

基于Ag-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>双侧抛磨U型PCF-SPR折射率传感器

张玉,田贺,卢敏,钟普凡,何晏,习述宇,唐剑\*

(广西师范大学物理科学与技术学院,广西桂林541004)

**摘要:**为解决现有光子晶体光纤表面等离子体共振传感器制备复杂、检测范围受限的问题,设计一种基于Ag-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>双侧抛磨U型光子晶体光纤表面等离子体共振(PCF-SPR)折射率传感器。该传感器通过常规抛磨工艺构建U型槽,槽内依次涂覆纳米Ag层与Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>保护层以增强纤芯模式与等离子体模式耦合,采用有限元法进行数值仿真优化。仿真结果表明:当折射率检测范围为1.16~1.36时,最大波长灵敏度达25 500 nm/RIU,振幅灵敏度达736.86 RIU<sup>-1</sup>,理论分辨率达3.92 × 10<sup>-6</sup> RIU。

**关键词:**光子晶体光纤;表面等离子体共振;波长灵敏度;振幅灵敏度;折射率传感器

**中图分类号:**TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)02-0018-08

**DOI:**10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.02.004

Ag-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-based double-sided polished U-shaped PCF-SPR refractive index sensor

ZHANG Yu, TIAN He, LU Min, ZHONG Pufan, HE Yan, XI Shuyu, TANG Jian\*

(School of Physics Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi 541004, China)

**Abstract:** To address the issues of complex fabrication and limited detection range in existing photonic crystal fiber surface plasmon resonance sensors, a refractive index sensor based on an Ag-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> double-sided polished U-shaped photonic crystal fiber surface plasmon resonance(PCF-SPR) is designed. The sensor constructs a U-shaped groove through a conventional polishing process, with a nano-Ag layer and a Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> protective layer sequentially coated inside the groove to enhance the coupling between the core mode and the plasmon mode. Numerical simulation optimization is performed using the finite element method. Simulation results show that when the refractive index detection range is 1.16~1.36, the maximum wavelength sensitivity reaches 25,500 nm/RIU, the amplitude sensitivity reaches 736.86 RIU<sup>-1</sup>, and the theoretical resolution reaches 3.92 × 10<sup>-6</sup> RIU.

**Key words:** photonic crystal fiber, surface plasmon resonance, wavelength sensitivity, amplitude sensitivity, refractive index sensor

## 0 引言

近年来,光子晶体光纤表面等离子体共振(PCF-SPR)传感器因其高灵敏度、抗电磁干扰等优异特性,在折射率检测领域得到了广泛研究与深入发展<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期:2025-01-03。

**基金项目:**国家自然科学基金项目(62265002)资助;广西自然科学基金粤桂联合重点项目(2022GXNSFDA080006)资助;广西师范大学教育教学改革项目(2024JGB31)资助。

**作者简介:**张玉(1998—),女,硕士研究生,现就读于广西师范大学物理科学与技术学院物理学专业,主要研究方向为基于表面等离子体共振光子晶体光纤传感器。

**\*通信作者:**唐剑(1984—),男,博士,副教授,主要研究方向为光纤传感技术、激光微纳加工等。



研究人员设计了多种结构以提升传感性能,但不同方案在制备工艺与性能表现上各有优劣。2017年, Li Duanming 等人<sup>[3]</sup>通过在PCF内部大空气孔涂覆Au-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>实现了双通道高灵敏度传感,最大波长灵敏度达9 180 nm/RIU,然而内部纳米级金属层的镀覆操作难度大,厚度均匀性难以精确控制。为增强模式耦合,2021年 Kiroriwal M 等人<sup>[4]</sup>提出了偏心结构传感器,虽在折射率为1.36~1.40时实现了8 000 nm/RIU的灵敏度,但传输损耗大。2023年, Hoque A M T 等人<sup>[5]</sup>设计的单侧U型槽结构虽减小了损耗,但其深槽靠近纤芯,对制作工艺要求极高,且工作波长范围较窄。鉴于内部镀膜与复杂结构的制备难题,基于光纤抛磨的D型PCF-SPR传感器逐渐成为研究焦点<sup>[6-8]</sup>。2024年, Li Mingqi 等人<sup>[9]</sup>提出的单侧抛磨D型传感器需精确沉积

金光栅,技术难度大且不易清洗;同年,Sardar M R等人<sup>[10]</sup>提出的双侧抛磨结构虽灵敏度尚可,但因空气孔数量少导致传输损耗过大,且矩形气孔制备工艺复杂;Luo Biyun等人<sup>[11]</sup>提出的双通道椭圆U型槽结构则依赖高精密设备二次加工,成本高昂。综上所述,现有PCF-SPR传感器普遍存在制备工艺复杂、成本高、传输损耗大或检测范围受限等问题,难以兼顾高灵敏度与工程实用性。

针对上述研究现状与存在的不足,本文提出一种基于Ag-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>双侧抛磨U型PCF-SPR折射率传感器,以便降低成本,提高灵敏度。

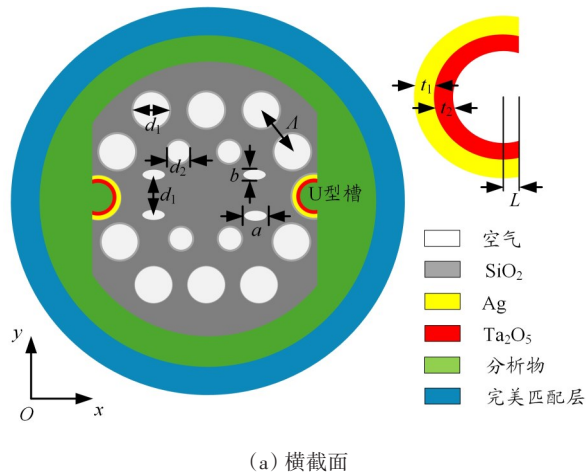
### 1 结构设计及基本理论

与其他制备工艺不同,本文提出的方法无需精密设备辅助二次加工,仅利用操作简便的光纤抛磨机对所设计的PCF进行双侧抛磨,即可构建出U型槽<sup>[12]</sup>。随后,通过在槽内涂覆等离子体材料,增强纤芯模式与表面等离子体模式之间的能量耦合。鉴于Ag具有低成本和高共振吸收系数的优势,且相较于常用的Au能形成更尖锐的损耗峰,本文选用Ag作为表面等离子体材料。为克服Ag易氧化的缺陷,在其表面涂覆一层兼具优异热稳定性<sup>[13]</sup>和高化学稳定性<sup>[14-15]</sup>的Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,以保护Ag膜并进一步提升传感器的灵敏度<sup>[9]</sup>。

