

基于表面等离子体共振效应的光子晶体光纤传感器的研究

——D型光子晶体光纤

温 祥

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2025年4月21日; 录用日期: 2025年6月12日; 发布日期: 2025年6月20日

摘 要

光子晶体光纤(Pohotonic Crystal Fiber, PCF)作为一种新型的光纤传感结构, 在光纤通信等领域展示了其重要的应用价值。其独特的周期性结构设计能够有效调控光的传播特性, 打破了传统光纤在纤芯尺寸、折射率均匀性等基本参数上的限制, 从而实现了超高的光传播效率和优异的非线性性能, 为高功率光纤激光器、超连续光源等关键领域提供了理想的光学平台。PCF的光学特性和高性能源于其严格的结构设计, 这种周期性的微型结构使其具备了强大的波导效应和色散控制能力。然而, 由于PCF的复杂结构特性决定了其光学性能对其结构参数具有高度敏感性, 因此直接通过实验手段制备不同结构的PCF并进行性能测试已不具备高效性和普适性。这种方法不仅耗时费力, 难以全面探究PCF结构参数与光学性能之间的内在关系, 且容易陷入局部最优而忽视全局优化的困境。因此, 研究者必须建立科学的理论模型和数值仿真方法, 通过计算机辅助设计和计算模拟来系统分析PCF在不同背景材料、空气孔分布特征、空气孔尺寸和孔间距等关键参数下的光学性能演变规律。基于表面等离子体共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)效应, 本文设计了一种高灵敏度的D型光子晶体光纤传感器, 其由上下两个大空气孔和左右两个小空气孔组成纤芯, 并在纤芯左右两边设计两个更大的空气孔来加强传感性能。首先对传感器的模场进行分析, 交代了基模和SPP模在发生共振时的关系, 并展示了发生SPR现象时的损耗谱, 其次讨论了不同结构参数对传感性能的影响, 主要讨论了金属膜的厚度和金属膜的材料对传感性能的影响, 确定了最优的参数, 得到了在1.36~1.40的检测范围内, 灵敏度为6110 nm/RIU, 分辨率为 1.6367×10^{-5} RIU的D型PCF-SPR传感器。

关键词

光子晶体光纤, 表面等离子体共振, 模拟仿真, 灵敏度, 分辨率

Research on Pohotonic Crystal Fiber Sensors Based on SPR Effect

—D-Type Pohotonic Crystal Fiber

Xiang Wen

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

Received: Apr. 21st, 2025; accepted: Jun. 12th, 2025; published: Jun. 20th, 2025

Abstract

Pohotonic Crystal Fibre, PCF serves as a novel type of optical fibre structure to show significant technical advantages in the field of optical communication. To its unique periodic structural design serves to effectively control the propagation characteristics of light, thus achieving ultra-high efficiency in light propagation and also possessing excellent nonlinear performance, which provide an ideal optical platform for key fields such as high-power laser fibre lasers, super-continuum light sources, etc. The optical characteristics of PCFs are fundamentally due to their precise structural designs. This periodic microstructure imparts PCFs with robust wave guiding effects and advanced dispersion control capabilities. However, due to the complex structural characteristics of PCFs, their optical performance is highly sensitive to specific structural parameters. Achieving this through conventional experimental methods is not efficient or universal. This approach is not only time-consuming and resource-intensive, making it difficult to comprehensively investigate the intrinsic relationships between PCF structural parameters and their optical performance, and it often leads to local optimizations at the expense of overlooking broader global optimizations. Achieving this requires establishing robust theoretical models and numerical simulation methodologies, supported by computer-aided design and computational simulations, to systematically analyze the optical performance evolution of PCFs under various key parameters such as background materials, air hole distribution characteristics, air hole dimensions, and inter-pore spacing. Based on the surface plasmon resonance (SPR) effect, this article designs a high-sensitivity D-type pohotonic crystal fiber (PCF) sensor was designed, which is composed of two large air holes on the top and bottom and two small air holes on the left and right. Additional larger air holes were strategically placed on both sides of the fiber core to enhance sensing performance. Firstly, a detailed analysis of the mode field in the sensor was conducted. This analysis provided insights into the relationship between the base mode and surface plasmon resonance (SPR) mode during resonance, while demonstrating the loss spectrum at the occurrence of the SPR phenomenon. Subsequently, an extensive discussion on the impact of various structural parameters on sensing performance was carried out. The primary focus was on how the thickness and material choice of the metal layer affect the sensor's sensitivity and resolution. Optimal parameters were identified through this analysis. As a result, in the detection range spanning from 1.36 to 1.40 RIU (Refractive Index Units), the D-type PCF-SPR sensor achieved an impressive sensitivity of 6110 nm/RIU with a resolution of 1.6367×10^{-5} RIU, showcasing its high performance and reliability in sensing applications.

