



# 基于 SPR 的可同时检测超宽范围折射率和温度的锚型双通道高阶模式 PCF 传感器设计\*

李新宇<sup>1</sup>, 毛一民<sup>1</sup>, 张兆<sup>1</sup>, 徐晴<sup>1</sup>, 卢翔<sup>2</sup>, 任芳<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083; 2. 贵州电网有限责任公司信息中心, 贵阳 563000)

**摘 要:** 提出一种基于表面等离子体共振 (SPR) 效应的锚形双通道光子晶体光纤 (PCF) 传感器, 用于实现温度与折射率 (RI) 的超宽范围同步检测。该传感器具有非对称锚型横截面结构, 纤芯表面沿正交方向抛光为半圆形, 并选择性镀覆金属金 (Au) 和聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane PDMS) 薄膜, 实现了极化分辨的 SPR 激发机制。该设计可分别激励高阶  $x$  极化与  $y$  极化模式, 形成两个独立通道, 实现多参数同时检测。其中,  $x$  极化通道通过 Au/PDMS 复合膜同时响应 RI 与温度变化,  $y$  极化通道则依靠 Au 膜单独实现 RI 检测。基于 COMSOL Multiphysics 软件对结构参数进行了全面优化, 确保两个通道均具备强耦合强度、良好模式约束及高效高阶模激励能力。仿真结果表明, 所设计的传感器在宽折射率检测范围 1.21~1.44 内表现出 14 500 nm 的最大折射率灵敏度, 在宽温度变化范围 -100 °C 至 100 °C 内实现了最高 4 nm/°C 的温度灵敏度。该传感器结构新颖、灵敏度高、选择性强, 具备在复杂生物和化学环境中开展癌细胞实时检测、生化分析及多参数同步监测等实际应用的广阔前景。

**关键词:** 光子晶体光纤; 表面等离子体共振; 折射率传感器; 温度传感器; 光纤传感

中图分类号: TN253

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202638.250301

## Dual-channel high-order mode PCF sensor based on surface plasmon resonance for refractive index and temperature detection

Li Xinyu<sup>1</sup>, Mao Yimin<sup>1</sup>, Zhang Zhao<sup>1</sup>, Xu Qing<sup>1</sup>, Lu Xiang<sup>2</sup>, Ren Fang<sup>1</sup>

(1. School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Information Center, Guizhou Power Grid Co, Ltd, Guiyang 563000, China)

**Abstract:** [Background] Simultaneous and accurate detection of multiple physical and biochemical parameters, such as refractive index (RI) and temperature, is critically important in complex sensing environments, including biological analysis and cancer cell detection. Photonic crystal fiber sensors based on surface plasmon resonance (PCF-SPR) have attracted considerable attention due to their high sensitivity and compact structure. However, achieving ultra-wide RI detection ranges, effective temperature compensation, and low cross-sensitivity within a single fiber platform remains a significant challenge, particularly when higher-order mode excitation and polarization selectivity are required. [Purpose] The purpose of this study is to propose and numerically investigate a dual-channel PCF-SPR sensor capable of simultaneous RI and temperature sensing over an ultra-wide range, while achieving polarization-resolved mode excitation and reduced cross-interference between sensing channels. [Methods] An anchor-shaped asymmetric photonic crystal fiber with orthogonally polished semi-circular surfaces is designed. Gold (Au) and polydimethylsiloxane (PDMS) thin films are selectively deposited on different polished surfaces to construct two independent SPR sensing channels. Polarization-resolved excitation of high-order modes is achieved through structural asymmetry and selective coating. A full-vector finite-element method based on COMSOL Multiphysics is employed to analyze mode distributions, loss spectra, and resonance wavelength shifts. Key structural parameters, including air-hole geometry and metal-dielectric layer thicknesses, are systematically optimized to enhance plasmonic coupling strength and mode confinement. [Results] Simulation results indicate that the  $x$ -polarized

\* 收稿日期: 2025-09-17; 修订日期: 2025-12-11

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (FRF-TP-19-016A2)

联系方式: 李新宇, lixinyu@ustb.edu.cn.

通信作者: 任芳, renfang@ustb.edu.cn.

channel coated with Au and PDMS exhibits dual sensitivity to RI and temperature, whereas the y-polarized channel coated only with Au responds exclusively to RI variations of another analyte. The proposed sensor achieves an ultra-wide RI detection range from 1.21 to 1.44, with a maximum RI sensitivity of 14 500 nm/RIU. The temperature sensing range spans from  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and a peak temperature sensitivity of  $4\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$  is obtained. Clear polarization-dependent resonance characteristics and effective channel decoupling are demonstrated. [Conclusions] The proposed dual-channel anchor-shaped PCF-SPR sensor combines ultra-wide RI detection, temperature sensing capability, and polarization-resolved selectivity within a compact fiber structure. Its high sensitivity, flexible channel configuration, and strong resistance to cross-interference make it a promising platform for real-time multi-parameter sensing in complex biological and chemical applications, such as cancer cell detection and biochemical analysis.

**Key words:** photonic crystal fibers, surface plasmon resonance, refractive index sensors, temperature sensors, fiber optic sensing

表面等离子共振 (SPR) 技术因其高灵敏度、无标记检测能力和实时监测特性, 在光学生物传感领域得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。通过激发金属-介质界面上的表面等离子体, SPR 传感器能够感知周围介质折射率的微小变化, 从而实现对生化和环境参数的精准检测。在多种 SPR 实现形式中, 基于光子晶体光纤 (PCF) 的 SPR 传感器凭借结构灵活性、多参数检测潜力受到广泛关注<sup>[5-8]</sup>。PCF 内部的微结构气孔可有效调控模态特性、双折射效应及模态耦合, 适用于多种传感应用场景。