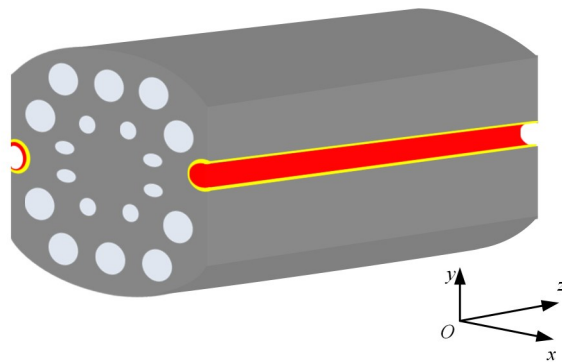
图1为本文设计的基于Ag-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>双侧抛磨U型PCF-SPR折射率传感器的横截面及三维结构示意图。该光子晶体光纤(PCF)由2层气孔构成:外层为正六边形排布的大空气孔(直径为 $d_1$ ,孔间距为 $\Lambda$ );内层靠近纤芯处分布有4个圆形小空气孔(直径为 $d_2$ )和4个椭圆孔(长轴长 $a=d_2$ ,短轴长 $b=d_2/2$ )。这种结构设计使得外层大空气孔周围的平均折射率低于纤芯区域,从而将光能量有效限制在纤芯中传输,降低传输损耗。此外,为增强纤芯模式与外界等离子体模式的能量交换以更有效地激发SPR效应,沿光纤横向设置了4个椭圆孔(纵向间距为 $d_1$ )作为有效的泄漏通道。通过将最外层大空气孔沿 $x$ 轴方向进行双侧抛磨形成U型槽,定义抛磨面至该空气孔中心的水平距离为 $L$ 。U型槽内壁依次涂覆厚度为 $t_1$ 的Ag层和厚度为 $t_2$ 的Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>保护层。在利用有限元法进行数值分析时,模型外侧设置完美匹配层(PML)并施加散射边界条件,以消除边界反射对计算结果的影响。

本文采用传感器的波长灵敏度 $W_s$ 来评估其折射率检测能力<sup>[16]</sup>,定义如式(1)所示。

$$W_s = \lambda_{\text{peak}} / \partial n_a \quad (1)$$



(a) 横截面



(b) 三维结构

图1 PCF-SPR传感器的结构图

式中: $\lambda_{\text{peak}}$ 为对应的共振波长偏移量, $\partial n_a$ 为分析物折射率的变化量。

传感器的振幅灵敏度 $A_s$ <sup>[17]</sup>如式(2)所示。

$$A_s = -\frac{1}{\alpha(\lambda, n)} \frac{\Delta\alpha(\lambda, n)}{\partial n_a} \quad (2)$$

式中: $\alpha(\lambda, n)$ 表示给定的折射率为 $n$ 的分析物的损耗, $\Delta\alpha(\lambda, n)$ 是2个损耗谱的差。

根据式(2)定义,计算得到的振幅灵敏度为负值,其符号仅表示损耗随折射率变化的方向。为直观表征传感器对折射率变化的敏感程度,下文所引振幅灵敏度数值均取其绝对值。

传感器的分辨率 $R$ <sup>[33]</sup>如式(3)所示。

$$R = \frac{\Delta\lambda_{\text{min}}}{W_s} \quad (3)$$

式中: $\Delta\lambda_{\text{min}}$ 表示最小光谱分辨率,本文设置为0.1 nm。

此外,半峰全宽(FWHM)定义为共振损耗峰值半高处对应的波长跨度。较窄的FWHM有助于提高传感器的分辨率与检测精度,是评价损耗谱特性及传感器综合性能的重要指标之一。

本文采用有限元法分析了模式有效折射率与波

张玉,田贺,卢敏,等:基于Ag-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>双侧抛磨U型PCF-SPR折射率传感器

长关系,结果如图2所示。可以看出, $x$ 偏振模式下存在显著的损耗峰,而 $y$ 偏振模式下几乎无损耗峰形成,因此,本文后续研究仅采用 $x$ 偏振下的损耗谱进行分析。纤芯模式与表面等离子体模式的有效折射率在波长 $1.4\ \mu\text{m}$ 附近相交,此时损耗在共振波长处达到峰值(在相位匹配条件下,光能量从纤芯最大程度地耦合至包层等离子体模式),最大损耗可达 $155.42\ \text{dB/cm}$ 。

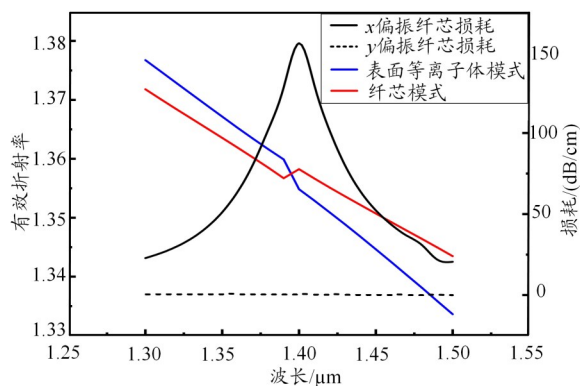


图2 模式有效折射率和波长关系图

## 2 结构参数优化

传感器性能受PCF结构参数的显著影响,其根本原因在于结构参数的变化会直接改变纤芯模式的色散特性,进而影响纤芯模式与表面等离子体模式之间的相位匹配条件,最终决定传感器的灵敏度。基于“结构优化先行、性能验证随后”的研究思路,本文采用波长询问法与振幅询问法相结合的策略<sup>[9]</sup>,系统研究了PCF关键结构参数变化对传感器性能的影响规律。

