

基于ITO的高灵敏度折射率D型光子晶体 光纤等离子体传感器

张其轩, 赵欣

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2026年3月25日; 录用日期: 2026年5月1日; 发布日期: 2026年5月11日

摘要

本文针对传统表面等离子体共振(SPR)传感器存在的灵敏度低的问题, 基于光子晶体光纤(PCF)设计了一种具有增敏结构的SPR传感器。我们通过在抛光后的D型PCF表面沉积氧化铟锡(ITO)薄膜, 引发SPR效应以增强模式耦合强度, 从而显著提升传感性能, 而且结构设计中采用数量较少的空气孔结构, 既简化了制造工艺, 又增强了光能在纤芯中的聚束效果。采用有限元法(FEM)数值分析对光纤结构参数进行优化, 仿真结果表明, 传感器折射率(RI)的范围从1.26到1.33, 所设计的传感器表现出为25,000 RIU卓越的最大波长灵敏度, 226.25 RIU⁻¹出色的品质因数(FOM)和 4.0×10^{-6} RIU的分辨率。所提出的传感器在工业分析, 生物化学分析和医疗诊断都有潜在的应用前景, 可为D型光子晶体光纤传感器的设计优化、材料选型与实际应用提供系统的理论依据与设计参考。

关键词

光子晶体光纤, 等离子体共振, 波长灵敏度

High-Sensitivity SPR Refractive Index Sensor Based on ITO-Coated D-Shaped Photonic Crystal Fiber

Qixuan Zhang, Xin Zhao

College of Physical Science and Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin

Received: March 25, 2026; accepted: May 1, 2026; published: May 11, 2026

Abstract

Aiming at the problem of low sensitivity in traditional surface plasmon resonance (SPR) sensors, an

SPR sensor with a sensitivity-enhanced structure is designed based on photonic crystal fiber (PCF) in this paper. Indium tin oxide (ITO) thin film is deposited on the surface of the polished D-shaped PCF to excite the SPR effect and enhance the mode coupling strength, thereby significantly improving the sensing performance. In addition, a small number of air holes are adopted in the structural design, which not only simplifies the manufacturing process but also enhances the light confinement effect in the fiber core. The numerical analysis and optimization of the fiber structural parameters are carried out using the finite element method (FEM). The simulation results show that in the refractive index (RI) range of 1.26 to 1.33, the proposed sensor exhibits an excellent maximum wavelength sensitivity of 25,000 nm/RIU, a remarkable figure of merit (FOM) of 226.25 RIU⁻¹, and a resolution of 4.0 × 10⁻⁶ RIU. The proposed sensor has promising application prospects in industrial analysis, biochemical analysis, and medical diagnosis, which can provide a systematic theoretical basis and design reference for the structural optimization, material selection, and practical application of D-shaped PCF sensors.

Keywords

Photonic Crystal Fiber, Plasmon Resonance, Wavelength Sensitivity

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

表面等离子体共振(SPR)是一种常见的光学物理现象,最早由 Ritchie 于 1957 年提出[1]。SPR 是由于金属表面自由电子在特定频率下与入射光场发生耦合,形成沿金属与介质界面传播的表面等离子体波(SPW)。当入射光的波矢与 SPW 的传播常数相匹配时,系统发生共振,此时表面等离子体波对周围环境折射率的微小变化表现出高度敏感性。这种敏感性使得 SPR 技术成为一种高灵敏、高分辨率、实时、无需标记的检测手段,广泛应用于生化分析、气体检测、食品安全、环境监测和医学诊断等多个领域[2]。

传统 SPR 系统多基于棱镜耦合结构,利用全反射下的倏逝波激发表面等离子体波。尽管该方法具有较高的耦合效率,但其设备体积庞大、成本较高,难以实现系统的小型化与集成化。随着光纤技术的发展,SPR 效应被成功集成到光子晶体光纤(PCF)中,以实现更高的灵活性、紧凑性和便携性。

PCF-SPR 的设计灵活性很高,因此具有多种结构形式,其中,D 型光子晶体光纤因其一侧抛光形成平坦结构,能够实现等离子材料的高质量沉积,并增强导模与金属层之间的耦合,从而极大提高传感灵敏度。Chen 等人[3]提出了一个具有开环结构的 D 形传感器,该传感器可以检测到 1.20 至 1.29 的折射率范围,最大波长灵敏度为 11,055 nm/RIU。

本文设计了一种简单结构的 PCF-SPR 传感器,气孔分为两层排布,内部采用五个圆形空气孔组成正五边形的结构设计,外部是四个关于 Y 轴对称的圆形大气孔,这种创新结构不仅减少了制造的工艺复杂性,而且增强了 SPR 效应的耦合,产生了卓越的性能。我们在传感器表面沉积了 ITO 薄膜,采用有限元法(FEM)数值分析对光纤结构指标进行初步优化,分析结果表明,我们设计的传感器折射率(RI)检测范围从 1.27 到 1.33,最大波长灵敏度可以达到 25,000 nm/RIU,分辨率为 4.0 × 10⁻⁶ RIU,相应的 FOM 为 226.24 RIU⁻¹。该传感器凭借出色的品质因数与高灵敏度,在生物医学,工业检测等领域展现出卓越的检测能力,其实际应用显著提升了分析物折射率检测的准确性与效率,对推动光纤传感器的研究进展具有重要价值。