Keywords

Pohotonic Crystal Fiber (PCF), Surface Plasmon Resonance (SPR), Simulation, Sensitivity, Resolution

Copyright © 2025 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**

1993 年, Jorgenson 第一次提出了光纤型 SPR (光栅式传感器) 传感器后[1], 该领域的研究兴趣持续升

温。基于 PCF (光子晶体光纤) 结构的设计灵活性为 SPR 传感器的开发提供了广阔的创新空间, 从而涌现出了多种新型 SPR-PCF 传感器[2]-[6]。尽管这些传感器在性能上存在差异, 但其设计趋势始终围绕两个关键指标展开: 高灵敏度和高分辨率, 以及结构上的简单性与易于拉制性。从最初的空气孔内壁镀膜技术到嵌入式金属纳米线的引入, 再到外镀层工艺的简化应用, 随着制造技术的不断进步, SPR-PCF 传感器的设计理念不断革新, 出现了更加大胆且易行的构造方式。例如, 在提高传感器灵敏度方面, 研究者们通过在外层镀多层等离子体激发材料(如银/石墨烯、金/Ta₂O₅) [7]等方式显著提升了性能。然而, 这种多层镀膜工艺的在微结构光纤中实现均匀沉积的过程也面临着较为复杂的制造挑战。

本文设计了一种高灵敏度的 D 型光子晶体光纤传感器, 首先其由上下两个大空气孔和左右两个小空气孔组成纤芯, 并在纤芯左右两边设计两个更大的空气孔来加强传感性能, 这样设计的好处是金属材料离光纤纤芯区域不会过于近, 假如太近的话会导致表面等离子体共振现象十分强烈, 使得光在光纤中的传输损耗相对较高。为实现金属膜的均匀沉淀, 本结构不采用多种等离子体材料组合激发的方式, 只采用单一金属材料作为 SPR 效应的激发材料。其次, 设计 D 型传感器结构可以使金属膜镀在光纤结构的外层, 大幅降低了镀膜过程的复杂程度, 此外将待测液体通道放置在外层区域, 这样可以大大简化操作流程, 还可以减小多纤芯结构之间的干扰, 降低检测难度。利用上一章提到的损耗谱分析法, 分析金属膜厚度和不同金属材料对传感器性能的影响, 并对其传感性能进行评估, 以得到最优的分辨率和灵敏度。

2. 理论模型

为降低传输损耗而设计的 D 型光子晶体光纤传感器其截面结构如图 1 所示, 其最外层由正六边形的空气孔组成, 纤芯区域由左右两个小空气孔包围而成, 使通过纤芯区域的光更容易到达金属膜, 加强 SPR 效应, 并在纤芯左右设计了两个大空气孔, 有效的限制了入射光能量的泄露, 结构中小气孔半径 r_1 为 0.25 μm , 外层正六边形气孔半径 r_2 为 0.5 μm , 大空气孔半径 r_3 为 0.8 μm , 气孔排列的周期 A 为 2 μm , 光线半径 D 为 2.975 μm , D 型切割高度 h 为 2.6 μm , 金属膜厚度以 m 代表单位为 nm , 光纤的最外层以完美匹配层(PML)为边界条件来使结果更加精准, 整个结构以熔融石英为背景材料。在数值模拟过程中, 熔融石英材料的折射率与其入射光波长有相关。为了确保测量的准确性和可靠性, 同时考虑了温度对其折射率变化的影响因素, 由此熔融石英的折射率方程[8]表示为:

$$n^2(\lambda, T) = (1.31552 + 0.690754 \times 10^{-5} T) + \frac{(0.788404 + 0.235835 \times 10^{-4}) \lambda^2}{\lambda^2 - (0.0110199 + 0.584758 \times 10^{-6} T)} + \frac{(0.91316 + 0.548368 \times 10^{-6} T) \lambda^2}{\lambda^2 - 100} \quad (1)$$

式中 λ 表示入射波长, 其单位为 μm , 可以得出熔融石英的折射率和入射光的波长之间是非线性相关的, 为了使计算结果更逼近实际情况, 式中的温度 T 取室温(298.15 K, 25°C)。

待测介质与金属膜组成的 SPR 激发部分, 首先选用金来做激发材料, 其介电常数和入射波长之间的关系可以用 Drude 模型[9]表示:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\omega_c)} \quad (2)$$

式中 ω_c 代表电子的碰撞频率, ω_p 代表金属材料中等离子体的振荡频率, ω_∞ 代表金属处于高频极限时的介电常数, 因为选用金, 取 $\omega_c = 1.45 \times 10^{14}$, $\omega_p = 1369 \times 10^{16}$, $\omega_\infty = 9.75$