### 2.1 气孔间距 $\Lambda$ 的优化分析

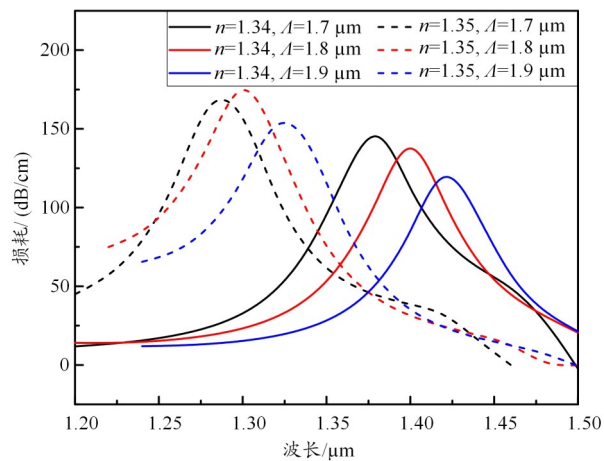
固定其他结构参数( $d_1=1.4\ \mu\text{m}$ ,  $d_2=0.9\ \mu\text{m}$ ,  $t_1=30\ \text{nm}$ ,  $t_2=20\ \text{nm}$ ,  $L=0.2\ \mu\text{m}$ ),当分析物折射率从 $1.34$ 变化至 $1.35$ 时,不同气孔间距 $\Lambda$ 下的纤芯模式损耗谱如图3(a)所示。可以看出,当 $\Lambda$ 变化时,共振波长随折射率变化的偏移情况如下:

$\Lambda=1.7\ \mu\text{m}$ 时,共振波长从 $1.380\ \mu\text{m}$ 移至 $1.290\ \mu\text{m}$ ;

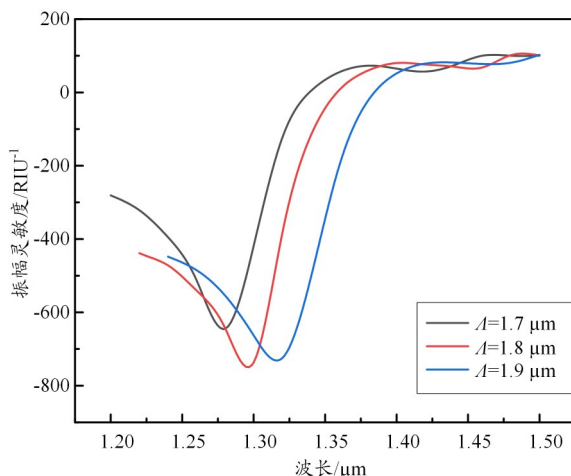
$\Lambda=1.8\ \mu\text{m}$ 时,共振波长从 $1.400\ \mu\text{m}$ 移至 $1.300\ \mu\text{m}$ ;

$\Lambda=1.9\ \mu\text{m}$ 时,共振波长从 $1.425\ \mu\text{m}$ 移至 $1.330\ \mu\text{m}$ 。

上述结果表明,气孔间距 $\Lambda$ 会显著影响纤芯模式与表面等离子体模式之间的耦合强度与相位匹配波长。通过计算可得,3种 $\Lambda$ 取值对应的波长灵敏度分别为 $9\ 000$ 、 $10\ 000$ 、 $9\ 500\ \text{nm/RIU}$ 。同时,图3(b)为气孔间距 $\Lambda$ 变化时的振幅灵敏度曲线,对应值分别为 $644.66$ 、 $736.86$ 、 $719.05\ \text{RIU}^{-1}$ 。



(a) 当 $n=1.34$ 和 $1.35$ 时, $\Lambda$ 变化的损耗曲线



(b) 当 $n=1.35$ 时, $\Lambda$ 变化的振幅灵敏度曲线

图3 气孔间距 $\Lambda$ 变化的损耗与振幅灵敏度曲线

综合考虑波长灵敏度与振幅灵敏度的优化目标,当 $\Lambda=1.8\ \mu\text{m}$ 时2项指标均达到最优(波长灵敏度为 $10\ 000\ \text{nm/RIU}$ ,振幅灵敏度为 $736.86\ \text{RIU}^{-1}$ )。因此,本文后续研究将气孔间距 $\Lambda$ 优化设定为 $1.8\ \mu\text{m}$ 。

### 2.2 圆孔直径 $d_1$ 与 $d_2$ 的优化分析

气孔尺寸是调控光纤光学特性的关键参数:尺寸过小会增加模式泄漏损耗,尺寸过大则会削弱纤芯模式与表面等离子体模式之间的倏逝场耦合效率。

#### 2.2.1 大圆孔直径 $d_1$ 的优化

大圆孔的主要功能是约束光能量在纤芯区域传输,抑制包层泄漏损耗。固定其他结构参数( $\Lambda=1.8\ \mu\text{m}$ ,  $d_2=0.9\ \mu\text{m}$ ,  $t_1=30\ \text{nm}$ ,  $t_2=20\ \text{nm}$ ,  $L=0.2\ \mu\text{m}$ ),当分析物折射率从 $1.34$ 变化至 $1.35$ 时,不同大圆孔直径 $d_1$ 对应的纤芯模式损耗谱如图4(a)所示。可以看出,当 $d_1$ 变化时,共振波长随折射率变化的偏移情况如下:

$d_1=1.35\ \mu\text{m}$ 时,共振波长从 $1.395\ \mu\text{m}$ 移至 $1.290\ \mu\text{m}$ ;

$d_1=1.40\ \mu\text{m}$ 时,共振波长从 $1.400\ \mu\text{m}$ 移至 $1.300\ \mu\text{m}$ ;  
 $d_1=1.45\ \mu\text{m}$ 时,共振波长从 $1.410\ \mu\text{m}$ 移至 $1.320\ \mu\text{m}$ 。

计算可得,上述3种 $d_1$ 取值对应的波长灵敏度分别为 $10\ 500$ 、 $10\ 000$ 、 $9\ 000\ \text{nm}/\text{RIU}$ 。图4(b)为 $d_1$ 分别为 $1.35$ 、 $1.40$ 、 $1.45\ \mu\text{m}$ 时的振幅灵敏度曲线,其对应的振幅灵敏度分别为 $674.78$ 、 $736.86$ 、 $703.49\ \text{RIU}^{-1}$ 。

当 $d_1=1.35\ \mu\text{m}$ 、折射率 $n=1.35$ 时,由于共振峰的FWHM显著增大,导致谱峰展宽、分辨率下降。综合考虑波长灵敏度、振幅灵敏度与光谱分辨率的权衡关系,本文将大圆孔直径 $d_1$ 优化设定为 $1.40\ \mu\text{m}$ 。

### 2.2.2 小圆孔直径 $d_2$ 的优化

小圆孔的主要作用是增强纤芯对光能量的局域约束能力。固定其他参数( $\Lambda=1.8\ \mu\text{m}$ ,  $d_1=1.4\ \mu\text{m}$ ,  $t_1=30\ \text{nm}$ ,  $t_2=20\ \text{nm}$ ,  $L=0.2\ \mu\text{m}$ ),当分析物折射率从 $1.34$ 变化至 $1.35$ 时,不同小圆孔直径 $d_2$ 对应的纤芯模式损耗谱如图5(a)所示。可以看出,当 $d_2$ 变化时,共振波