2. 理论与模型

2.1. 模型结构

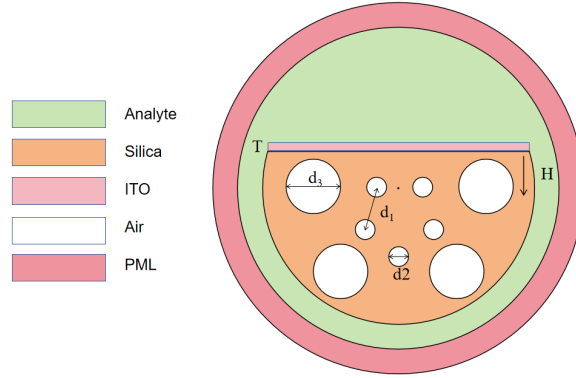


Figure 1. Cross-sectional structure of the D-shaped PCF-SPR sensor
图 1. D 型 PCF-SPR 传感器的横截面结构

图 1 显示 D 型 PCF-SPR 的横截面结构, 内部五边形气孔排布, 气孔的间隔是 d_1 和气孔直径是 d_2 , 外面是 4 个圆形大气孔, 气孔直径是 d_3 , 气孔与气孔夹角 60 度, 外部上面气孔距离圆心 $5 \mu\text{m}$, 下面气孔距离圆心 $6.6 \mu\text{m}$ 。传感器的包层有二氧化硅(SiO_2), 其折射率由 Sellmeier 方程决定[4]:

$$n_{(\lambda)}^2 = \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - B_1^2} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - B_2^2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - B_3^2} + 1 \quad (1)$$

其中, λ 表示以微米为单位的入射光的波长, 而 Sellmeier 色散系数由参数 $A_1 = 0.6961663$ 、 $A_2 = 0.4079426$ 、 $A_3 = 0.8974794$ 、 $B_1 = 0.0684043 \mu\text{m}$ 、 $B_2 = 0.1162414 \mu\text{m}$ 和 $B_3 = 9.896161 \mu\text{m}$ 表示。

本研究使用 ITO 薄膜, 作为一种透明导电氧化物, 具备优良的近红外等离子体响应、宽带隙、高透光性、化学稳定性和无毒性。ITO 薄膜厚度选择 $T = 50 \text{ nm}$, ITO 的介电常数使用 Drude-Lorentz 色散模型[5]确定:

$$\varepsilon_m(\lambda) = \varepsilon_\infty - \frac{\lambda^2 \lambda_c}{\lambda_p^2 (\lambda_c + i\lambda)} \quad (2)$$

Drude-Lorentz 模型参数对于高频介电常数被给出为 $\varepsilon_\infty = 3.80$, 对于等离子体波长被给出为 $\lambda_p = 5.6497 \times 10^{-7} \text{ m}$, 并且对于 ITO 的碰撞波长被给出为 $\lambda_c = 1.121076 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。

PCF-SPR 传感器结构的传感性能通过研究分析限制损耗来评估, 该限制损耗使用以下的方程[6]计算:

$$\alpha_{\text{loss}} (\text{dB/cm}) = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} \times \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^4 \quad (3)$$

其中 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 表示芯模的有效折射率的虚部, 这表明传感器的损耗与基模的 RI 有直接联系。

波长灵敏度是评价 SPR 传感器性能最常用的指标之一, 用于描述共振波长随外界折射率变化的程度。当外界折射率发生变化时, 共振波长会发生移动。若共振波长变化越明显, 则说明传感器对折射率变化越敏感, 波长灵敏度越高。波长灵敏度定义为[7]:

$$S(\lambda) = \frac{\Delta \lambda_{\text{peak}}}{\Delta n} \quad (4)$$

其中, $\Delta \lambda_{\text{peak}}$ 是共振波长变化量, 单位是 nm , Δn 为待测介质折射率变化量, 波长灵敏度的单位为 nm/RIU 。

分辨率用于描述传感器能够检测到的最小折射率变化, 是衡量检测精度的重要参数。分辨率可表示为[8]:

$$R = \frac{\Delta\lambda_{\min}}{S} \quad (5)$$

通常情况下, $\Delta\lambda_{\min}$ 设置为 0.1 nm, 分辨率单位是 RIU。

品质因数是评价传感器综合性能的重要指标, 它不仅考虑灵敏度, 还考虑共振峰的损耗峰的半高全宽(FWHM)。品质因数定义为[9]:

$$\text{FOM} = \frac{S(\lambda)}{\text{FWHM}} \quad (6)$$

品质因数单位是 RIU⁻¹。共振峰越窄, 说明传感器的检测精度越高。

2.2. 传感器模场分析

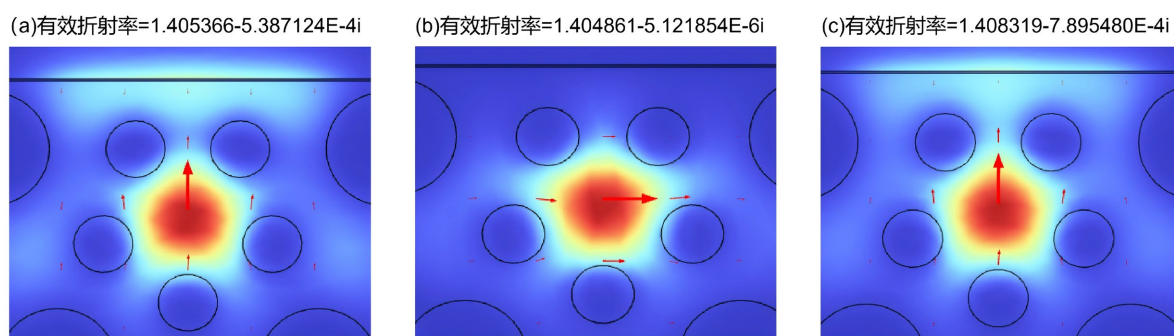


Figure 2. Electric field energy distribution of the fiber core mode at RI = 1.32; (a) x-polarization mode at wavelength 1.70 μm; (b) y-polarization mode at wavelength 1.70 μm; (c) coupled mode at wavelength 1.63 μm