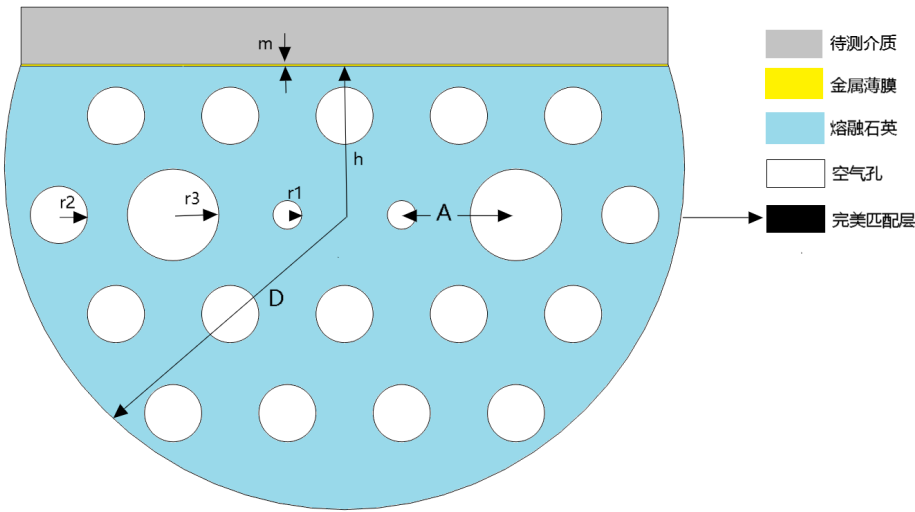


Figure 1. Cross-sectional view of the D-type photonic crystal optical fiber sensor
图 1. D 型光子晶体光纤传感器的截面图

3. 传感器的特性研究

3.1. 传感器的模场分析

在 PCF 结构中传输的光在金属与介质交界面处激发表面等离子体波(Surface Plasmons Waves, SPW), 从而形成表面等离子体模式。当与其基模之间达到相位匹配条件时, 这种相互作用将被充分激活并增强, 进而触发 SPR。而传感器的设计目标则是通过强化这种相互作用机制, 从而提升传感器的性能和灵敏度。外层正六边形排列的气孔可以把光有效的限制在纤芯区域内传播, 还可以降低有效折射率来实现基模与等离子体模的相位匹配, 而纤芯左右两边的大气孔更是强化了这种效果, 限制作用越强, 光泄露到包层的能量就越小, 耦合作用就越强。**图 2** 显示了 D 型光子晶体光纤传感结构产生的基模和等离子体模的模场分布, 此时待测介质 $n_a = 1.36$, 金膜厚度 $m = 30 \text{ nm}$, 可以从基模图中看出, 光被很好的束缚在了纤芯区域, 场强也集中在纤芯区域, 从等离子体模图中可以看出, 其主要产生于待测介质和金膜的交界面, 其场强也集中在交界面处。

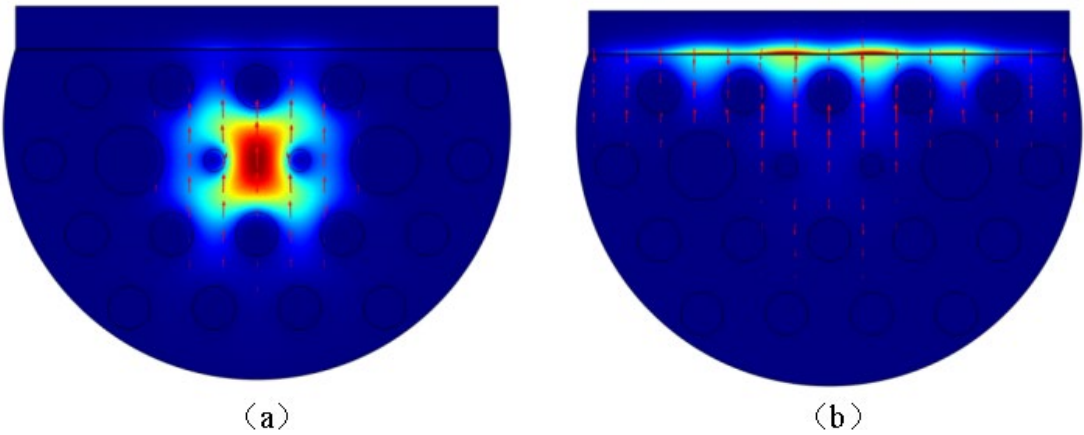


Figure 2. Electric field distribution mode: (a) Fundamental mode (b) Plasma mode; The arrows on the surface indicate the direction of the electric field
图 2. 模场分布: (a) 基模 (b) 等离子体模; 表面箭头表示电场方向