近年来, 人们提出了许多多通道 PCF-SPR 传感器设计方案<sup>[9-14]</sup>。例如, Md. Arafat Rahman 等人开发了一种基于双矩形槽的双通道 PCF-SPR 传感器<sup>[9]</sup>, Q. M. Kamrunnahar 等人设计了一种双通道质子微通道辅助 PCF-SPR 传感器<sup>[10]</sup>。在上述设计中, 各通道均检测相同类型分析物。为实现多分析物检测, Parthiban Manickam 等人开发了一种在纤芯区域与外部区域分别设置环形通道的混合型 PCF-SPR 传感器, 可同时检测两种不同分析物<sup>[11]</sup>。Fengmin Wang 等人提出了类似结构, 在纤芯附近与光纤外部均设置了环形通道, 用于双分析物检测<sup>[12]</sup>。K. M. Mustafizur Rahman 等人则提出一种三通道六角形结构, 利用不同等离子材料实现多种分析物的检测<sup>[13]</sup>。此外, Md. Shahedul Hasan 等人设计的四通道 PCF-SPR 生物传感器采用抛光矩形表面, 可实现四种分析物的独立检测<sup>[14]</sup>。现有多通道设计通常依赖空间隔离以构建多个传感通道, 但模式之间的重叠及通道间耦合易产生串扰, 降低传感准确性。为降低通道间串扰, 近年来提出了基于正交偏振模式 ( $x$  偏振与  $y$  偏振) 的偏振分辨传感方案。该方法利用非对称 PCF 的双折射特性, 在空间上分离正交偏振模式, 并将其选择性耦合至不同金属界面, 构建物理和功能独立的检测通道, 从而实现多参数或多分析物的低串扰检测, 同时保持结构紧凑性与集成度<sup>[15-22]</sup>。因基模具有良好的能量约束与与金属界面的高效耦合能力, 大多数 PCF-SPR 传感器采用基模进行传感<sup>[23-24]</sup>。然而, 随着模式复用和模式选择技术的进步<sup>[25-27]</sup>,  $LP_{11}$  等高阶模式开始被引入 SPR 传感研究。高阶模式具有特殊的电场分布, 可增强金属-场作用, 提高传感性能<sup>[28-29]</sup>。为了实现温度传感, 许多 PCF-SPR 设计都采用了 PDMS 温敏材料<sup>[30-33]</sup>。PDMS 热光学系数约为  $-4.5 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ , 显著高于二氧化硅的  $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ , 具备较快的温度响应特性, 同时具有良好的成膜能力, 是 PCF-SPR 温度传感中的常用材料。由于二氧化硅材料的热光学响应较弱, 包层折射率随温度变化可忽略不计。

本文提出一种基于 SPR 和正交偏振高阶模式的双通道 PCF 传感器结构, 具备同时检测超宽范围内的折射率和温度的能力。设计中引入非对称锚型 PCF 结构, 在  $x$  轴与  $y$  轴方向分别抛光形成半圆形感应表面, 用于实现传感通道的物理分离。 $x$  偏振通道涂覆金层与 PDMS, 用于在  $1.21 \sim 1.44$  折射率范围和  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  至  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度区间内实现联合检测;  $y$  偏振通道仅涂覆金层, 用于第二种分析物的独立折射率检测。通过激发高阶模式并分别耦合至对应金属界面, 可实现双参数、双分析物的同时检测, 并显著降低通道间串扰。该结构紧凑、集成度高, 可工作于可见光至近红外波段, 适用于复杂生化环境中的多参数高性能传感应用。

## 1 理论模型与基本原理

本文设计的 PCF-SPR 传感器的横截面如图 1 所示, 为了促进纤芯正交模式极化, 采用非对称锚型结构, 沿  $x$  和  $y$  方向抛光半圆形表面, 大气孔对称地分布在相对应的两侧。五层小气孔相对于纤芯的角度位置分别为  $45^{\circ}$ 、 $135^{\circ}$ 、 $225^{\circ}$  和  $315^{\circ}$ 。大气孔的直径用  $D$  表示, 每个小气孔的直径为  $2\text{ }\mu\text{m}$ 。每个半圆形抛光表面的半径为  $16\text{ }\mu\text{m}$ , 抛光深度为  $H$ 。在  $x$  方向的抛光表面上依次镀有厚度为  $t_{g1}$  的金层和厚度为  $t_{\text{pdms}}$  的 PDMS 层, 用于同时检测一种分析物的折射率和温度。 $y$  方向的抛光表面镀有厚度为  $t_{g2}$  的金层, 用于检测另一种分析物的折射率。

设计的传感器的包层由二氧化硅材料制成, 其折射率可通过著名的 Sellmeier 公式计算如下<sup>[34]</sup>

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{0.691663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.004679} + \frac{0.407943\lambda^2}{\lambda^2 - 0.013512} + \frac{0.897479\lambda^2}{\lambda^2 - 97.934003} \quad (1)$$

金具有稳定的物理化学特性, 在 SPR 应用中具有卓越的传感性能, 因此被选为等离子材料。金的介电常数由 Drude-Lorentz 模型计算得出<sup>[35]</sup>

$$\varepsilon_{\text{Au}} = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_{\text{D}}^2}{\omega(\omega + j\gamma_{\text{D}})} - \frac{\Delta\varepsilon\Omega_{\text{L}}^2}{(\omega^2 - \Omega_{\text{L}}^2) + j\Gamma_{\text{L}}\omega} \quad (2)$$

金的高频介电常数( $\varepsilon_{\infty}$ )设定为 5.9673, 角频率( $\omega$ )通过波长( $\lambda$ )除以  $2\pi$  乘以光速( $c$ )计算得出。金的等离子体频率( $\Omega_{\text{D}}$ )是用  $2\pi$  乘以 2113.6 THz 得出的, 后者代表等离子体振荡的频率。阻尼频率( $\gamma_{\text{D}}$ )由  $2\pi$  乘以 15.92 THz 得出, 代表这些振荡的衰减率。 $\Delta\varepsilon$  是一个 1.09 的常数, 用作加权因子。此外, 研究还利用分别设置为  $104.86 \times 2\pi$  和  $650.07 \times 2\pi$  的  $\Gamma_{\text{L}}$  和  $\Omega_{\text{L}}$  来描述洛伦兹振荡强度和光谱宽度。

PDMS 是一种固体温度敏感材料, 可使金属膜的共振波长随温度变化而变化。其折射率与温度之间的关系可表示如下<sup>[36]</sup>

$$n_{\text{PDMS}} = -4.5 \times 10^{-4}T + 1.4176 \quad (3)$$

限制损耗 (confinement loss CL) 由模式能量向包层泄漏而引起的损耗, 其大小反映了光能在纤芯中被有效限制的程度。当包层区域内的倏逝场增强时, 会导致模式能量泄漏增强, 从而增加 CL。对峰值 CL 的测量有助于评估 PCF-SPR 传感器的性能<sup>[37]</sup>。

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

式中:  $\lambda$  表示以  $\mu\text{m}$  为单位测量的入射光波长,  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  表示有效折射率的虚分量。

相对于分析物的 RI 变化, 共振峰波长的变化被明确定义为波长灵敏度, 即

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

式中:  $\Delta\lambda_{\text{peak}}$  表示波长变化的峰值,  $\Delta n_{\text{a}}$  表示两个不同的相邻 RI。波长灵敏度 ( $S_{\lambda}$ ) 是使用波长探测法计算性能的一个重要约束条件<sup>[38]</sup>。光纤传感器的性能系数 (Factor of Merit FOM) 会影响检测精度。FOM 的计算公式如下<sup>[39]</sup>

$$F_{\text{m}} = \frac{S_{\lambda}}{\sigma_{\text{FWHM}}} \quad (6)$$

式中:  $S_{\lambda}$  表示每个分析物 RI 的灵敏度。响应变量相当于其峰值一半时的两个独立可转移值之间的差值称为半峰全宽 (full width at half maximum FWHM)。