长随折射率变化的偏移情况及对应波长灵敏度(经计算)如下:

$d_2=0.7\ \mu\text{m}$ 时,共振波长从 $1.460\ \mu\text{m}$ 移至 $1.380\ \mu\text{m}$ ,  
 波长灵敏度为 $8000\ \text{nm}/\text{RIU}$ ;

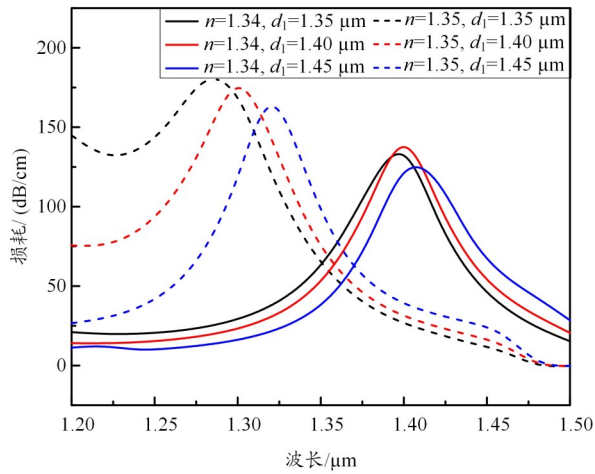
$d_2=0.9\ \mu\text{m}$ 时,共振波长从 $1.400\ \mu\text{m}$ 移至 $1.300\ \mu\text{m}$ ,  
 波长灵敏度为 $10\ 000\ \text{nm}/\text{RIU}$ ;

$d_2=1.1\ \mu\text{m}$ 时,共振波长从 $1.330\ \mu\text{m}$ 移至 $1.225\ \mu\text{m}$ ,  
 波长灵敏度为 $9\ 500\ \text{nm}/\text{RIU}$ 。

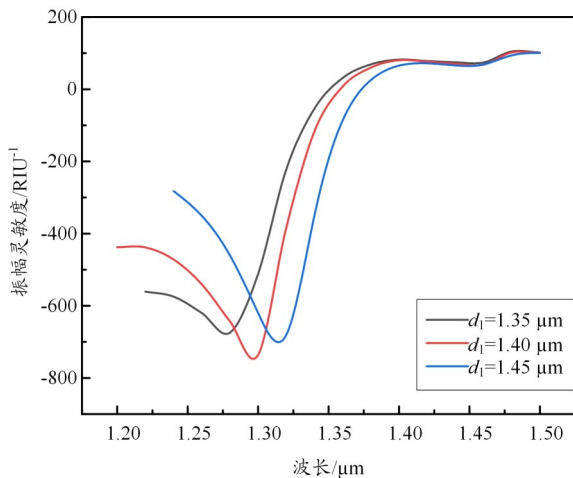
图5(b)为 $d_2$ 分别为 $0.7$ 、 $0.9$ 、 $1.1\ \mu\text{m}$ 时的振幅灵敏度曲线,其对应振幅灵敏度分别为 $351.07$ 、 $736.86$ 、 $14.98\ \text{RIU}^{-1}$ 。对比可知,当 $d_2=0.9\ \mu\text{m}$ 时,波长灵敏度与振幅灵敏度均达到最大值。因此,本文将小圆孔直径 $d_2$ 优化设定为 $0.90\ \mu\text{m}$ 。

### 2.3 抛磨深度参数 $L$ 的优化分析

对PCF结构进行双侧抛磨可有效减小待测分析物与纤芯倏逝场的相互作用距离,从而增强纤芯模式

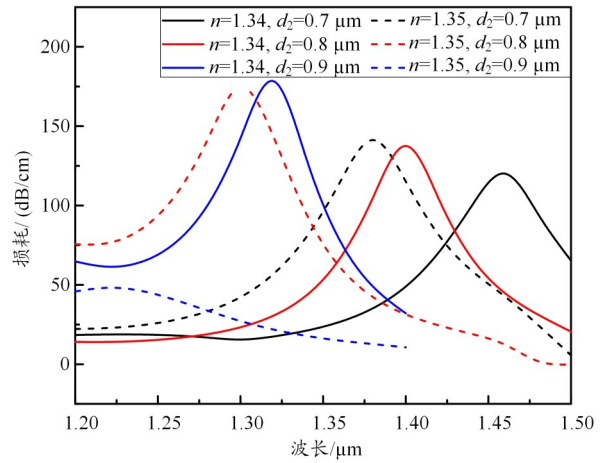


(a) 当 $n=1.34$ 和 $1.35$ 时, $d_1$ 变化的损耗曲线

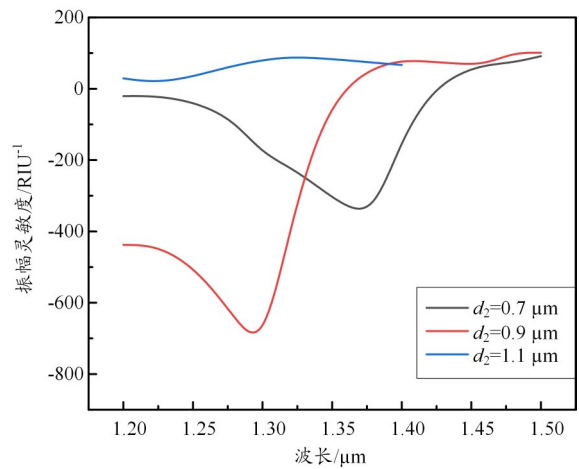


(b) 当 $n=1.35$ 时, $d_1$ 变化的振幅灵敏度曲线

图4 大空气孔直径 $d_1$ 变化的损耗与振幅灵敏度曲线



(a) 当 $n=1.34$ 和 $1.35$ 时, $d_2$ 变化的损耗曲线



(b) 当 $n=1.35$ 时, $d_2$ 变化的振幅灵敏度曲线

图5 小空气孔直径 $d_2$ 变化的损耗与振幅灵敏度曲线

张玉,田贺,卢敏,等:基于Ag-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>双侧抛磨U型PCF-SPR折射率传感器