两种光子晶体的模态实现相位匹配的条件是其波矢常数的模值要相近,即它们的有效折射率的实部要趋近。如图 3(a)所示,红色线条表示 SPP 模的有效折射率和波长之间的关系,黑色线条表示基模的有效折射率和波长的关系,可以看到,两条曲线在入射波长为 620 nm 时实现相交,代表此时两种模式实现了相位匹配。基于相位匹配原理所引发的表面等离子体共振(SPR)现象,使得纤芯部分的光能被转移至金属和待测介质交界面区域,同时导致光纤的纤芯能量出现衰减。如图 3(b)所示,纤芯的损耗谱在波长为 620 nm 时出现了明显的损耗峰,这进一步证明了 SPR 现象的发生。

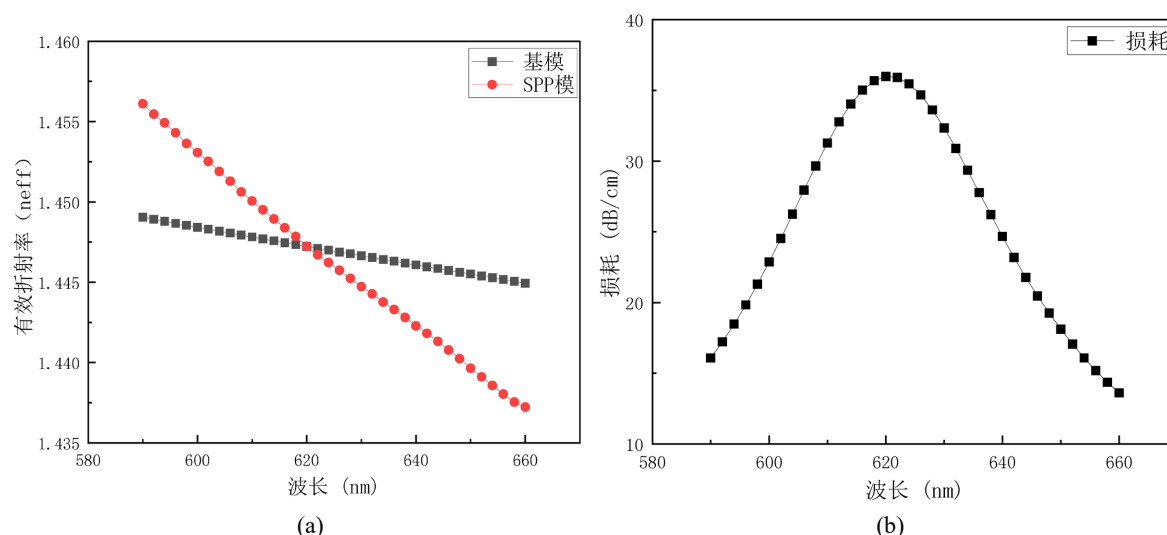


Figure 3. (a) The relationship between the real part of the effective refractive index of the fundamental mode and the plasma mode and the wavelength (b) The relationship between loss spectra and wavelengths

图 3. (a) 基模和等离子体模有效折射率实部和波长的关系 (b) 损耗谱和波长的关系

在 PCF-SPR 传感器中,不止存在一种 SPP 模式,同样存在一些高阶 SPP 模式,也被称之为伪模式,高阶等离子体模的有效折射率实部同样可以与基模相交,从而实现相位匹配;然而,每个等离子体模的相位匹配条件(即对应波长)均存在独特性,由此可知,各等离子体模式之间存在一定差别。尽管高阶表面等离子体模在实现相位匹配过程中确实存在,但由于其本体场相对较弱,导致相互作用也较为微弱,相对于低阶等离子体模所引起的明显损耗峰,高阶模式对整体的损耗影响可被忽略不计。基于上述分析可知,在研究 PCF-SPR 传感器特性时,要重点关注低阶表面等离子体模与其对应的基模之间的共振特性,这样不但可以保证损耗谱的单峰特性,还可以使结果更贴近实际传感时的共振波长,保证测量的精准度。

3.2. 结构参数对传感性能的影响

PCF-SPR 传感器是基于光子晶体光纤(PCF)与表面等离子体相互作用产生的 SPR 效应来实现传感的。通过研究发现,该型传感器的结构参数对其引发及机制具有重要影响;为了优化该型传感器的性能,深入探讨相关参数对共振特性的影响机理具有重要的理论意义和实践价值。在本章设计的传感结构中,主要考虑金属膜的厚度和金属膜的材料这两个因素对传感性能的影响。