为评估温度传感器的检测能力, 引入了温度灵敏度参数, 其计算公式为

$$S_T(\lambda) = \frac{\Delta\lambda_{\text{peak}}}{\Delta T} \quad (7)$$

式中:  $\Delta T$  表示待测分析物的温度变化。

图 2(a) 显示了当分析物 1 的折射率为  $n_{\text{a1}}=1.36$  时  $x$  偏振条件下的色散特性, 包括纤芯模式 (粉色虚线)、表面等离子体极化子 (SPP) 模式 (绿色虚线) 和该模式的损耗谱 (粉色实线)。图 2(b) 显示了当分析物 2 的折射率为  $n_{\text{a2}}=1.38$  时,  $y$  偏振下的相应色散曲线, 显示了纤芯模式 (绿色虚线)、SPP 模式 (黄色虚线) 和该模式的损耗谱 (绿色实线)。在发生相位匹配时, 纤芯模式的部分能量耦合至金属膜层中传输, 表现为纤芯模式限制损耗急剧增大, 损耗谱出现共振峰。该峰值的相应波长被定义为共振波长, 可通过定位两种模式的有效指数相等的点来确定。由于 SPP 模式对周围折射率的变化高度敏感, 分析物折射率的任何变化都会改变相位匹配条件, 从而导致共振波长

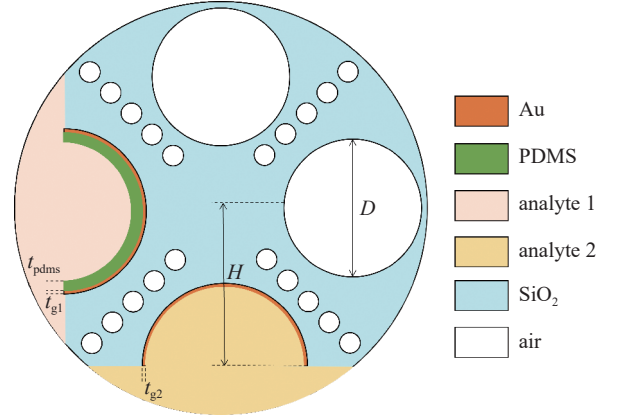


Fig. 1 Cross section of the designed anchor-shaped dual-channel PCF-SPR sensor

图 1 设计的锚型双通道 PCF-SPR 传感器的横截面示意图

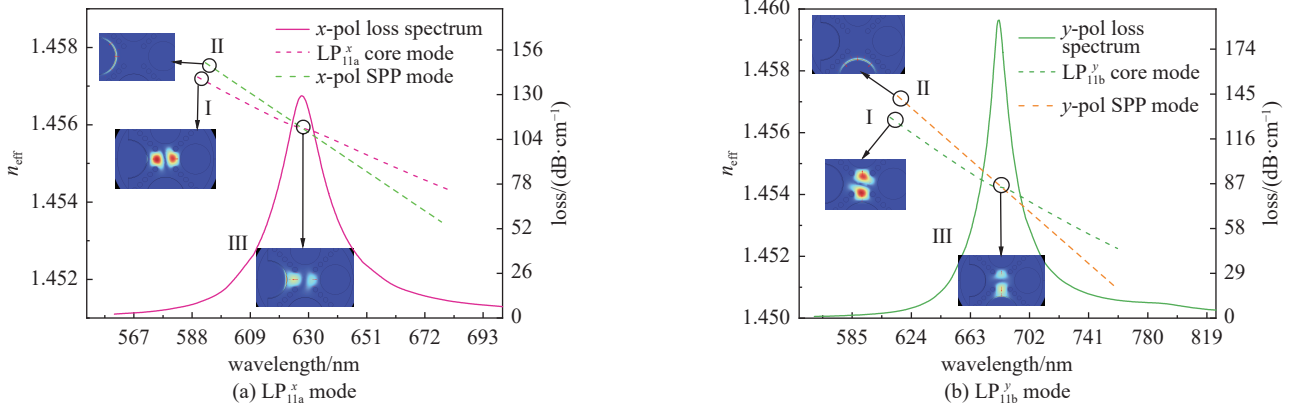


Fig. 2 Dispersion characteristics under different polarization conditions

图 2 不同偏振条件下的色散特性

的移动。因此,通过检测损耗峰的波长偏移,可以准确测量分析物的折射率变化。

## 2 优化与讨论

数值模拟使用基于有限元法(FEM)的商用求解器 COMSOL Multiphysics 进行。为提高仿真精度,在计算域边界应用了完美匹配层(PML)来吸收外向电磁能。模拟区域包括 PCF 的整个横截面及其周围介质。采用连续波光源,并设置足够长的模拟时间,以确保达到稳态条件。对计算网格进行了细化,增加了纤维芯和材料界面附近的密度,因为在这些地方电磁场会发生快速变化,从而提高结果的准确性。

传感器的结构参数的抛光圆直径  $D$ , 抛光深度  $H$ ,  $x$  偏振通道涂覆的金层厚度  $t_{g1}$ , PDMS 层厚度  $t_{pdms}$ ,  $y$  偏振通道涂覆的金层厚度  $t_{g2}$  会影响光纤的折射率分布和模式耦合能力,从而影响传感器的基模损耗谱和传感特性。

图 3 显示了在不同的大气孔直径  $D$ (从  $10.5 \mu\text{m}$  到  $14.5 \mu\text{m}$ ) 条件下,  $n_{a1}=1.34$  和  $1.36$  的  $x$  偏振和  $n_{a2}=1.36$  和  $1.38$  的  $y$  偏振的损耗光谱。随着直径  $D$  的增大,两种偏振态损耗光谱的共振波长几乎保持不变,而损耗峰值却增大了。这种现象归因于半圆形抛光区域附近的场约束增强,从而加强了导波模式与金属界面之间的相互作用,从而强化了 SPR 效应。当  $D=14.5 \mu\text{m}$  时,  $x$  偏振和  $y$  偏振模式的损耗谱的 FWHM 都达到最小值。根据定义,当共振波长保持稳定时,FWHM 越小, FOM 越大。因此, FOM 在  $D=14.5 \mu\text{m}$  时达到最大值。考虑到灵敏度和光谱分辨率,  $14.5 \mu\text{m}$  的直径被选为最佳设计参数。