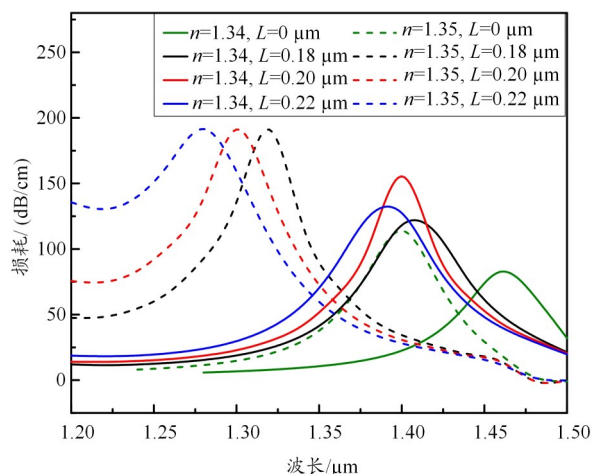
与表面等离子体模式之间的能量耦合效率。抛磨面与外层大空气孔中心之间的水平距离 $L$ 表征了抛磨深度: $L$ 值越小,抛磨深度越大,纤芯-分析物间距越近。

固定其他结构参数( $\Lambda=1.8\ \mu\text{m}$ ,  $d_1=1.4\ \mu\text{m}$ ,  $d_2=0.9\ \mu\text{m}$ ,  $t_1=30\ \text{nm}$ ,  $t_2=20\ \text{nm}$ ),当分析物折射率从1.34变化至1.35时,不同抛磨深度 $L$ 对应的纤芯模式损耗谱如图6(a)所示。可以看出,当 $L$ 变化时,共振波长随折射率变化的偏移情况及对应波长灵敏度(经计算)如下:

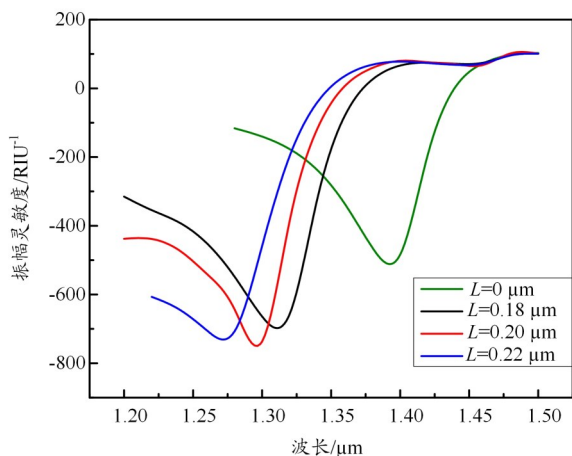
$L=0\ \mu\text{m}$ 时,共振波长从1.465  $\mu\text{m}$ 移至1.400  $\mu\text{m}$ ,波长灵敏度为6 500 nm/RIU;

$L=0.18\ \mu\text{m}$ 时,共振波长从1.410  $\mu\text{m}$ 移至1.320  $\mu\text{m}$ ,波长灵敏度为9 000 nm/RIU;

$L=0.20\ \mu\text{m}$ 时,共振波长从1.400  $\mu\text{m}$ 移至1.300  $\mu\text{m}$ ,波长灵敏度为10 000 nm/RIU;



(a) 当 $n=1.34$ 和 $1.35$ 时, $L$ 变化的损耗曲线



(b) 当 $n=1.35$ 时, $L$ 变化的振幅灵敏度曲线

图6 抛磨面与外层空气孔中心之间的水平距离 $L$ 变化的损耗与振幅灵敏度曲线

$L=0.22\ \mu\text{m}$ 时,共振波长从1.390  $\mu\text{m}$ 移至1.285  $\mu\text{m}$ ,波长灵敏度为10 500 nm/RIU。

结果表明,波长灵敏度随 $L$ 增大(抛磨深度减小)而单调提升。图6(b)为 $L$ 变化时的振幅灵敏度曲线,其对应的振幅灵敏度分别为509.11、701.63、736.86、721.72 RIU<sup>-1</sup>,呈先增后减的非单调变化趋势。

当 $L$ 从0.18  $\mu\text{m}$ 减小至0  $\mu\text{m}$ (抛磨深度过大)时,波长灵敏度与振幅灵敏度均显著下降。这主要由于过度抛磨会破坏纤芯波导结构,导致模式泄漏损耗急剧增加,削弱了纤芯模式与表面等离子体模式的有效耦合。综合考虑波长灵敏度、振幅灵敏度与光谱分辨率的权衡关系,本文将抛磨深度参数 $L$ 优化设定为0.20  $\mu\text{m}$ 。

### 2.4 Ag层厚度 $t_1$ 的优化分析

Ag作为表面等离子体激发材料,其薄膜厚度对PCF-SPR传感器的性能具有决定性影响:若Ag层过薄,表面自由电子密度不足,将难以有效激发表面等离子体共振效应;若Ag层过厚,入射光子难以穿透金属层与介质界面耦合,导致倏逝场能量传输效率降低,从而削弱传感响应。

固定其他结构参数( $\Lambda=1.8\ \mu\text{m}$ ,  $d_1=1.4\ \mu\text{m}$ ,  $d_2=0.9\ \mu\text{m}$ ,  $t_2=20\ \text{nm}$ ,  $L=0.2\ \mu\text{m}$ ),当分析物折射率从1.34变化至1.35时,不同Ag层厚度 $t_1$ 对应的纤芯模式损耗谱如图7(a)所示。可以看出,当 $t_1$ 变化时,共振波长随折射率变化的偏移情况及对应波长灵敏度(经计算)如下:

$t_1=25\ \text{nm}$ 时,共振波长从1.435  $\mu\text{m}$ 移至1.365  $\mu\text{m}$ ,波长灵敏度为7 000 nm/RIU;

$t_1=30\ \text{nm}$ 时,共振波长从1.400  $\mu\text{m}$ 移至1.300  $\mu\text{m}$ ,波长灵敏度为10 000 nm/RIU;

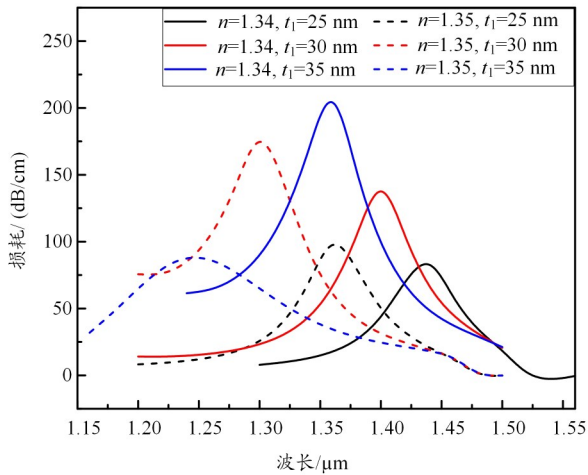
$t_1=35\ \text{nm}$ 时,共振波长从1.360  $\mu\text{m}$ 移至1.245  $\mu\text{m}$ ,波长灵敏度为11 500 nm/RIU。