图 2. 折射率为 1.32 时光纤纤芯模式的电场能量分布; (a) 波长 1.70 μm 时的 y 偏振方向模式; (b) 波长 1.70 μm 时的 x 偏振方向模式; (c) 波长 1.63 μm 时的耦合模式

本研究使用 COMSOL Multiphysics 软件仿真, 为了更精细准确得出结果, 我们使用的是细化的网格分布。为了吸收辐射的能量并改进计算, 我们在 PCF 外部建立了一个完美匹配层(PML)。图 2(a)显示了波长为 1.70 μm, RI 为 1.32 时芯模 y 偏振和 x 偏振方向的电场分布和 RI。损耗谱的计算公式(2-21)描绘了限制损耗和虚部之间的正相关关系, 这表明 RI 更高的虚部增加了等离子体共振效应。在 y 偏振方向上观察到了 RI 的最大虚部, 因此, 选择在 y 偏振方向上分析传感器性能参数。图 2(b)显示了波长为 1.63 μm 的 y 偏振耦合模式的电场图。

图 3 描绘了分析物 RI = 1.33 时的芯模和 SPP 膜的限制损耗和色散之间的关系。在图 3 中红线表示 y 偏振方向上有效 RI 的实部, 黑线表示 SPP 模式的有效 RI 的实部。共振条件下, 芯模和 SPP 模的有效 RI 数值相等时出现明显尖锐的损耗峰, 在这个相位匹配点, 导致能量损耗从芯模最大传输到 SPP 模。由于它们的传播常数不同, 这种独特相互作用导致了不同的共振波长。从波长 1.60 到 1.90 μm 蓝线表示了 y 偏振方向上芯模的限制损耗, 限制损耗随着波长增加而增加, 在共振波长处达到峰值, 随后随着波长增加而减小。

3. 传感器优化

3.1. 传感器抛光深度优化

图 4(a)展示了不同抛光深度(H = 1.70、1.75 和 1.80 μm)下, 在分析物折射率为 1.32 和 1.33 时核心模

式的损耗光谱。可观察到抛光深度的变化显著影响共振波长与损耗峰值的幅度。随着抛光深度增加, 共振波长逐渐向长波方向偏移, 呈现明显的红移现象。这是因为抛光深度增加增强了芯模与 SPP 模式的相互作用, 从而改变了两者间的相位匹配条件。同时, 损耗峰强度随抛光深度显著增强。这表明更厚抛光深度能够促进芯模与 SPP 模之间的强耦合, 使更多光能从光纤芯内部转移至金属-介质界面。由此导致表面等离子体共振效应更显著, 在共振波长处产生更高损耗。

为进一步评估不同抛光深度下传感器的性能, 计算了波长灵敏度与 FOM, 结果如图 4(b)所示。可清晰地观察到波长灵敏度与 FOM 均随抛光深度增加而增加。具体而言, 当抛光深度设定为 1.70、1.75 和 1.80 μm 时, 对应的波长灵敏度分别为 6000、7400 和 9000 nm/RIU 。同时, FOM 从 33.33 RIU^{-1} 提升至 51.51 RIU^{-1} 。观测到的灵敏度提升可归因于更大抛光深度诱导的强等离子体耦合效应。通过对灵敏度与 FOM 的综合评估, 发现 1.80 μm 抛光深度时灵敏度与 FOM 最大。因此选择 $H = 1.80 \mu\text{m}$ 作为传感器的最优抛光深度。

