refractive index	Instrumental resolution /nm	Maximum wavelength sensitivity / (nm·RIU <sup>-1</sup> )	Resolution /RIU
[24]	1.28-1.32	0.1	<2350	4.26 × 10 <sup>-8</sup>
[25]	1.29-1.32		<4157	2.41 × 10 <sup>-8</sup>
[26]	1.28-1.32	0.1	<12000	8.33 × 10 <sup>-9</sup>
[27]	1.28-1.32	0.1	<6000	1.64 × 10 <sup>-8</sup>
[28]	1.28-1.32	0.1	8000	6.67 × 10 <sup>-9</sup>
Our work	1.28-1.32	0.1	15346	6.52 × 10 <sup>-9</sup>

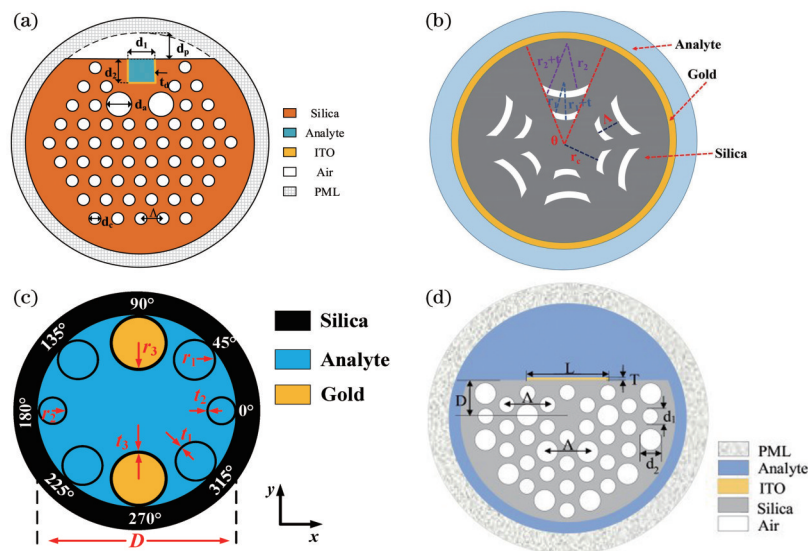


图 12 现有适用于低折射率传感范围的 PCF-SPR 传感器结构。(a)凹形结构<sup>[19]</sup>; (b)负曲率结构<sup>[26]</sup>; (c)空芯负曲率结构<sup>[27]</sup>; (d)镀氧化铟锡结构<sup>[28]</sup>

Fig. 12 Existing PCF-SPR sensors for analyte with low refractive index. (a) Concave-shaped structure<sup>[19]</sup>; (b) negative curvature structure<sup>[26]</sup>; (c) hollow-core negative curvature structure<sup>[27]</sup>; (d) structure with indium tin oxide coating<sup>[28]</sup>

孔中带来的繁琐流程,并且所镀的金属也较为常见、易于获得,这大大降低了制造难度<sup>[11]</sup>。

### 5 光纤的可加工性

随着制作技术的发展,堆积-拉制法、3D 打印、溶胶-凝胶等技术<sup>[29-32]</sup>都已经达到了很高的水平。其中, El Hamzaoui 等<sup>[29]</sup>在 2012 年提出的溶胶-凝胶方法可以制造任何一种 PCF 结构,可以实现自由地调整空气孔间距、尺寸和形状,因此被广泛应用。包含相似尺寸

的圆形空气孔<sup>[30]</sup>、椭圆形空气孔<sup>[31]</sup>和矩形空气孔<sup>[32]</sup>的 PCF 都已有制作实例,对于开环结构的制作已有多种方法被提出<sup>[33-37]</sup>,镀金属膜的方法也已较为常见<sup>[38-39]</sup>,故可以选择多种方法制备本文所设计的传感器。在进行所提 PCF-SPR 传感器的光纤结构制备时,首先通过堆积-拉制法或溶胶-凝胶法制备光纤及其空气孔结构。然后,采用侧边轮式磨抛技术完成 D 型结构的制备<sup>[38]</sup>,利用该方法可实现对光纤剩余厚度的控制,制造的器件尺寸小,可实现批量生产。接着,通过飞秒激光

微加工<sup>[33]</sup>、聚焦离子束铣削<sup>[34-35]</sup>或 PCF 原有边孔的化学蚀刻<sup>[36-37]</sup>的方式来完成开环结构的制作,实现纤芯中传输光消逝波场的“泄漏窗口”的制作。最后,利用气相沉积法<sup>[39]</sup>或磁控溅射法<sup>[38]</sup>来镀金薄膜,气相沉积法是目前镀金属薄膜的常用技术,而磁控溅射法可以提高镀膜的均匀性。