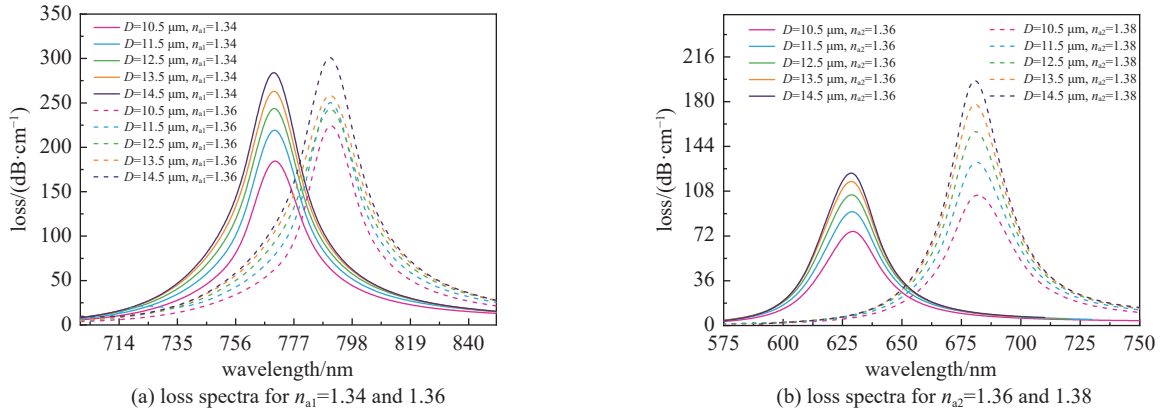


Fig. 3 Polarization-dependent loss characteristics under different large air hole diameters  $D$

图 3 不同大空气孔直径  $D$  下的偏振损耗特性

图 4 显示了  $n_{a1}=1.34$  和  $1.36$  时  $x$  偏振模式以及  $n_{a2}=1.36$  和  $1.38$  时  $y$  偏振模式的损耗光谱。随着抛光深度  $H$  的增加,所有情况下的共振波长几乎保持不变,而峰值损耗值却在增加,两种偏振态的共振点的 FWHM 都变窄了。这种现象可归因于抛光深度的增加增强了核心模式与表面等离子体模式之间的耦合。抛光深度越深,核心模式场越接近金属界面,促进了更强的能量泄漏,从而加强了 SPR 效应。在抛光深度为  $16.5 \mu\text{m}$  时,  $x$  偏振和  $y$  偏振损耗光谱的 FWHM 都达到最小值。根据 FOM 的定义,在稳定共振波长处的 FWHM 越窄,则 FOM 越高。因此, FOM 在  $H=16.5 \mu\text{m}$  时达到最大值。根据对波长灵敏度和优点系数的综合评估,确定  $16.5 \mu\text{m}$  的抛光深度为最佳值。

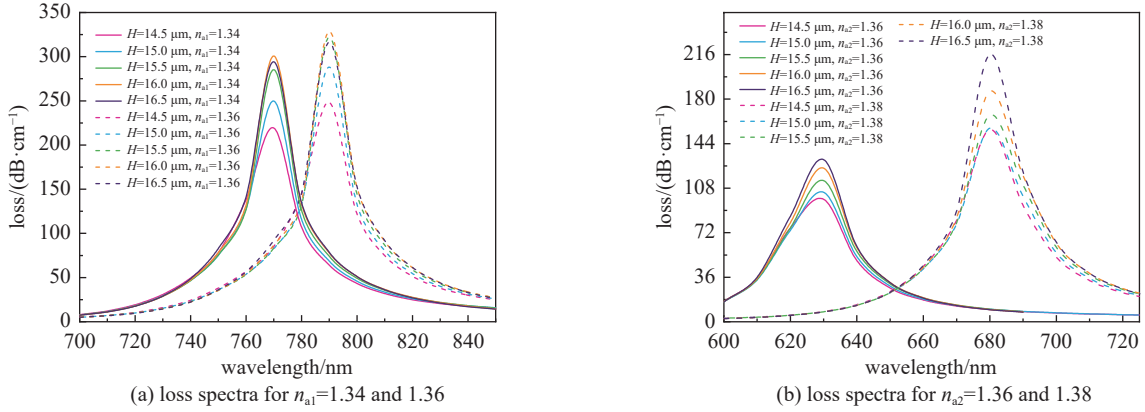


Fig. 4 Polarization-dependent loss characteristics under different polishing depths  $H$

图 4 不同抛光深度  $H$  下的偏振损耗特性

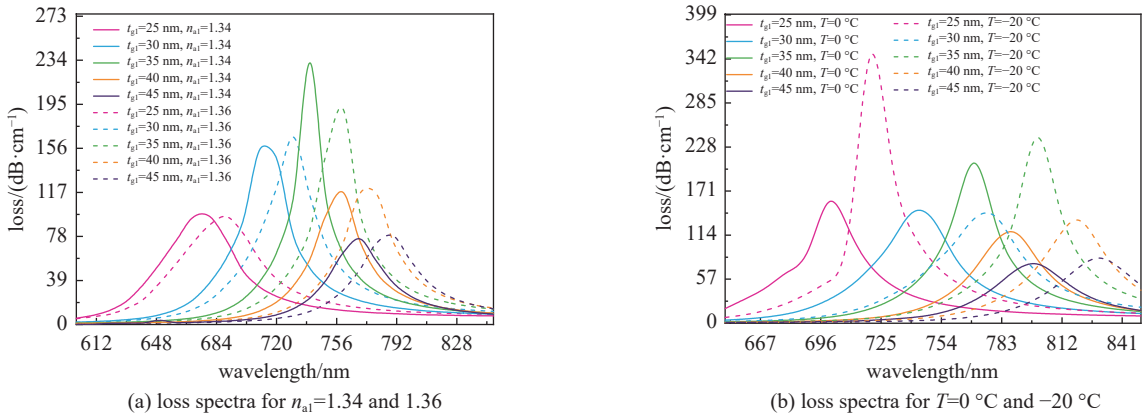


Fig. 5  $x$ -polarized loss characteristics under different gold layer thicknesses  $t_{g1}$

图 5 不同金层厚度  $t_{g1}$  下的  $x$  偏振损耗特性

图 5(a) 显示了在  $n_{a1}=1.34$  和  $n_{a1}=1.36$  的情况下, 改变金层厚度 ( $t_{g1}$ ) 对  $x$  偏振损耗光谱的影响。随着  $t_{g1}$  从 25 nm 增加到 45 nm, 共振波长出现了红移。峰值损耗强度最初增加, 在  $t_{g1}=35\text{ nm}$  时达到最大值, 随后随着厚度的进一步增加而减小。共振波长偏移也有类似的趋势, 也是在  $t_{g1}=35\text{ nm}$  时达到峰值, 然后逐渐减小。

此外, 在  $t_{g1}=35\text{ nm}$  时,  $n_{a1}=1.34$  和  $n_{a1}=1.36$  的损耗谱的 FWHM 都达到了最小值, 这表明在此厚度下 FOM 达到了最大值。这种现象归因于在较薄的金层 ( $<35\text{ nm}$ ) 中, 等离子体激发更强, 从而提高了倏逝场与表面等离子体之间的耦合效率。然而, 在较厚的金层 ( $>35\text{ nm}$ ) 中, 金属内部吸收和反射的增加会降低耦合效率。