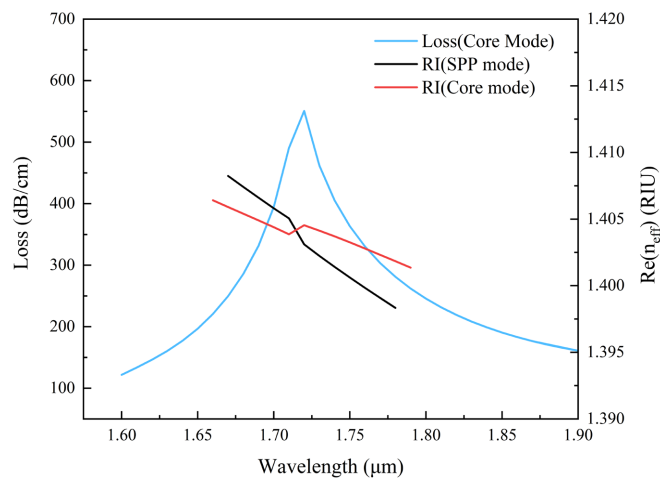


Figure 3. Relationship between confinement loss of core mode and SPP mode and RI

图 3. 芯模和 SPP 膜的限制损耗和 RI 之间的关系

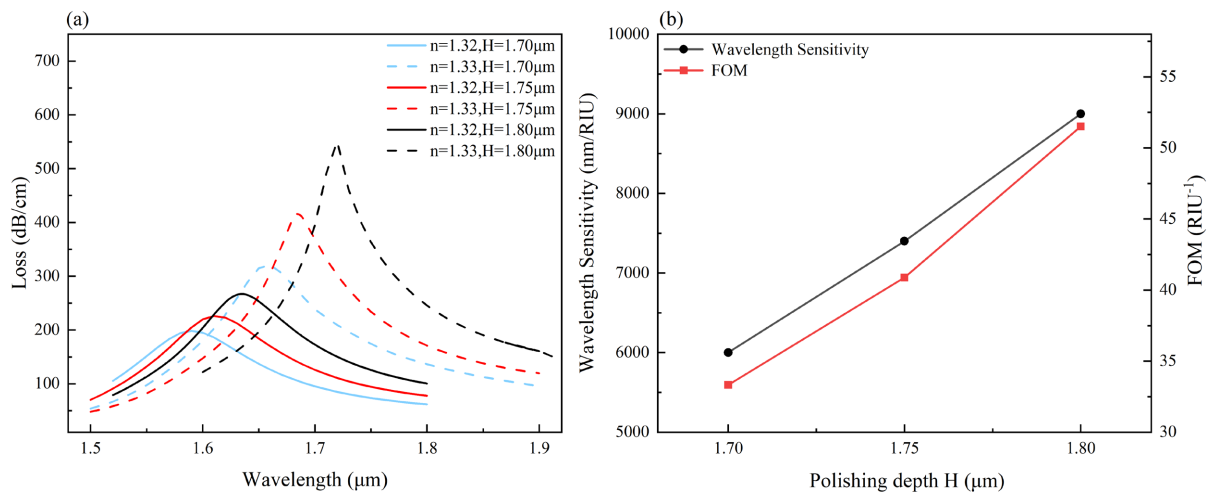


Figure 4. Influence of different polishing depths $H = 1.70, 1.75,$ and $1.80 \mu\text{m}$ at RIs of 1.32 and 1.33; (a) analyte loss spectra; (b) WS and FOM

图 4. 折射率为 1.32 和 1.33 时, 不同抛光深度 $H = 1.70, 1.75, 1.80 \mu\text{m}$ 的影响; (a) 待测物损耗光谱; (b) 波长灵敏度与品质因数

3.2. 气孔间隔优化

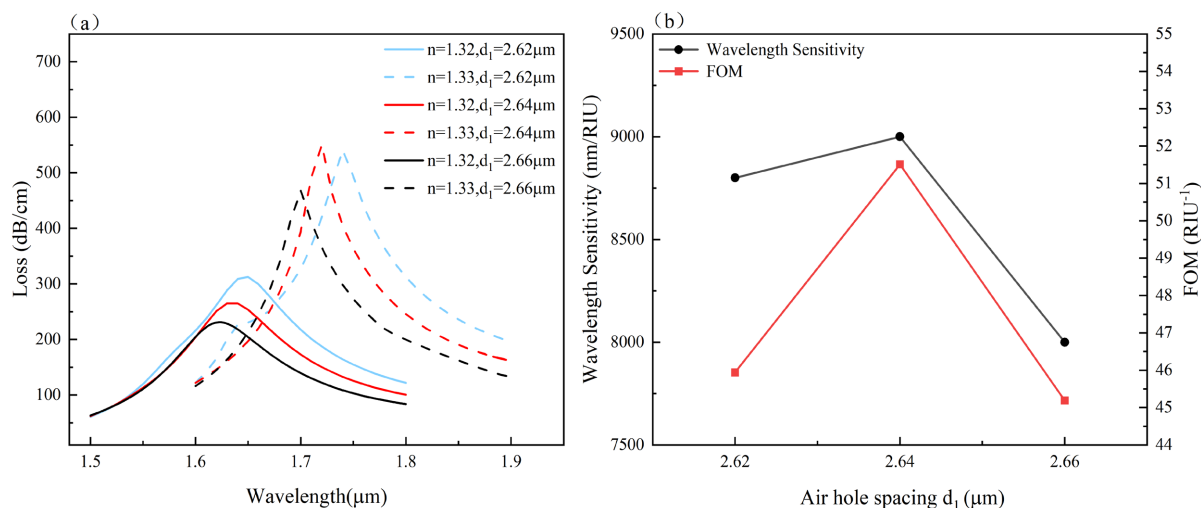


Figure 5. Influence of different air hole spacings $d_1 = 2.62, 2.64,$ and $2.66 \mu\text{m}$ at RIs of 1.32 and 1.33; (a) analyte loss spectra; (b) WS and FOM

图 5. 折射率为 1.32 和 1.33 时, 不同空气孔间隔 $d_1 = 2.62、2.64、2.66 \mu\text{m}$ 的影响; (a) 待测物损耗光谱; (b) 波长灵敏度与品质因数

图 5(a)展示了在分析物折射率为 1.32 和 1.33 时, 不同内部空气孔间距($d_1 = 2.62、2.64$ 和 $2.66 \mu\text{m}$)的核心模式的损耗光谱。可观察到内部空气孔间距的变化显著影响共振波长和损耗峰值的大小。随着空气孔间距 d_1 增大, 共振波长逐渐向短波方向偏移, 产生明显的蓝移现象。这种偏移源于内部空气孔间距增大改变了芯区有效折射率分布, 进而改变了芯模与 SPP 模间的相位匹配条件。此外, 损耗峰值的大小也随 d_1 变化而变化。当空气孔间距增大时, 光纤芯内光场的约束能力略有改变, 从而影响金属-介质界面处芯模与 SPP 模之间的耦合强度。当 d_1 过小时, 芯模区域光泄漏减小, 导致电磁场与等离子体层的相互作用相对减弱。反之, 当 d_1 过大时, 模式场分布发生偏移, 导致部分光能泄漏至包层区域而非高效耦合至等离子体层, 从而降低有效等离子体耦合效率。