3.2.1. 金属膜厚度对性能的影响

表面等离子体波的主要产生区域集中在金属表面,其性质与金属表面自由电子的状态具有密切关联。由此可知,金属膜厚度对表面等离子体波的激发特性表现出显著的影响,这种效应直接关系到 SPR 激发条件的优化。

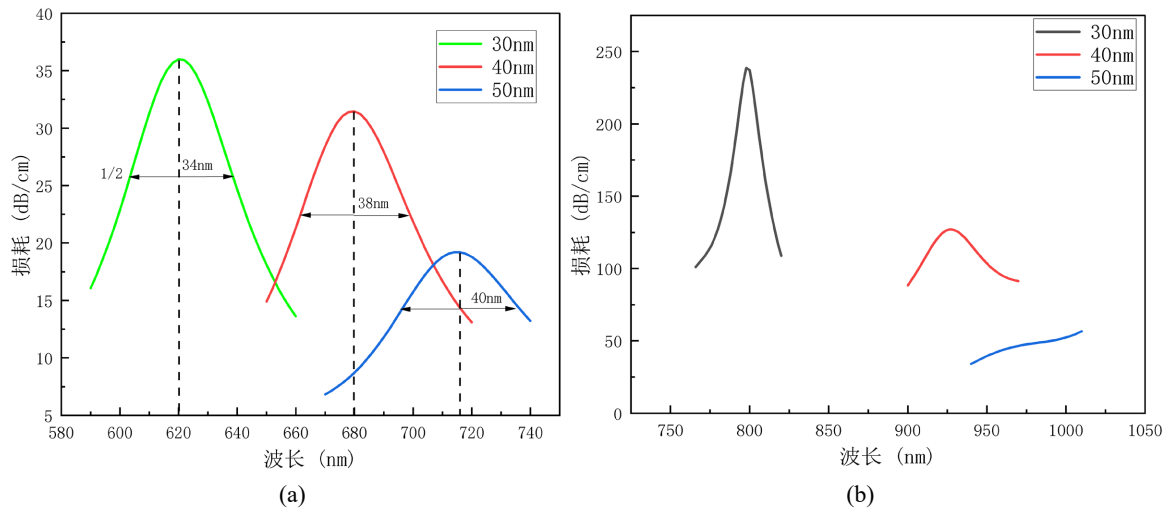


Figure 4. (a) The loss spectrum corresponding to the thickness of the gold film from 30 nm to 50 nm (b) The loss spectrum corresponding to the gold film thickness from 30 nm to 50 nm when the refractive index is 1.40

图 4. (a) 金膜厚度由 30 nm~50 nm 对应的损耗谱 (b) 折射率为 1.40 时金膜厚度由 30 nm~50 nm 对应的损耗谱

图 4(a)展示了待测介质折射率 n_a 为 1.36 时, 金膜厚度从 30 nm 变化到 50 nm 时所对应的损耗谱变化, 可以看到金膜厚度和共振波长之间存在一定的关系, 即随着金膜厚度的减小, 共振峰高度也在降低, 其共振波长向长波长方向发生了偏移; 这是由于金膜的厚度增大时, 表面等离子体模的有效折射率随之增加。这一变化导致等离激元模向较高介电常数方向移动, 即对应图 3(a)中红色直线的斜率增加, 从而导致基模与等离激元模之间交点的位置向长波长方向偏移。在损耗谱中, 这种偏移表现为共振波长的红移; 随着金膜厚度的增加, SPR (表面等离激元共振) 现象的主要激发机制会受到显著影响, 由于金属和待测介质交界面处得到的由纤芯泄漏的能量减少, 导致光在光纤中的能量损失增大, 而难以到达激发 SPR 所需的能量。即从基模泄露到等离激元模的能量不足以激发 SPR 现象, 对应了图中的损耗峰下降, 并且还加剧了整体系统的能量损耗。由此产生的能量损失效应直接降低了传感器的灵敏度, 从而影响其在实际应用中的性能表现。在图 4(a)中还标明了不同金膜厚度所对应损耗谱的半高全宽(Full Width Half Maximum, FWHM), 半高全宽是指损耗谱中峰值为一半时所对应的谱带全宽。FWHM 值的越小表明损耗峰的尖度越尖, 这直接对应着对共振波长确定过程中的高分辨度和高可靠性。因此, 较小的 FWHM 值不仅能够显著提升确定共振波长时的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR), 还能够确保传感系统的准确性和稳定性。从图 4(a)中可以看出, 金膜厚度从 30 nm 增加到 50 nm, FWHM 值从 34 nm 增加到了 40 nm, 也就是说, 金膜厚度的增加会使 FWHM 值的增加, 也就导致了信噪比的下降, 传感器的检测精度也随之下降。