由于  $x$  偏振通道也用于温度传感, 因此必须评估  $t_{g1}$  在不同温度条件下的影响。如图 5(b) 所示, 在  $0\text{ }^\circ\text{C}$  和  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  条件下, 共振波长偏移也在  $t_{g1}=35\text{ nm}$  时达到最大值, 随后逐渐减小, 这证实了温度灵敏度在此厚度下也达到了最佳状态。因此,  $t_{g1}=35\text{ nm}$  被确定为实现高性能折射率和温度传感的最佳金层厚度。

图 6 显示了在  $n_{a2}=1.36$  和  $n_{a2}=1.38$  条件下, 改变金层厚度 ( $t_{g2}$ ) 对  $y$  偏振损耗谱的影响。随着  $t_{g2}$  从 25 nm 增加到 45 nm,  $y$  偏振光谱中的共振波长出现了红色偏移。 $n_{a2}=1.36$  和  $n_{a2}=1.38$  之间的共振波长偏移随着  $t_{g2}$  的增加而增加, 直到 35 nm 达到最大值, 然后随着厚度的继续增加而减小。此外, 两种折射率条件下的 FWHM 在  $t_{g2}=35\text{ nm}$  时都达到最小值, 表明 FOM 在此厚度下达到最大值。因此,  $t_{g2}=35\text{ nm}$  被确定为  $y$  偏振通道的最佳金层厚度。

图 7(a) 展示了在分析物折射率  $n_{a1}=1.34$  和  $n_{a1}=1.36$  的情况下, 改变 PDMS 层厚度 ( $t_{\text{pdms}}$ ) 对  $x$  偏振损耗光谱的影响。

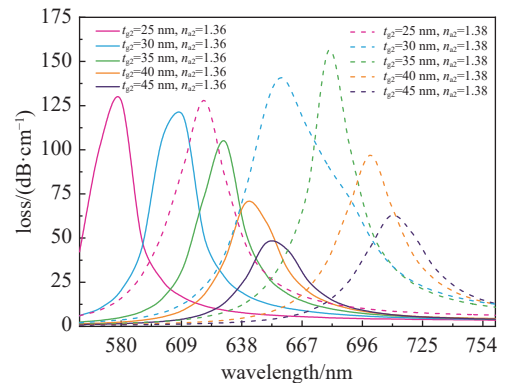


Fig. 6  $y$ -polarized loss characteristics under different gold layer thicknesses  $t_{g2}$

图 6 不同金层厚度  $t_{g2}$  下的  $y$  偏振损耗特性

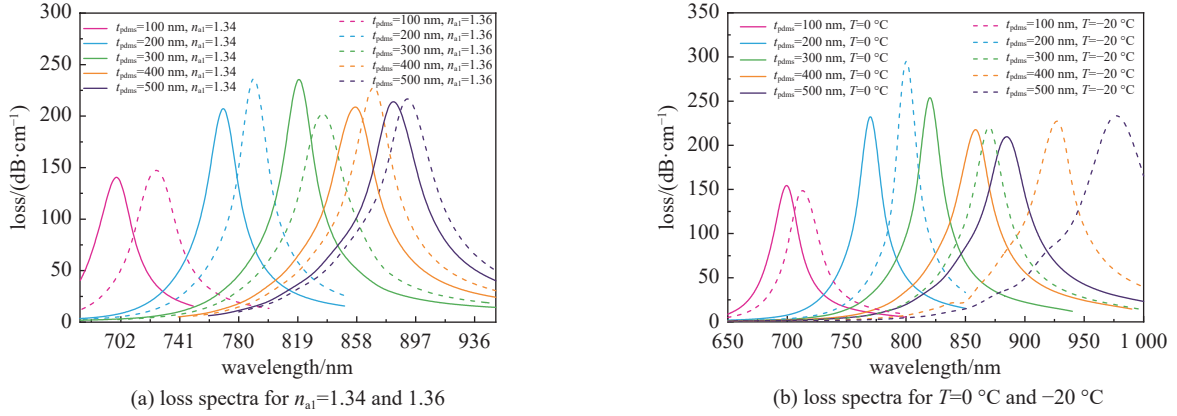


Fig. 7 x-polarized loss characteristics under different PDMS layer thicknesses  $t_{pdms}$

图 7 不同 PDMS 层厚度  $t_{pdms}$  下的 x 偏振损耗特性

随着  $t_{pdms}$  从 100 nm 增加到 500 nm, 在 x 偏振光谱中观察到共振波长发生了明显的红移。值得注意的是, 对于任何给定的厚度,  $n_{a1}=1.34$  和  $n_{a1}=1.36$  之间共振波长移动的幅度随着  $t_{pdms}$  的增加而减小。这种反比关系可归因于随着 PDMS 层的增厚, 金属层与分析物之间的距离增大, 从而减弱了传感器的折射率灵敏度。

图 7(b) 显示了在温度  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $T=-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 改变 PDMS 层厚度 ( $t_{pdms}$ ) 对 x 偏振损耗光谱的影响。随着  $t_{pdms}$  从 100 nm 增加到 500 nm, 在 x 偏振光谱中观察到共振波长发生了一致的红移。重要的是, 对于任何给定的厚度,  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $T=-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间共振波长移动的幅度都会随着  $t_{pdms}$  的增加而成正比。这种直接关系源于随着厚度的增加, PDMS 层对温度变化的响应增强, 从而提高了温度灵敏度。考虑到折射率灵敏度和温度灵敏度作为  $t_{pdms}$  函数的不同趋势, 并为了保持这两个参数的最佳性能, 选择  $t_{pdms}=300\text{ nm}$  作为该传感配置的最佳 PDMS 层厚度。这种平衡选择确保了对分析物折射率变化和温度波动都有足够的灵敏度, 从而优化了设备的整体传感能力。

### 3 结果与分析

经过优化后, PCF-SPR 传感器的结构参数如表 1 所示。选择气孔直径  $D=14.5\text{ }\mu\text{m}$ 、抛光深度  $H=16.5\text{ }\mu\text{m}$ 、金层厚度  $t_{g1}=t_{g2}=35\text{ nm}$  和 PDMS 厚度  $t_{pdms}=300\text{ nm}$  以提高模态耦合效率, 并确保在 x 极化和 y 极化模式下都能稳健地激发 SPR。这些几何配置在限制损耗、波长灵敏度、共振峰 FWHM 和温度灵敏度之间实现了很好的平衡, 从而能够在超宽折射率和温度范围内同时进行检测。

表 1 所设计的传感器的最佳参数

Table 1 Optimal parameters of the proposed sensor

$D/\mu\text{m}$	$H/\mu\text{m}$	$t_{g1}/\text{nm}$	$t_{g2}/\text{nm}$	$t_{pdms}/\text{nm}$
14.5	16.5	35	35	300

为了评估 PCF-SPR 传感器的 RI 传感能力, 在折射率 1.21 到 1.44 的范围内, 以 0.01 为增量, 对损耗光谱进行了系统分析。x 偏振通道的分析结果如图 8(a) 和图 8(b) 所示。观察到的趋势表明, 随着 RI 值的增加, 共振波长逐渐偏移, 而整个损耗谱曲线基本保持不变。图 8(c) 展示了共振波长移动与  $n_{a1}$  从 1.21 到 1.44 的变化之间的关系。对 1.21 至 1.41 范围内的数据进行了线性和多项式拟合分析。线性拟合的调整  $R^2$  系数为 0.896, 而多项式拟合的调整