为进一步评估不同结构参数下传感器的性能, 计算了波长灵敏度与 FOM, 如图 5(b)所示。可观察到灵敏度与 FOM 均随 d_1 变化显著波动, 当内部空气孔间距 d_1 设定为 $2.62 \mu\text{m}$ 时, 波长灵敏度达 8800 nm/RIU , FOM 值 45.94 RIU^{-1} 。当 d_1 增至 $2.64 \mu\text{m}$ 时, 波长灵敏度进一步提升至 9000 nm/RIU , FOM 达到最大值 51.51 RIU^{-1} 。然而当 d_1 增至 $2.66 \mu\text{m}$ 时, 波长灵敏度与 FOM 分别降至 8000 nm/RIU 和 45.19 RIU^{-1} 。这些结果表明, 过小或过大的空气孔间距均不利于实现最佳等离子体耦合条件。适中的间距能使芯模与 SPP 膜有强的相互作用。通过对传感参数的综合比较, 内部气孔间距 $d_1 = 2.64 \mu\text{m}$ 展现出最高的波长灵敏度和最大的 FOM, 因此, $d_1 = 2.64 \mu\text{m}$ 被选定为所提 PCF-SPR 传感器的最优结构参数。

3.3. 气孔直径优化

图 6(a)展示了在分析物折射率分别为 1.32 和 1.33 时, 不同内部空气孔直径($d_2 = 1.40、1.45$ 和 $1.50 \mu\text{m}$)的芯模的限制损耗谱。可以看出, 内部空气孔直径的变化显著影响共振波长和损耗峰的强度。随着空气孔直径 d_2 的增大, 共振波长逐渐向长波方向移动, 导致出现明显的红移。限制损耗峰值的大小也随 d_2 的变化而变化。空气孔直径的增大, 更少的电磁场会延伸到 SPP 膜, 从而减弱金属-介质界面附近的倏逝场相互作用。这种相互作用的发生导致了低的限制损耗。

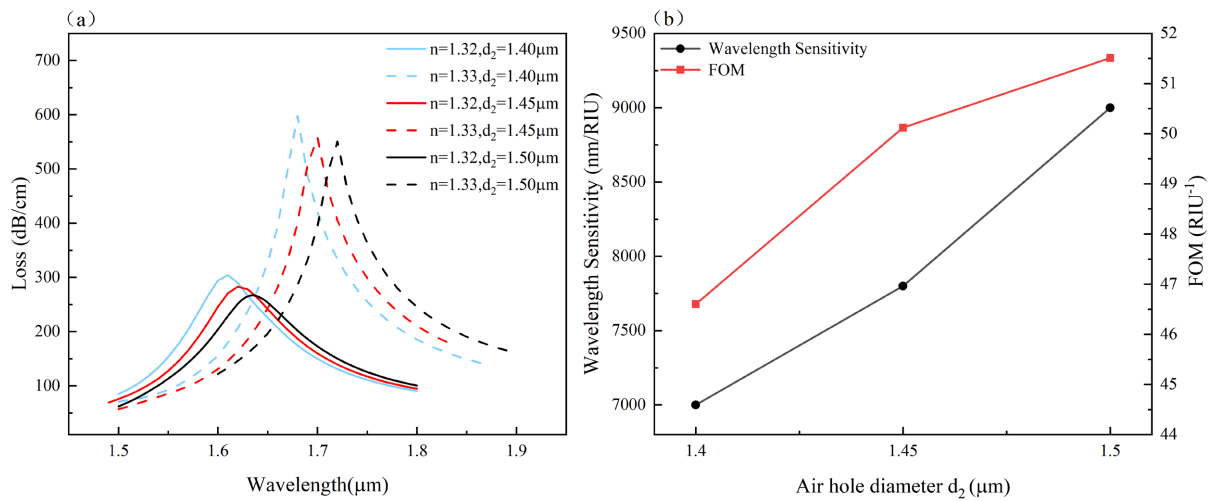


Figure 6. Influence of different air hole diameters $d_2 = 1.40, 1.45,$ and $1.50 \mu\text{m}$ at RIs of 1.32 and 1.33; (a) analyte loss spectra; (b) WS and FOM

图 6. 折射率为 1.32 和 1.33 时, 不同空气孔直径 $d_2 = 1.40, 1.45, 1.50 \mu\text{m}$ 的影响; (a) 待测物损耗光谱; (b) 波长灵敏度与品质因数

为了定量评估所提出的传感器的传感性能, 计算了不同 d_2 值下的波长灵敏度和 FOM, 如图 6(b)所示。当空气孔直径 $d_2 = 1.40 \mu\text{m}$ 时, 波长灵敏度为 7000 nm/RIU , 相应的 FOM 为 46.60 RIU^{-1} 。当 d_2 增大至 $1.45 \mu\text{m}$ 时, 灵敏度提升至 7800 nm/RIU , FOM 也提升至 50.12 RIU^{-1} , 表明传感性能得到改善。当空气孔直径进一步增大至 $1.50 \mu\text{m}$ 时, 波长灵敏度达到 9000 nm/RIU , FOM 也达到最大值 51.51 RIU^{-1} 。因此, $d_2 = 1.50 \mu\text{m}$ 被选为所提出的 PCF-SPR 传感器的最佳内部空气孔直径。