然而,在光纤拉制过程中,开环半径 $r_c$ 、D 型结构与纤芯的距离 $h$ 和金膜厚度 $t$ 不可避免地会有 1%~2% 的误差<sup>[40]</sup>。经过数值分析,本文在考虑制作误差时对该 PCF-SPR 传感器的光谱灵敏度的影响进行了分析,分析结果如图 13 所示。可以发现,该传感器在±2% 的制造误差范围内,虽然共振波长受误差影响略有漂移,但是整体的变化趋势不变,即对波长灵敏度的影响较小,可见该传感器的传感性能稳定,容差性能较好。因此,在拉制过程中产生的误差对本文设计的传感器的性能影响较小,这大大降低了对制造精度的要求,提高了制造的可行性。

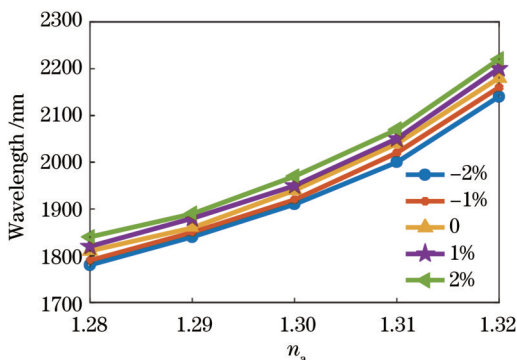


图 13 制造误差的影响

Fig. 13 Influence of manufacturing error

## 6 结 论

设计了一种适用于低折射率传感范围的高灵敏度 D 型 PCF-SPR 传感器,该传感器结构中包括两层呈六边形排列、交错分布的空气孔,纤芯右侧的开环通道中镀有金薄膜,结构简单、易于制造。采用有限元法系统地研究了结构参数对该传感器的灵敏度的影响,并对结构参数进行优化得到了最优结构。结果表明,该 PCF-SPR 传感器最优结构的折射率传感范围为 1.28~1.32,波长灵敏度范围为 3916.2~15346.0 nm/RIU,且在折射率为 1.32 时获得高达 15346 nm/RIU 的最大波长灵敏度,相应的最小分辨率可达到  $6.52 \times 10^{-9}$  RIU。与现有研究相比,在同一折射率测量范围内,该 PCF-SPR 传感器的波长灵敏度是已有的典型 PCF-SPR 传感器的 1.28~6.67 倍,分辨率仅为 153/1000~783/1000。较高的波长灵敏度使所提传感器在医用氧气、液态二氧化碳、含氟有机物和卤代醚等化学医疗用品的传感中具有较好的应用前景。

### 参 考 文 献

[1] Homola J, Yee S S, Gauglitz G. Surface plasmon

resonance sensors: review[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1999, 54(1/2): 3-15.

[2] 马金英,刘铁根,江俊峰,等. 光纤表面等离子体共振传感灵敏度提高研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(19): 1906002.

Ma J Y, Liu T G, Jiang J F, et al. Progress in sensitivity enhancement for optical fibre surface plasmon resonance sensing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(19): 1906002.

[3] 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): 0804003.

Chen Q H, Han W Y, Kong X Y, et al. Detection of solution refractive index variation based on optical fiber surface plasmon resonance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0804003.

[4] Klantsataya E, Jia P P, Ebendorff-Heidepriem H, et al. Plasmonic fiber optic refractometric sensors: from conventional architectures to recent design trends[J]. *Sensors*, 2016, 17(1): 12.

[5] Zhao Y, Lei M, Liu S X, et al. Smart hydrogel-based optical fiber SPR sensor for pH measurements[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 261: 226-232.

[6] Gandhi M S A, Chu S D, Senthilnathan K, et al. Recent advances in plasmonic sensor-based fiber optic probes for biological applications[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(5): 949.

[7] Yasli A, Ademgil H. Geometrical comparison of photonic crystal fiber-based surface plasmon resonance sensors[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(3): 030801.

[8] Skorobogatiy M A, Kabashin A. Plasmon excitation by the Gaussian-like core mode of a photonic crystal waveguide[J]. *Optics Express*, 2006, 14(18): 8419-8424.

[9] Wang J S, Pei L, Wang J, et al. Surface plasmon resonance sensor for low refractive index detection based on microstructured fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(11): 3104-3110.

[10] Haque E, Hossain M A, Namihira Y, et al. Microchannel-based plasmonic refractive index sensor for low refractive index detection[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(6): 1547-1554.

[11] 陈欣. 基于 SPR 和 SBS 效应的 PCF 结构设计与特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019: 15-26.

Chen X. Structure design and characteristics research of photonic crystal fibers based on SPR and SBS effect[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019: 15-26.

[12] Han H X, Hou D L, Zhao L, et al. A large detection-range plasmonic sensor based on an H-shaped photonic crystal fiber[J]. *Sensors*, 2020, 20(4): 1009.

[13] Gauvreau B, Hassani A, Fehri M F, et al. Photonic bandgap fiber-based surface plasmon resonance sensors[J]. *Optics Express*, 2007, 15(18): 11413-11426.

[14] Napiorkowski M, Urbanczyk W. Surface plasmon resonance effect in helical core fibers[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(8): 085001.