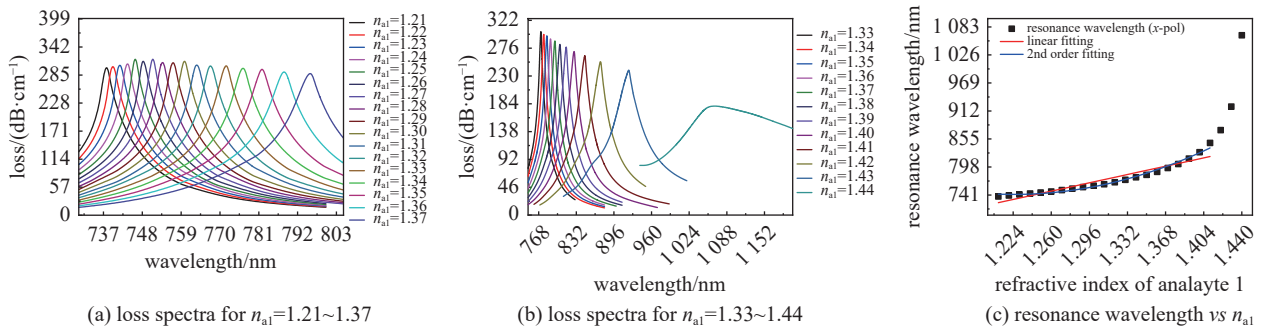


Fig. 8 Refractive index response characteristics of the x-polarized channel analyte

图 8 x 偏振通道分析物折射率响应特性

$R^2$  值为 0.986, 表明拟合过程具有极好的一致性。当  $n_{a1}$  在 1.21 至 1.44 之间变化时波长灵敏度随着  $n_{a1}$  的增加而增加, 当  $n_{a1}=1.44$  时波长灵敏度达到最大值 14 500 nm。

$y$  偏振通道的结果如图 9(a) 和图 9(b) 所示。随着  $y$  偏振分析物  $n_{a2}$  的增加, 共振波长逐渐偏移, 峰值损耗也随之增加, 在  $n_{a2}=1.4$  时达到最大值, 然后逐渐减小。图 9(c) 展示了共振波长的变化与  $n_{a2}$  从 1.21 到 1.44 的变化之间的关系。使用线性拟合和多项式拟合分析了 1.21 至 1.41 范围内的数据。线性拟合的调整  $R^2$  系数为 0.816, 而多项式拟合的调整  $R^2$  系数为 0.966, 表明拟合模型之间具有良好的一致性。当  $n_{a1}$  在 1.21 至 1.44 之间变化时波长灵敏度随着  $n_{a1}$  的增加而增加, 在  $n_{a2}=1.42$  时波长灵敏度达到最大值 14 500 nm。

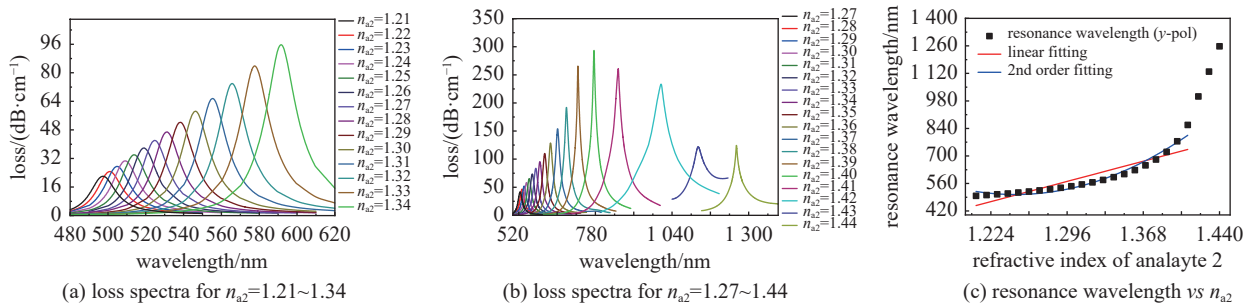


Fig. 9 Refractive index response characteristics of the  $y$ -polarized channel analyte

图 9  $y$  偏振通道分析物折射率响应特性

为了评估 PCF-SPR 传感器的温度感应能力, 在  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  至  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度范围内, 以  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  为增量, 对损耗谱进行系统分析。如图 10(a) 所示, 随着  $x$  偏振通道中分析物温度的升高, 共振波长发生蓝移。这种偏移归因于涂覆在  $x$  偏振通道上的温度敏感材料 PDMS 层的负热光系数, 它使波导模式的有效折射率随温度变化而改变。图 10(b) 显示了共振波长随温度变化的分析结果和线性拟合曲线, 显示出很强的线性关系。线性拟合的调整  $R^2$  系数为 0.969, 证明与数据非常吻合, 所设计的温度传感器最大灵敏度值达到  $4\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ , 高于传统的光纤温度传感器。

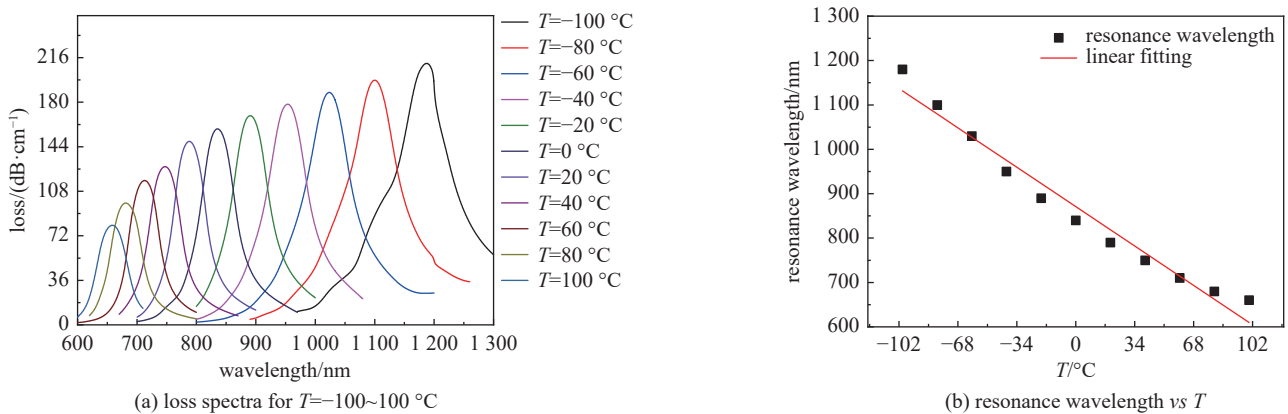


Fig. 10 Temperature response characteristics of the  $x$ -polarized channel analyte