Table 1. The resonant wavelengths of different gold film thicknesses at different refractive indices

表 1. 不同金膜厚度在不同折射率下的共振波长

折射率/厚度	1.36	1.37	1.38	1.39	1.40	变化量
30 nm	620 nm	645 nm	680 nm	726 nm	798 nm	178 nm
40 nm	680 nm	713 nm	760 nm	828 nm	929 nm	249 nm
50 nm	716 nm	755 nm	811 nm	890 nm		174 nm

表 1 列出了不同金膜厚度在不同待测介质 n_a 下的共振波长及其变化量, 可以看到, 在待测介质折射率从 1.36 变为 1.40 的过程中, 共振波长在不断增加, 在折射率保持不变的情况下, 随着金膜厚度的增加, 共振波长也在增加, 可以看出金膜在 40 nm 时共振波长变化量最大, 即灵敏度最大, 具体灵敏度值下节

讨论。而金膜在 50 nm，待测介质为 1.40 时却没有共振波长的数据，这是由于图 4(b)所示的原因：金膜在 50 nm 时，没有出现损耗峰，这表明此时的金膜厚度太厚，SPP 模无法得到基模的能量，导致没有发生 SPR 效应，也就不存在所谓的共振波长。

3.2.2. 金属膜材料对性能的影响

图 5 分别展示了相同厚度下金材料，银材料和铜材料在不同待测介质折射率下损耗与共振波长的关系，通过这三张图可以发现，这三种材料的共振波长都随着待测介质折射率的增加而增大，并且在折射率为 1.40 时达到最大的共振峰，对比三种材料的最大共振峰可以得到，金膜的共振峰在待测介质折射率为 1.40 时最高，这说明了金材料在激发 SPR 效应时，等离子体模从基模获得了更多的能量，使测量精度更准确，这也是选择本文金属膜材料选择金的原因。表 2 展示了不同金属材料在不同折射率下的共振波长及其变化量，在不同材料的选择下，共振波长的变化量也不同，这表明了金属膜材料对共振波长有影响，具体灵敏度在下节进行讨论。