计算结果表明,波长灵敏度随 $t_1$ 增加而单调提升。图7(b)为 $t_1$ 变化时的振幅灵敏度曲线,其对应的振幅灵敏度分别为541.79、736.86、44.98 RIU<sup>-1</sup>,呈显著的非单调变化趋势。

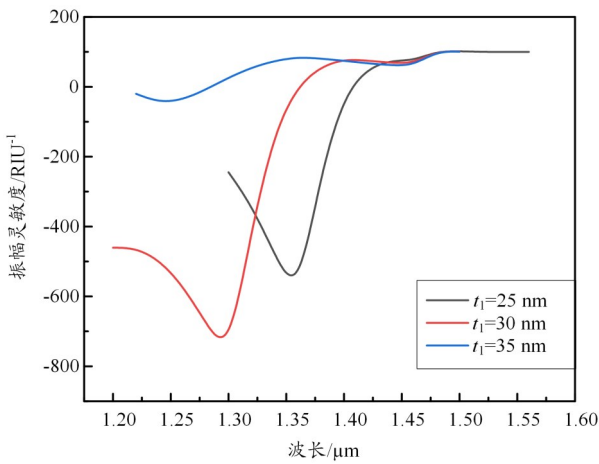
然而,当 $t_1=35\ \text{nm}$ 时,共振峰的FWHM显著增大,导致谱峰展宽、分辨率下降。这主要由于过厚的Ag层会增加欧姆损耗,使表面等离子体波的传播长度缩短,共振峰展宽。综合考虑波长灵敏度、振幅灵敏度与光谱分辨率的权衡关系,本文将Ag层厚度 $t_1$ 优化设定为30 nm。

### 2.5 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>层厚度 $t_2$ 的优化分析

在Ag层表面涂覆Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>的主要目的是防止Ag层



(a) 当 $n=1.34$ 和 $1.35$ 时, $t_1$ 变化的损耗曲线



(b) 当 $n=1.35$ 时, $t_1$ 变化的振幅灵敏度曲线

图7 Ag层厚度 $t_1$ 变化的损耗与振幅灵敏度曲线

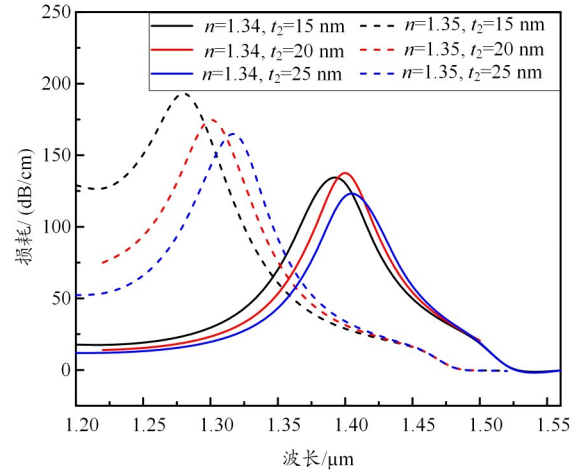
氧化,提升传感器的化学稳定性与使用寿命。然而,保护层厚度并非越厚越好:过厚的介质层会增加倏逝场穿透距离,削弱分析物与表面等离子体共振区域的有效耦合。

固定其他结构参数( $\Lambda=1.8\ \mu\text{m}$ ,  $d_1=1.4\ \mu\text{m}$ ,  $d_2=0.9\ \mu\text{m}$ ,  $t_1=30\ \text{nm}$ ,  $L=0.2\ \mu\text{m}$ ),当分析物折射率从1.34变化至1.35时,不同Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>层厚度 $t_2$ 对应的纤芯模式损耗谱如图8(a)所示。可以看出,当 $t_2$ 变化时,共振波长随折射率1.34变化至1.35的偏移情况及对应波长灵敏度(经计算)如下:

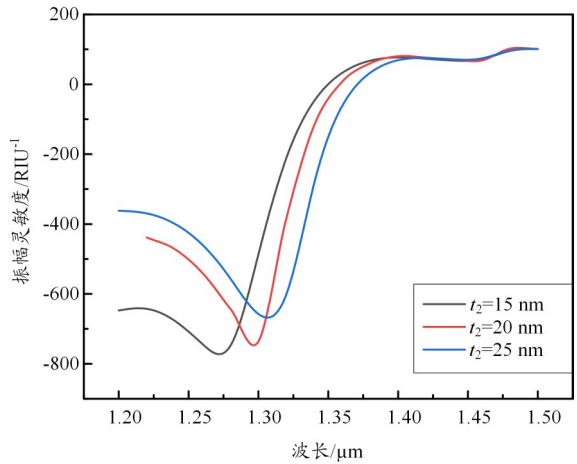
$t_2=15\ \text{nm}$ 时,共振波长从 $1.390\ \mu\text{m}$ 移至 $1.285\ \mu\text{m}$ ,波长灵敏度为 $11\ 500\ \text{nm}/\text{RIU}$ ;

$t_2=20\ \text{nm}$ 时,共振波长从 $1.400\ \mu\text{m}$ 移至 $1.300\ \mu\text{m}$ ,波长灵敏度为 $10\ 000\ \text{nm}/\text{RIU}$ ;

$t_2=25\ \text{nm}$ 时,共振波长从 $1.405\ \mu\text{m}$ 移至 $1.315\ \mu\text{m}$ ,波长灵敏度为 $9\ 000\ \text{nm}/\text{RIU}$ 。



(a) 当 $n=1.34$ 和 $1.35$ 时, $t_2$ 变化的损耗曲线



(b) 当 $n=1.35$ 时, $t_2$ 变化的振幅灵敏度曲线

图8 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>厚度 $t_2$ 变化的损耗与振幅灵敏度曲线

计算结果表明,波长灵敏度随 $t_2$ 增加而单调下降,同时损耗谱的FWHM逐渐增大。这主要由于Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>作为高折射率介质层( $n\approx 2.1$ ),其厚度增加会改变表面等离子体波的倏逝场分布,增大分析物与金属界面的等效距离,从而降低折射率调制效率与共振峰锐度。