图 10  $x$  偏振通道分析物温度响应特性

如表 2 所示, 我们对提出的双通道 PCF-SPR 传感器与具有代表性的同类传感器进行了系统性的数据对比。结果表明, 本设计在整体性能上具有显著优势。在  $x$  偏振与  $y$  偏振模式下, 其折射率检测范围均达到  $1.21\sim 1.44$ , 明显宽于多数已有广域传感器; 在温度检测方面,  $x$  偏振模式实现了  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  至  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  的跨度, 并保持  $4.0\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$  的高灵敏度, 超越了许多前期报道的结构。综上, 通过数据对比可见, 该传感器在双参数宽量程检测和灵敏度方面均表现优秀, 适用于癌症诊断与生化分析等高要求应用。

#### 4 结论

本文提出了一种基于 SPR 效应的高灵敏度紧凑型双通道 PCF 传感器, 用于同时检测 RI 和温度。该传感器采用正交偏振的高阶模式 ( $LP_{11a}^+$  和  $LP_{11b}^+$ ), 可在单根光纤内实现独立的多分析物检测, 从而有效消除通道间串扰。该传感器采用独特的非对称锚形横截面, 沿  $x$  和  $y$  方向具有半圆形抛光表面, 并选择性地涂覆有金属和聚合物薄膜, 以实现偏振分辨和模式选择性 SPR 激发。  $x$  偏振通道采用金和 PDMS 层功能化, 可同时测量 RI 和温度, 而  $y$  偏振

表 2 同类型 PCF 传感器的传感能力对比

Table 2 Comparison of sensing capabilities among PCF sensors of the same type

Ref.	direction of polarization	operating wavelength/nm	RI detection range	wavelength sensitivity/nm	detection range/°C	temperature sensitivity/(nm/°C)
Ref [17]	x-polarized	1 700~2 250	1.29~1.35	7 800	—	—
	y-polarized	600~950	1.37~1.41	11 700	—	—
Ref [40]	x-polarized	500~1 400	1.35~1.40	10 000	—	—
Ref [41]	y-polarized	400~1 000	1.333~1.42	6 549.93	—	—
Ref [42]	y-polarized	660~800	1.39~1.44	2 000	—	—
Ref [43]	y-polarized	500~1 900	1.21~1.41	61 000	—	—
Ref [44]	y-polarized	420~950	1.29~1.40	2 500	—	—
Ref [45]	y-polarized	800~2 300	—	—	20~320	3.9
Ref [46]	x-polarized	800~1 200	—	—	-25~90	2.74
	y-polarized	840~1 000	—	—	80~130	1.04
this work	x-polarized	725~1 200	1.21~1.44	14 500	-100~100	4
	y-polarized	480~1 300	1.21~1.44	14 500	—	—

通道仅涂覆有金,支持独立检测次级分析物的 RI。这种双通道、双功能架构提高了紧凑光纤结构内的传感吞吐量和测量多功能性。基于有限元法(FEM)的 COMSOL Multiphysics 仿真,优化了关键结构参数,包括大气孔直径( $D=14.5\ \mu\text{m}$ )、抛光深度( $H=16.5\ \mu\text{m}$ )、金层厚度( $t_{g1}=t_{g2}=35\ \text{nm}$ )和 PDMS 厚度( $t_{\text{pdms}}=300\ \text{nm}$ )。这些配置促进了强等离子体耦合并减小了光谱线宽。优化后的传感器实现了 1.21~1.44 的超宽 RI 检测范围,最大波长灵敏度为 14 500 nm。此外,  $x$  偏振通道中的 PDMS 层在 -100 °C 至 100 °C 的扩展范围内具有高达 4.0 nm/°C 的高温灵敏度。该传感器工作在 480~1 300 nm 的光谱范围内,适用于生物医学诊断、环境传感和光纤实验室平台等应用。

#### 参考文献:

- [1] Mumtaz F, Zhang Bohong, Roman M, et al. Computational study: windmill-shaped multi-channel SPR sensor for simultaneous detection of multi-analyte[J]. Measurement, 2023, 207: 112386.
- [2] Ravindran N, Kumar S, M Y, et al. Recent advances in Surface Plasmon Resonance (SPR) biosensors for food analysis: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(8): 1055-1077.
- [3] Zhou Yifan, Zhang Yanan, Han Bo, et al. Biochemical sensor based on functional material assisted optical fiber surface plasmon resonance: a review[J]. Measurement, 2023, 207: 112353.
- [4] Xu Yanpei, Wu Haoyu, Sun Meng, et al. A sensitivity-enhanced plasmonic sensing platform modified with  $\text{Co}(\text{OH})_2$  nanosheets[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2024, 255: 116206.
- [5] Singh S, Chaudhary B, Upadhyay A, et al. A review on various sensing prospects of SPR based photonic crystal fibers[J]. Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications, 2023, 54: 101119.
- [6] Chaudhary V S, Kumar D, Pandey B P, et al. Advances in photonic crystal fiber-based sensor for detection of physical and biochemical parameters—a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(2): 1012-1023.
- [7] Sawraj S, Kumar D, Pravesh R, et al. PCF-based sensors for biomedical applications: a review[J]. IEEE Transactions on NanoBioscience, 2025, 24(2): 157-164.
- [8] Butt M A, Khonina S N, Kazanskiy N L. Plasmonics: a necessity in the field of sensing—a review (invited)[J]. Fiber and Integrated Optics, 2021, 40(1): 14-47.
- [9] Rahman M A, Ahmed T, Anower M S. A highly sensitive dual-slotted channel-based sensor coated with gold and titanium dioxide for simultaneous detection of two distinct analytes[J]. Plasmonics, 2024, 20(6): 4115-4129.
- [10] Kamrunnahar Q M, Haider F, Aoni R A, et al. Plasmonic micro-channel assisted photonic crystal fiber based highly sensitive sensor for multi-analyte detection[J]. Nanomaterials, 2022, 12: 1444.
- [11] Manickam P, Senthil R, Senthil R. Numerical analysis of hybrid - SPR-PCF multi-analyte sensor for clinical diagnosis[J]. Plasmonics, 2024, 20(6): 3305-3311.
- [12] Wang Fengmin, Wei Yong, Han Yanhong. High-sensitivity refractive index sensor with dual-channel based on surface plasmon resonance photonic crystal fiber[J]. Sensors, 2024, 24: 5050.
- [13] Rahman K M M, Alam M S, Islam M A. Highly sensitive surface plasmon resonance refractive index multi-channel sensor for multi-analyte sensing[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(24): 27422-27432.
- [14] Hasan M S, Kalam M A E, Faisal M. PCF based four-channel SPR biosensor with wide sensing range[J]. IEEE Transactions on NanoBioscience, 2024, 23(2): 233-241.