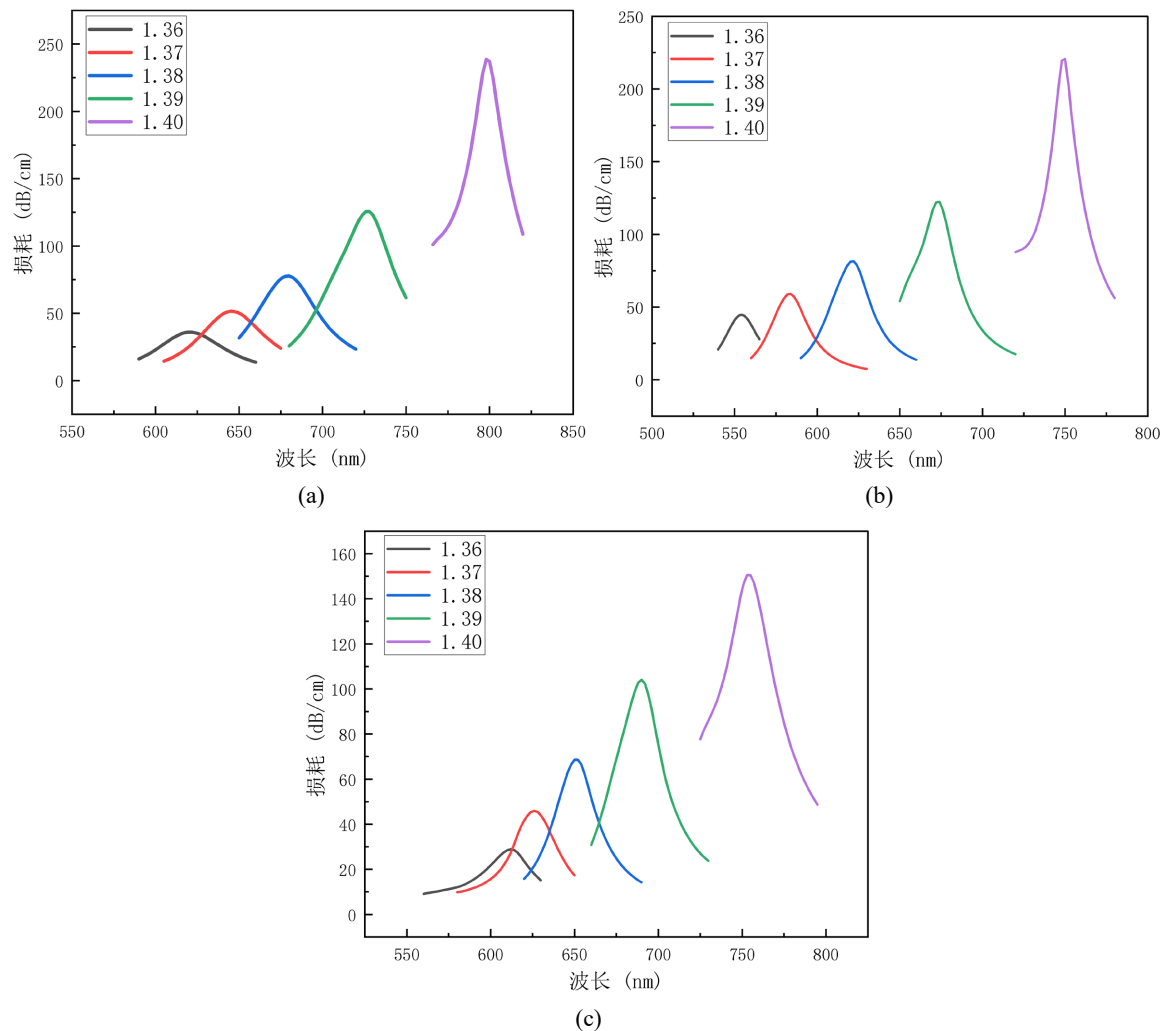


Figure 5. (a) The relationship between the loss of gold films and wavelength under different refractive indices (b) The relationship between the loss of silver films and wavelength under different refractive indices (c) The relationship between the loss of copper films and wavelength under different refractive indices

图 5. (a) 不同折射率下金膜的损耗与波长的关系 (b) 不同折射率下银膜的损耗与波长的关系 (c) 不同折射率下铜膜的损耗与波长的关系

Table 2. The resonant wavelengths of different metallic materials at different refractive indices
表 2. 不同金属材料在不同折射率下的共振波长

折射率/材料	1.36	1.37	1.38	1.39	1.40	变化量
金	620 nm	645 nm	680 nm	726 nm	798 nm	178 nm
银	554 nm	584 nm	622 nm	674 nm	750 nm	196 nm
铜	612 nm	625 nm	652 nm	690 nm	753 nm	141 nm

3.3. 传感性能评估

本文所设计的 PCF-SPR 传感器旨在检测待测介质的折射率 RI。其工作原理基于待测介质折射率对表面等离子体波(SPW)的影响，而这种影响会通过共振条件公式(3)反映到共振波长上。

$$K_{plasma} = \frac{\omega_0}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon_2}} \sin \theta_{spr} \tag{3}$$

θ_{spr} 是发生表面等离子体共振时需要角。

因此，通过对介质折射率与共振波长之间的关系进行分析，即可实现折射率的准确测量。通过上节表 1 可知，金膜在 40 nm 时变化量最大，所以本节选择对 40 nm 的厚度进行研究，图 6 展示了 40 nm 厚度的金膜在不同待测介质折射率下损耗与共振波长的关系，从图中可以得出，在折射率从 1.36 变化到 1.40 时，共振波长由 680 nm 增加到了 929 nm，即发生了共振波长红移现象，与上节得出的结果一至，相应的损耗峰由 31.4512 dB/cm 增加到 127.0308 dB/cm。

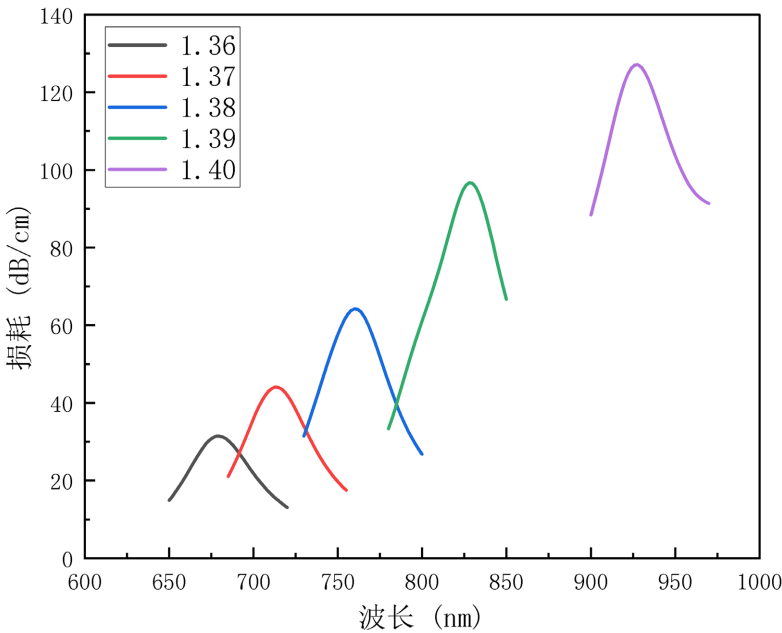


Figure 6. The relationship between the loss of a 40 nm thick gold film and the wavelength under different refractive indices
图 6. 40 nm 厚度的金膜在不同折射率下损耗与波长的关系