[15] 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): 1206001.
- Xiao G L, Zhang K F, Yang H Y, 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): 1206001.
- [16] 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.
- [17] An G W, Hao X P, Li S G, et al. D-shaped photonic crystal fiber refractive index sensor based on surface plasmon resonance[J]. Applied Optics, 2017, 56(24): 6988-6992.
- [18] 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): 6800709.
- [19] Yang Z, Xia L, Li C, et al. A surface plasmon resonance sensor based on concave-shaped photonic crystal fiber for low refractive index detection[J]. Optics Communications, 2019, 430: 195-203.
- [20] Paul A K, Habib M S, Hai N H, et al. An air-core photonic crystal fiber based plasmonic sensor for high refractive index sensing[J]. Optics Communications, 2020, 464: 125556.
- [21] 刘保林. 基于填充复合纳米材料的光子晶体光纤传感器的研究[D]. 天津: 天津大学, 2018: 19-23.
- Liu B L. Research on the photonic-crystal-fiber-based sensor filled with nano-composite materials[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018: 19-23.
- [22] 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.
- Hao D, Wang J S, Xie Y H, 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.
- [23] Hassani A, Skorobogatiy M. Design of the microstructured optical fiber-based surface plasmon resonance sensors with enhanced microfluidics[J]. Optics Express, 2006, 14(24): 11616-11621.
- [24] Liu C, Yang L, Liu Q, et al. Analysis of a surface plasmon resonance probe based on photonic crystal fibers for low refractive index detection[J]. Plasmonics, 2018, 13(3): 779-784.
- [25] Wang G Y, Lu Y, Duan L C, et al. A refractive index sensor based on PCF with ultra-wide detection range[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 27(4): 5600108.
- [26] Wang J S, Pei L, Wu L Y, et al. A polarization-independent SPR sensor based on photonic crystal fiber for low RI detection[J]. Plasmonics, 2020, 15(2): 327-333.
- [27] Qiu S, Yuan J H, Zhou X, et al. Hollow-core negative curvature fiber with high birefringence for low refractive index sensing based on surface plasmon resonance effect [J]. Sensors, 2020, 20(22): 6539.
- [28] Liu C, Wang J W, Wang F M, et al. Surface plasmon resonance (SPR) infrared sensor based on D-shape photonic crystal fibers with ITO coatings[J]. Optics Communications, 2020, 464: 125496.
- [29] El Hamzaoui H, Ouerdane Y, Bigot L, et al. Sol-gel derived ionic copper-doped microstructured optical fiber: a potential selective ultraviolet radiation dosimeter[J]. Optics Express, 2012, 20(28): 29751-29760.
- [30] Vienne G, Xu Y, Jakobsen C, et al. Ultra-large bandwidth hollow-core guiding in all-silica Bragg fibers with nano-supports[J]. Optics Express, 2004, 12(15): 3500-3508.
- [31] Issa N A, van Eijkelenborg M A, Fellow M, et al. Fabrication and study of microstructured optical fibers with elliptical holes[J]. Optics Letters, 2004, 29(12): 1336-1338.
- [32] Baek J H, Song D S, Hwang I K, et al. Transverse mode control by etch-depth tuning in 1120-nm GaInAs/GaAs photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Optics Express, 2004, 12(5): 859-867.
- [33] van Brakel A, Grivas C, Petrovich M N, et al. Microchannels machined in microstructured optical fibers by femtosecond laser[J]. Optics Express, 2007, 15(14): 8731-8736.
- [34] Wang F, Yuan W, Hansen O, et al. Selective filling of photonic crystal fibers using focused ion beam milled microchannels[J]. Optics Express, 2011, 19(18): 17585-17590.
- [35] Martelli C, Olivero P, Canning J, et al. Micromachining structured optical fibers using focused ion beam milling [J]. Optics Letters, 2007, 32(11): 1575-1577.
- [36] Frazão O, Martynkien T, Baptista J M, et al. Optical refractometer based on a birefringent Bragg grating written in an H-shaped fiber[J]. Optics Letters, 2008, 34(1): 76-78.
- [37] Erdmanis M, Viegas D, Hautakorpi M, et al. Comprehensive numerical analysis of a surface-plasmon-resonance sensor based on an H-shaped optical fiber[J]. Optics Express, 2011, 19(15): 13980-13988.
- [38] 陈小龙, 罗云瀚, 徐梦云, 等. 基于侧边抛磨光纤表面等离子体共振的折射率和温度传感研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 020605.
- Chen X L, Luo Y H, Xu M Y, et al. Refractive index and temperature sensing based on surface plasmon resonance fabricated on a side-polished fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 020605.
- [39] Boehm J, François A, Ebendorff-Heidepriem H, et al. Chemical deposition of silver for the fabrication of surface plasmon microstructured optical fibre sensors[J]. Plasmonics, 2011, 6(1): 133-136.
- [40] Sun C Y, Wang W C, Jia H Z. A squeezed photonic crystal fiber for residual dispersion compensation with high birefringence over S+C+L+U wavelength bands [J]. Optics Communications, 2020, 458: 124757.