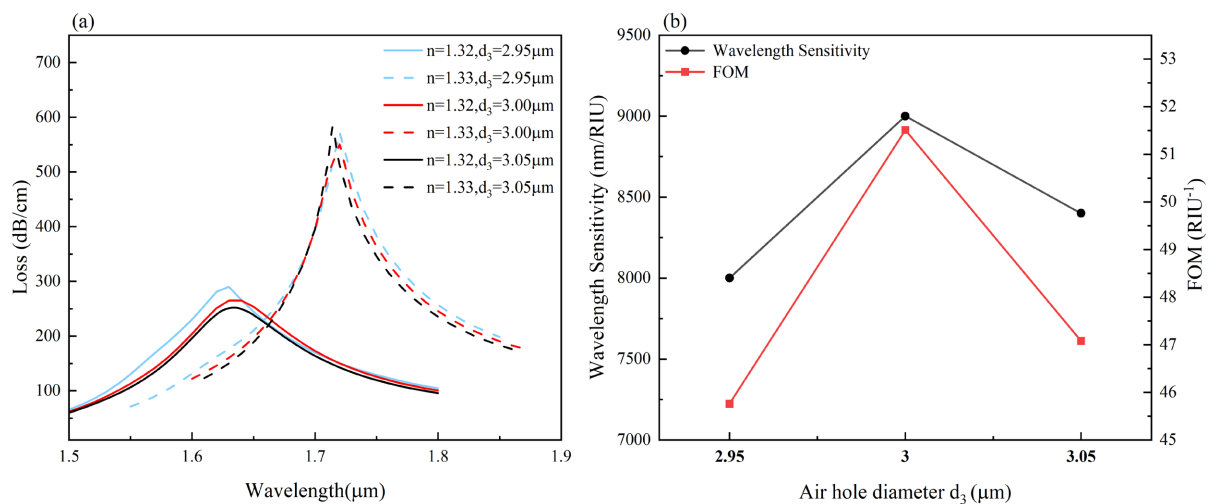


Figure 7. Influence of different air hole diameters $d_3 = 2.95, 3.00,$ and $3.05 \mu\text{m}$ at RIs of 1.32 and 1.33; (a) analyte loss spectra; (b) WS and FOM

图 7. 折射率为 1.32 和 1.33 时, 不同空气孔直径 $d_3 = 2.95, 3.00, 3.05 \mu\text{m}$ 的影响; (a) 待测物损耗光谱; (b) 波长灵敏度与品质因数

图 7(a)展示了在分析物折射率分别为 1.32 和 1.33 时, 不同外层空气孔直径($d_3 = 2.95, 3.00$ 和 $3.05 \mu\text{m}$)的芯模的限制损耗谱。可以看出, 外层空气孔直径的变化对共振波长和损耗峰强度均有影响。与内层空气孔相比, 外层空气孔的主要作用是降低包层区域的有效折射率, 从而增强光场在光纤纤芯内的限制,

并防止光过度泄漏。随着外层空气孔直径 d_3 的增大, 共振波长略有偏移。这种现象可归因于光纤纤芯和包层区域之间有效折射率对比度的变化。增大外层空气孔的直径会提高包层中的空气填充率, 从而有效降低包层区域的等效折射率。因此, 包层结构的约束能力得到增强, 使得芯模能够更有效地被约束在纤芯区域内, 同时仍能保持与等离子体层足够的倏逝场相互作用。

为了定量评估所提出传感器的传感性能, 计算了不同 d_3 值下的波长灵敏度和 FOM, 如图 7(b) 所示。当 $d_3 = 2.95 \mu\text{m}$ 时, 波长灵敏度为 8000 nm/RIU , 相应的 FOM 为 45.76 RIU^{-1} 。当外层空气孔直径增大至 $3.00 \mu\text{m}$ 时, 波长灵敏度提升至 9000 nm/RIU , 同时 FOM 达到 51.51 RIU^{-1} 的最大值, 表明等离子体耦合增强。然而, 当 d_3 进一步增大至 $3.05 \mu\text{m}$ 时, 波长灵敏度略微下降至 8400 nm/RIU , FOM 也降至 47.08 RIU^{-1} 。这些结果表明, 外层空气孔直径在调节包层折射率和控制光泄漏方面起着重要作用。合适的直径可以有效抑制芯模的过度泄漏, 同时保持与等离子体层的强相互作用。综合考虑波长灵敏度和 FOM, 当 $d_3 = 3.00 \mu\text{m}$ 时, 传感性能达到最佳。因此, $d_3 = 3.00 \mu\text{m}$ 被选为所提出的 PCF-SPR 传感器的最佳外空气孔直径。

3.4. ITO 薄膜优化

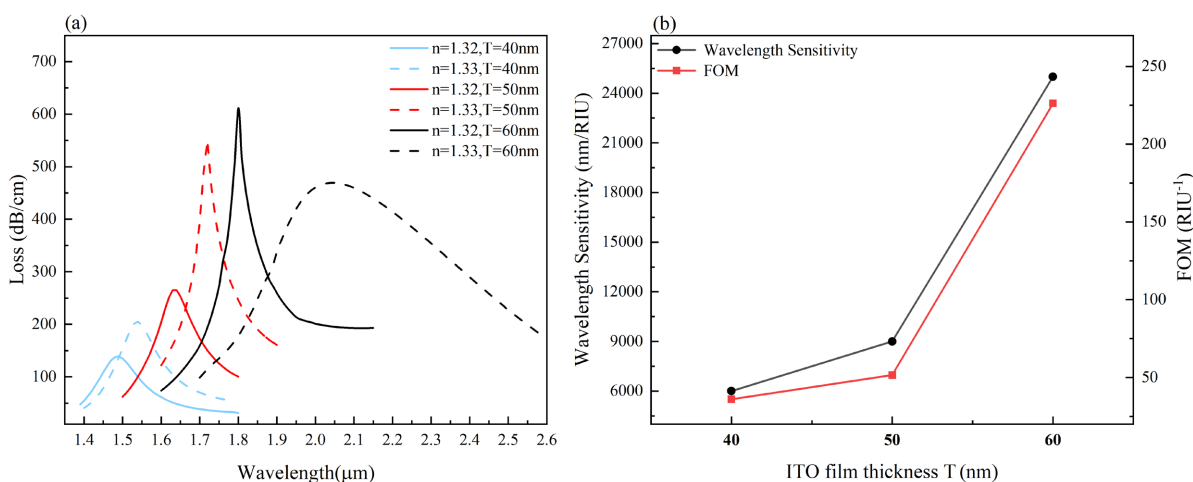


Figure 8. Influence of different ITO film thicknesses $T = 40, 50,$ and 60 nm at RIs of 1.32 and 1.33 ; (a) analyte loss spectra; (b) WS and FOM