图8(b)为 $t_2$ 变化时的振幅灵敏度曲线,其对应的振幅灵敏度分别为 $787.49$ 、 $736.86$ 、 $674.78\ \text{RIU}^{-1}$ ,同样呈单调下降趋势。然而,若 $t_2$ 过小(如 $t_2 < 15\ \text{nm}$ ),则会增加薄膜制备的工艺难度,且难以形成连续致密的保护层,降低抗氧化性能。综合考虑波长灵敏度、振幅灵敏度、光谱分辨率与工艺可行性的权衡关系,本文将Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>保护层厚度 $t_2$ 优化设定为 $20\ \text{nm}$ 。

### 3 性能对比分析

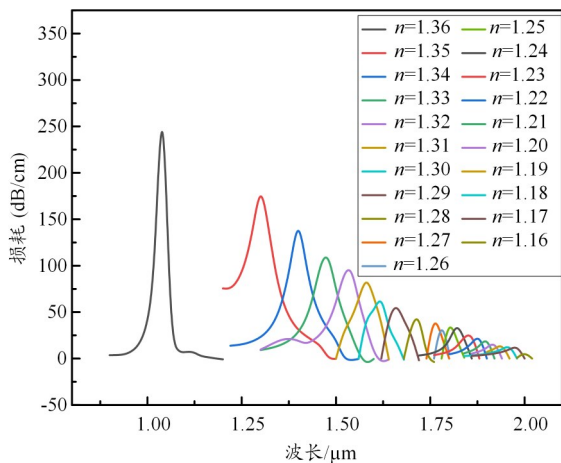
本文对优化后传感器的综合探测性能进行了系统评估,并与近年来报道的其他同类传感器进行对比

张玉,田贺,卢敏,等:基于Ag-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>双侧抛磨U型PCF-SPR折射率传感器

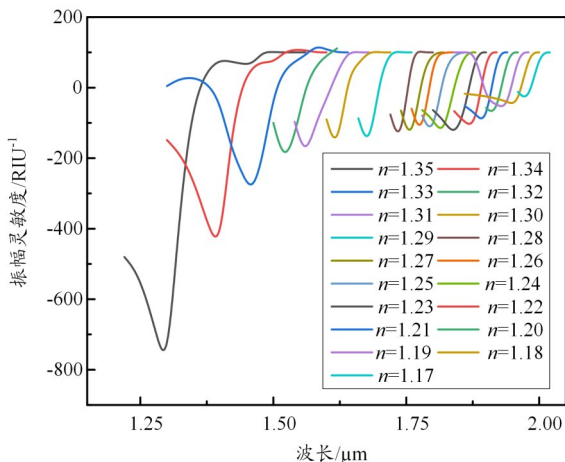
分析。基于优化参数( $\Lambda=1.8\ \mu\text{m}$ ,  $d_1=1.4\ \mu\text{m}$ ,  $d_2=0.9\ \mu\text{m}$ ,  $t_1=30\ \text{nm}$ ,  $t_2=20\ \text{nm}$ ,  $L=0.2\ \mu\text{m}$ ),图9为传感器在不同分析物折射率下的损耗谱响应特性。

由图9(a)可知,该传感器在折射率为1.16~1.36时均呈现明显的共振峰偏移,表明其可有效检测该折射率区间的分析物。随着分析物折射率增大,损耗谱共振峰发生蓝移且峰值损耗升高,符合表面等离子体共振的色散特性。图9(b)为折射率变化时的振幅灵敏度曲线。可以看出,当折射率为1.35时,最大振幅灵敏度可达736.86 RIU<sup>-1</sup>。基于式(1)~式(3)计算可得:当分析物折射率为1.35~1.36时,传感器最大波长灵敏度达25 500 nm/RIU,理论分辨率达3.92×10<sup>-6</sup> RIU。

图10为共振波长与分析物折射率的拟合曲线。本文将折射率划分为1.16~1.23与1.24~1.36这2个区间分别进行拟合:在折射率为1.16~1.23区间,共振波长与折射率呈高度线性关系,线性拟合决定系数 $R^2=0.999\ 9$ ,表明传感器在该区间具有优异的线性响应特

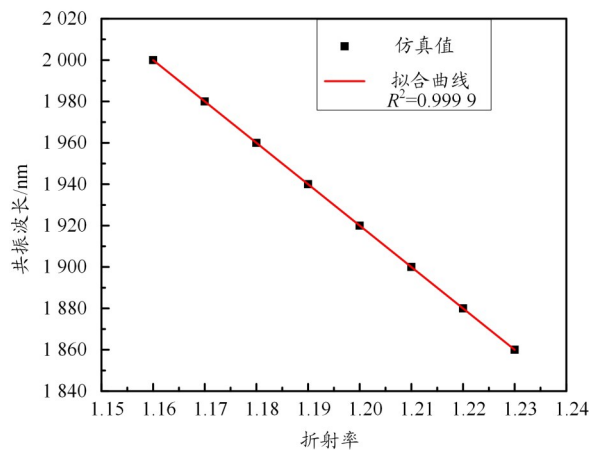


(a) n变化时的损耗谱曲线图

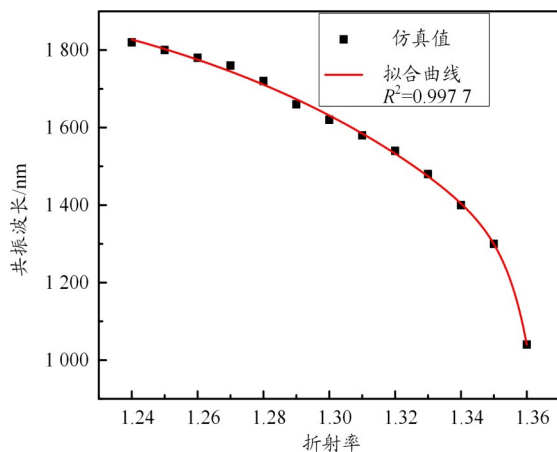


(b) n变化时的振幅灵敏度曲线

图9 传感器的损耗谱与振幅灵敏度曲线



(a) 折射率为1.16~1.23



(b) 折射率为1.24~1.36

图10 待测分析物折射率与损耗谱共振波长的拟合曲线

性;在折射率为1.24~1.36区间,采用对数函数拟合,决定系数 $R^2=0.997\ 7$ 。实际应用中,可根据待测分析物的折射率范围选择相应的拟合模型,实现高精度折射率反演。

表1为本文传感器与近2年报道的其他同类表面等离子体共振传感器的性能对比情况。对比参数包括分析物折射率检测范围、最大波长灵敏度、振幅灵敏度及理论分辨率。结果表明,本文提出的双侧抛磨U型PCF-SPR折射率传感器在保持宽折射率检测范