- [15] Wang Haoran, Rao Weiyang, Luo Jian, et al. A dual-channel surface Plasmon resonance sensor based on dual-polarized photonic crystal fiber for ultra-wide range and high sensitivity of refractive index detection[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13: 6800611.
- [16] Shakya A K, Singh S. Design of dual polarized tetra core PCF based plasmonic RI sensor for visible-IR spectrum[J]. *Optics Communications*, 2021, 478: 126372.
- [17] Zhang Shuaishuai, Wang Yueke. A PCF-SPR sensor for dual-polarization and wide refractive index detection range[J]. *Optics Communications*, 2024, 569: 130810.
- [18] Jiao Shengxi, Gao Zhenqiu. Analysis of a photonic crystal fiber SPR sensor based on dual polarization direction and two different metal layers[J]. *Optical Materials Express*, 2025, 15(3): 541-554.
- [19] Guo Xiaotong, Sang Tian, Yang Guofeng, et al. Dual-polarization SPR sensor of U-shaped photonic crystal fiber coated with Au-TiO<sub>2</sub>[J]. *Plasmonics*, 2025, 20(5): 2665-2674.
- [20] Aishy T R, Jahurul Islam M, Kaysir M R. Multiple gas detection using multi-channel SPR based PCF with compound film-coated side-holes[J]. *Plasmonics*, 2025, 20(9): 8039-8048.
- [21] Alshaikhli Z S, Mahdi M T. Numerical analysis of high sensitivity refractive index sensor based on quad-core PCF-SPR[J]. *Plasmonics*, 2024, 20(7): 4553-4564.
- [22] Xiao Yi, Jiang Zhuxuan, Yin Bin, et al. Simultaneous measurement of hydrogen and methane concentrations with temperature self-calibration based on a SPR sensor with an anchor-shaped photonic crystal fiber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 175: 110880.
- [23] Chen Longqin, Wu Yongchang, Liu Yue, et al. Highly sensitive dual-function sensor for refractive index and temperature using D-shaped microchannel photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2024, 32(7): 12405-12418.
- [24] Trisha I J, Patwary A K, Sayem M A, et al. Numerical analysis of a single channel exposed core elliptical shaped PCF based highly sensitive SPR sensor for wide RI sensing[J]. *Optics Express*, 2024, 32(14): 25472-25487.
- [25] Zhu Qixin, Shi Jianhong, Hu Huixuan, et al. High-power polarization-maintaining LP<sub>11</sub>-mode fiber laser based on long-period fiber grating for precise welding[J]. *Optics Express*, 2024, 32(6): 8862-8876.
- [26] Ahmad H, Nizamani B, Bencheikh A. LP<sub>11</sub> mode all-fiber ultrafast laser at 1.3 μm by using bismuth telluride as an optical modulator[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2025, 61: 1600509.
- [27] Zhang Li'ang, Li Kewei, Ren Wenhua, et al. Multi-wavelength erbium-doped fiber laser with high-purity LP<sub>11</sub> mode output based on mechanically induced long-period fiber gratings and double Sagnac fiber filter[J]. *Optics Communications*, 2025, 577: 131368.
- [28] Ding Xin, Lin Qiao, Wang Mengjie, et al. Design and simulation of high-performance D-type dual-mode PCF-SPR refractive index sensor coated with Au-TiO<sub>2</sub> layer[J]. *Sensors*, 2024, 24: 6118.
- [29] Zhou Deyang, Ren Fang, Li Yidan, et al. Enhanced surface Plasmon resonance sensing via higher-order mode in weakly-coupled few-mode photonic crystal fiber[J]. *Plasmonics*, 2024, 20(6): 3493-3504.
- [30] Ullah S, Chen Hailiang, Guo Pengxiao, et al. A highly sensitive D-shaped PCF-SPR sensor for refractive index and temperature detection[J]. *Sensors*, 2024, 24: 5582.
- [31] Li Kaifeng, Li Shuguang, Guo Pengxiao, et al. Dual parameter sensor for RI and temperature detection by cascading Ag/WO<sub>3</sub> film PCF and Ag/MoS<sub>2</sub>/PDMS film PCF[J]. *Optics Express*, 2024, 32(16): 27710-27722.
- [32] Ji Xuhao, Zhang Yu, Qin Yifan, et al. Dual-channel SPR temperature sensor based on side-polished hollow core fiber and PDMS[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2025, 43(6): 2949-2955.
- [33] Liu Ting, Lin Zhipeng, Lai Changfei, et al. High-sensitivity optical fiber SPR temperature sensing probe based on Au-PDMS@Au coating[J]. *Optical Fiber Technology*, 2024, 84: 103733.
- [34] Fleming J W. Dispersion in GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> glasses[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(24): 4486-4493.
- [35] Kamrunnahar Q M, Mou J R, Momtaj M. Dual-core gold coated photonic crystal fiber plasmonic sensor: design and analysis[J]. *Results in Physics*, 2020, 18: 103319.
- [36] Zhu Zongda, Liu Lu, Liu Zhihai, 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.
- [37] Mahfuz M A, Hossain M A, Haque E, et al. Dual-core photonic crystal fiber-based plasmonic RI sensor in the visible to near-IR operating band[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(14): 7692-7700.
- [38] Singh S, Kumar D, Sahu A, et al. Photonic crystal fiber-based sensors for various cancer detection in human body: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(4): 5956-5968.
- [39] Aruna Gandhi M S, Senthilnathan K, Ramesh Babu P, et al. Highly sensitive localized surface Plasmon Polariton based D-type twin-hole photonic crystal fiber microbiosensor: enhanced scheme for SERS reinforcement[J]. *Sensors*, 2020, 20: 5248.
- [40] Jain S, Choudhary K, Kumar S. Photonic crystal fiber-based SPR sensor for broad range of refractive index sensing applications[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 73: 103030.
- [41] Zhang Zhibing, Yin Zhiyong, Li Shuguang. A SPR sensor with wide RI measuring range and narrow FWHM based on PCF-silver film structure[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(20): 7398-7404.

- [42] Mittal S, Saharia A, Ismail Y, et al. Design and performance analysis of a novel hoop-cut SPR-PCF sensor for high sensitivity and broad range sensing applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(3): 2697-2704.
- [43] Khodatars Dashtnian M R, Fallahi V, Olyae S, et al. Highly sensitive dual-side polished SPR PCF sensor for ultra-wide analyte range in the visible to near-IR operating band[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2024, 56: 1187.
- [44] Hoque A M T, Al-Tabatabaie 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.
- [45] Yang Lin, Hu Chunjie, Zhao Yuyang, et al. SPR-based PCF sensor with embedded silver wires for wide range temperature sensing[J]. *Journal of Optics*, 2023, 52(3): 1197-1205.
- [46] You Qingcheng, Pan Honggang, Zhao Zihong, et al. Highly sensitive wide detection range semicircular convex slot PCF temperature sensor based on surface Plasmon resonance[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(16): 25785-25792.