图 8. 折射率为 1.32 和 1.33 时, 不同 ITO 厚度 $T = 40, 50, 60 \text{ nm}$ 的影响; (a) 待测物损耗光谱; (b) 波长灵敏度与品质因数

图 8(a) 展示了在分析物折射率分别为 1.32 和 1.33 时, 不同 ITO 薄膜厚度 ($T = 40, 50$ 和 60 nm) 下芯模的限制损耗谱。可以看出, ITO 薄膜厚度的变化显著影响共振波长和损耗峰的强度。随着 ITO 薄膜厚度的增加, 共振波长逐渐向长波方向移动, 导致出现明显的红移。

当 ITO 薄膜 $T = 40 \text{ nm}$ 时, 由于厚度过薄导致等离子体层内自由载流子密度低, 导致芯模与 SPP 模式之间的耦合较弱, 损耗峰较低, 共振响应不明显。当 ITO 厚度增加到 50 nm 时, 芯模与 SPP 膜之间的耦合强度增强。当 ITO 厚度进一步增加到 60 nm 时, 等离子体层厚度足以支持更强的等离子体振荡, 这显著增强了芯模与 SPP 模式之间的耦合强度, 使共振响应更加显著。

为了定量评估传感性能, 计算了不同 ITO 薄膜厚度下的波长灵敏度和 FOM, 如图 8(b) 所示。当 ITO 薄膜厚度 $T = 40 \text{ nm}$ 时, 波长灵敏度 6000 nm/RIU , 相应的 FOM 为 36.03 RIU^{-1} 。当厚度增加到 50 nm 时, 波长灵敏度提高到 9000 nm/RIU , 相应的 FOM 为 47.62 RIU^{-1} 。当 ITO 薄膜厚度进一步增加到 60 nm 时, 波长灵敏度显著提高到 $25,000 \text{ nm/RIU}$, FOM 也上升到 226.24 RIU^{-1} , 表明传感性能得到了显著提升。

这些结果表明, 增加 ITO 薄膜厚度可以增强芯模和 SPP 模式之间的等离子体耦合, 从而增强共振响应并提高传感性能。综合考虑波长灵敏度和 FOM, 当 $T = 60 \text{ nm}$ 时, 传感性能最佳。因此, 选择 $T = 60 \text{ nm}$ 作为所提出的 PCF-SPR 传感器的最佳 ITO 薄膜厚度。

3.5. 传感性能评估

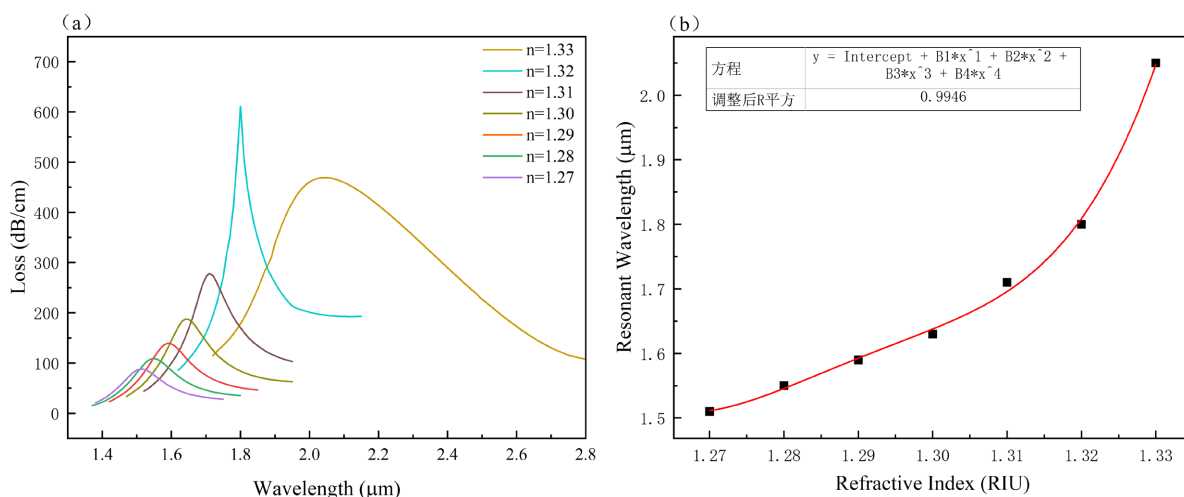


Figure 9. Parameter determination of the designed sensor for RI ranging from 1.27 to 1.33; (a) Loss spectrum of the core mode; (b) Polynomial fitting of the curve correlating resonance wavelength and analyte RI

图 9. 所设计传感器在折射率 1.27 到 1.33 范围内的参数测定; (a) 纤芯模式的损耗光谱; (b) 共振波长与待测物折射率相关曲线的多项式拟合

图 9(a) 显示选择 ITO 膜后各种 RI 下芯模的损耗光谱, 损耗峰的共振波长随着折射率的增加逐渐红移。在分析物 RI 在 1.27 和 1.32 之间的范围内, 波长灵敏度最大可以达到 $25,000 \text{ nm/RIU}$, 确定传感器的分辨率为 $4.0 \times 10^{-6} \text{ RIU}$, 相应的 FOM 为 226.24 RIU^{-1} 。图 9(b) 是遍及传感器的整个 RI 检测范围的共振波长的拟合曲线, 拟合曲线的斜率显示了我们提出的 PCF-SPR 传感器的灵敏度, 六次拟合调整后, 拟合的 R 平方值为 0.9946, 表明一致性良好。在表 1 中, 我们比较了我们的传感器和最近报道的 D 形光纤传感器的检测性能。与现有传感器相比, 我们的传感器在波长灵敏度、分辨率和各种其他方面都有显著进步。