表1 本文与其他传感器比较

文献	折射率检测范围	最大波长灵敏度/(nm/RIU)	振幅灵敏度/度/RIU <sup>-1</sup>	理论分辨率/RIU
[9]	1.34~1.4	25 000	—	4.0×10 <sup>-6</sup>
[20]	1.25~1.39	22 000	1 209.21	4.55×10 <sup>-6</sup>
[21]	1.26~1.42	7 500	634	—
[5]	1.29~1.40	12 500	1 189	8×10 <sup>-5</sup>
本文	1.16~1.36	25 500	736.86	3.92×10 <sup>-6</sup>

围(1.16~1.36 RIU)的同时,实现了25 500 nm/RIU的超高波长灵敏度,振幅灵敏度可达736.86 RIU<sup>-1</sup>,理论分辨率达3.92×10<sup>-6</sup> RIU,综合性能优于多数同类传感器。

#### 4 结束语

本文提出一种基于Ag-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>双侧抛磨U型PCF-SPR折射率传感器。该传感器的U型槽可通过常规光纤抛磨机双侧抛磨工艺制备,相较于化学蚀刻、飞秒激光加工等其他PCF-SPR传感器微结构制备方法,具有工艺流程简单、设备成本低、可重复性高等优势。

通过对传感器关键结构参数( $\Lambda$ 、 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $L$ )的系统优化,仿真结果表明:在波长为1.04~2.00  $\mu\text{m}$ 、分析物折射率为1.16~1.36 RIU的检测范围内,该传感器可实现25 500 nm/RIU的最大波长灵敏度、736.86 RIU<sup>-1</sup>的最大振幅灵敏度,以及3.92×10<sup>-6</sup> RIU的理论分辨率。

该传感器兼具高灵敏度、宽检测范围与低成本制备优势,在生物分子相互作用分析、化学试剂浓度监测、环境污染物检测等折射率敏感型应用场景中具有广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] Ying Yu, Yan Xiaolin, Shan Dan, et al. A review of recent research progress on optimization in D-shaped photonic crystal fiber[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 169: 110047.
- [2] Gangwar R K, Min Rui, Li Xiaoli, et al. GeO<sub>2</sub> doped optical fiber plasmonic sensor for refractive index detection[J]. Frontiers in Physics, 2021, 9: 707113.
- [3] Li Duanming, Zhang Wei, Liu Huan, et al. High sensitivity refractive index sensor based on multicoating photonic crystal fiber with surface plasmon resonance at near-infrared wavelength[J]. IEEE Photonics, 2017, 9(2): 1-8.
- [4] Kiroriwal M, Singal P. Design and analysis of highly sensitive solid core goldcoated hexagonal photonic crystal fiber sensor based on surface plasmon resonance[J]. Nanophotonics, 2021, 15(2): 026008.
- [5] Hoque A M T, Altabatabaei K F, Ali M E, et al. U-grooved selectively coated and highly sensitive PCF-SPR sensor for broad range analyte RI detection[J]. IEEE Access, 2023, 11: 74486-74499.
- [6] Emranul H, Abdullah A N, Yoshinori N, et al. Highly sensitive D-shaped plasmonic refractive index sensor for a broad range of refractive index detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13: 1-11.
- [7] Liu Qingmin, Dong Jie, Lui Jiayuan, et al. Germanium doped D-

shaped PCF-SPR methane high sensitivity sensor[J]. Physica Scripta, 2024, 99: 115512.

- [8] Fei Yihong, Luo Biyun, An Mengdi, et al. A highly efficient D-shaped dual-core PCF-SPR sensor coated with ITO film for refractive index detection[J]. Plasmonics, 2024, 20(3): 1-15.
- [9] Li Mingqi, Gu Hong, Wu Huan, et al. D-shaped photonic crystal fiber plasmonic sensor based on Au-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> composite micro-grating[J]. Plasmonics, 2024, 20(5): 1-11.
- [10] Sardar M R, Faisal M. Dual-core dual-polished PCF-SPR sensor for cancer cell detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24: 9843-9854.
- [11] Luo Biyun, An Mengdi, Hu Tianqi, et al. Dual-channel surface plasmon sensor based on photonic crystal fiber for low refractive index detection[J]. Optical and Quantum Electronics, 2024, 56: 1059.
- [12] Niu Huiqing, Li Yunchao, Zhang Yanjun, et al. A high-precision D-shaped fiber polishing method and its sensing characteristics of different polishing depths[J]. Plasmonics, 2024, 20(1): 1-9.
- [13] Zhang Junying, Fan Qi, Boyd I W. Growth of tantalum pentoxide film by pulsed laser deposition[J]. Applied Surface Science, 1999, 138: 320-324.
- [14] Majid A, Jabeen A, Khan S U, et al. On the prospects of layeredness in tantalum pentoxide[J]. Materials Science and Engineering, B, 2021, 272: 115349.
- [15] Sun Yingsui, Chang Jeanheng, Huang Herhsiung. Corrosion resistance and biocompatibility of titanium surface coated with amorphous tantalum pentoxide[J]. Thin Solid Films, 2013, 528: 130-135.
- [16] Bright T J, Watjen J I, Muratore C, et al. Infrared optical properties of amorphous and nanocrystalline Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films[J]. Applied Physics, 2013, 114: 083515.
- [17] Haque E, Mahmuda S, Hossain M A, et al. Highly sensitive dual-core PCF based plasmonic refractive index sensor for low refractive index detection[J]. IEEE Photonics, 2019, 11(5): 1-9.
- [18] Rifat A A, Ahmed R, Mahdiraji G A, et al. Highly sensitive D-shaped photonic crystal fiber-based plasmonic biosensor in visible to near-IR[J]. IEEE Sensor, 2017, 17(9): 2776-2783.
- [19] An Guowen, Hao Xiaopeng, Li Shuguang, et al. D-shaped photonic crystal fiber refractive index sensor based on surface plasmon resonance[J]. Applied Optics, 2017, 56(24): 6988-6992.
- [20] Shafkat A, Rashed A N, Alatwi A M, et al. The effects of adding different adhesive layers with a microstructure fiber sensor based on surface plasmon resonance: a numerical study[J]. Plasmonics, 2021, 16: 819-832.
- [21] Tasmiah T, Fairuz A K, Anuva C. Design and analysis of arc-shaped single core photonic crystal fiber sensor based on surface plasmon resonance[J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2024: 101218.