Table 1. Assessment of sensor performance in contrast to recent findings

表 1. 与近期研究成果对比的传感器性能评估

结构材料	折射率范围(RIU)	最大波长灵敏度(nm/RIU)	分辨率(RIU)	引用
ITO	1.19~1.29	10,700	9.9×10^{-6}	[10]
Au	1.26~1.33	16,400	6.09×10^{-6}	[11]
Cu	1.31~1.36	7300	1.36×10^{-5}	[12]
Silver-TiO ₂	1.34~1.38	11,000	9.09×10^{-6}	[13]
本文结构	1.27~1.33	25,000	4.0×10^{-6}	

4. 结论

本文设计了一种创新的 PCF-SPR 传感器, 传感器结构简单, 简化了制作工艺的复杂性。传感器采用 ITO 薄膜材料作为等离子体层, 芯内的能量限制主要通过内部五个正五边形结构的圆形空气气孔限制,

而外层中空气孔不仅限制了一部分能量逸出将其集中到 PCF 核心内以防止泄漏, 而且还起到低折射率包层的作用。结构与材料的组合大大提高了传感器的灵敏度和检测能力。我们通过有限元分析法, 全面评估了各种结构参数如何影响传感器的 RI 传感效率。所提出的传感器从 1.27 到 1.33 的 RI 检测范围, 最大灵敏度可以达到了 25,000 nm/RIU, 分辨率为 4.0×10^{-6} RIU, 以及品质因子为 226.24 RIU^{-1} 。该传感器简单的设计、高灵敏度和精确的检测能力是其主要优势, 表明其对生物医学和其他领域的进步发展具有重大的潜力。

参考文献

- [1] Ritchie, R.H. (1957) Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films. *Physical Review*, **106**, 874-881. <https://doi.org/10.1103/physrev.106.874>
- [2] Singh, S. and Prajapati, Y.K. (2023) Novel Bottom-Side Polished PCF-Based Plasmonic Biosensor for Early Detection of Hazardous Cancerous Cells. *IEEE Transactions on NanoBioscience*, **22**, 647-654. <https://doi.org/10.1109/tnb.2023.3233990>
- [3] Chen, X., Xia, L. and Li, C. (2018) Surface Plasmon Resonance Sensor Based on a Novel D-Shaped Photonic Crystal Fiber for Low Refractive Index Detection. *IEEE Photonics Journal*, **10**, 1-9. <https://doi.org/10.1109/jphot.2018.2790424>
- [4] Tian, M., Li, J. and Meng, F. (2023) Independent Measurement of Refractive Index and Temperature Using D-Gapped Dual-Channel Structure in a Photonic Crystal Fiber. *Optical and Quantum Electronics*, **55**, Article No. 301. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-04616-z>
- [5] Kaur, V. and Singh, S. (2020) Design of D-Shaped PCF-SPR Sensor with Dual Coating of ITO and ZnO Conducting Metal Oxide. *Optik*, **220**, Article ID: 165135. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165135>
- [6] Luo, B., An, M., Hu, T. and Jia, H. (2023) Design of a Novel D-Shaped SPR Sensor with High Sensitivity Based on PCF for Ultra-Low Refractive Index Detection. *Laser Physics*, **33**, Article ID: 115101. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/acee5c>
- [7] Zhu, M., Yang, L., Lv, J., Liu, C., Li, Q., Peng, C., et al. (2022) Highly Sensitive Dual-Core Photonic Crystal Fiber Based on a Surface Plasmon Resonance Sensor with Gold Film. *Plasmonics*, **17**, 543-550. <https://doi.org/10.1007/s11468-021-01543-1>
- [8] An, G., Hao, X., Li, S., Yan, X. and Zhang, X. (2017) D-Shaped Photonic Crystal Fiber Refractive Index Sensor Based on Surface Plasmon Resonance. *Applied Optics*, **56**, 6988-6992. <https://doi.org/10.1364/ao.56.006988>
- [9] Melwin, G. and Senthilnathan, K. (2020) High Sensitive D-Shaped Photonic Crystal Fiber Sensor with V-Groove Analyte Channel. *Optik*, **213**, Article ID: 164779. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164779>
- [10] Yang, Z., Xia, L., Li, C., Chen, X. and Liu, D. (2019) A Surface Plasmon Resonance Sensor Based on Concave-Shaped Photonic Crystal Fiber for Low Refractive Index Detection. *Optics Communications*, **430**, 195-203. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.08.049>
- [11] Pan, H., Cao, C., Zhang, A., Pan, F., Sui, P. and Liu, X. (2022) A High Sensitivity Localized Surface Plasmon Resonance Sensor Based on D-Shaped Photonic Crystal Fiber for Low Refractive Index Detection. *Optoelectronics Letters*, **18**, 425-429. <https://doi.org/10.1007/s11801-022-1193-8>
- [12] Ramani, U., Kumar, H., Singh, B.K. and Pandey, P.C. (2020) Study of Highly Sensitivity Metal Wires Assisted Photonic Crystal Fiber Based Refractive Index Sensor. *Optical and Quantum Electronics*, **52**, Article No. 521. <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02658-1>
- [13] Wu, B., Chen, H., Chen, Q., Yin, Z. and Wang, C. (2023) Highly Sensitive Refractive Index Sensor Based on TiO₂/Ag Films Coated D-Type Photonic Crystal Fibers. *Optical and Quantum Electronics*, **55**, Article No. 858. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-05149-1>