对传感性能的评估主要通过“灵敏度”这一指标来进行定量分析。目前，基于 PCF-SPR 传感器的传感检测方法主要包括振幅(相位)检测和波长检测两类；与振幅检测相比，波长检测方式具有更高的灵敏度、更广的测量范围以及更为便捷的操作流程。

基于波长检测原理所提出的测量方法，其波长灵敏度可通过下述公式进行计算：

$$S(\lambda) = \frac{\Delta\lambda_{peak}}{\Delta n_a} (\text{nm/RIU}) \quad (4)$$

式中， $\Delta\lambda_{peak}$ 代表共振波长的变化量， Δn_a 代表介质折射率的变化量。

图 7 为金膜厚度为 30 nm 时共振波长和折射率的关系，图中离散点代表通过模拟分析获得的实际测量数据值，实线则表示基于上述数据计算得到的线性拟合直线。该图中折射率的取值范围为 1.36~1.40，这一区间可被视为传感器的最佳检测范围；当折射率超出此范围时，检测系统的准确度将显著降低，从而对实现精确的折射率检测构成了不利影响。从图中可以看出，当折射率从 1.36 以 0.01 向 1.40 递进时，拟合曲线的线性相关度 R^2 可以达到 1.9590，这个数据非常接近 1，这表明该传感器的性能特征较好，在实现精准检测时，其能够达到较高的准确度水平。拟合线性式可表达为：

$$\lambda(\text{nm}) = 4370 \times n_a - 5336.8 (1.36 \leq n_a \leq 1.40) \quad (5)$$

式中 λ 代表共振波长， n_a 代表待测介质折射率。

根据式 4 和表 1 中的数据可以算出，此时该传感器的灵敏度为 4450 nm/RIU，可以发现其数值和拟合直线的斜率很近似。这是由于数据识别的精确度而导致的误差，通常情况下可以忽略，因此拟合直线的斜率一般就可以近似代表灵敏度。

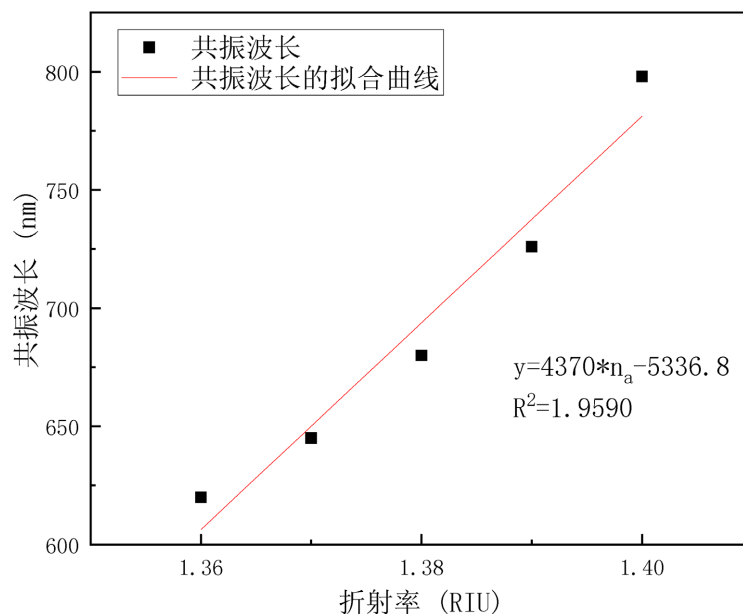


Figure 7. The relationship between the resonant wavelength and the refractive index of a gold film with a thickness of 30 nm
图 7. 30 nm 厚度的金膜共振波长与折射率的关系

上一小节分析了金属膜厚度及金属材料对共振特性的影响，本节则进一步通过对其灵敏度的量化研究，揭示其对传感性能的具体表征机制。图 8(a)展示了不同厚度下金膜的共振波长与折射率的拟合直线，当金膜厚度分别为 30 nm、40 nm、50 nm 时，传感器灵敏度为 4370 nm/RIU、6110 nm/RIU、5900 nm/RIU 可以看出当金膜厚度为 40 nm 时，传感器达到最高的灵敏度。

图 8(b)展示了不同金属材料的共振波长与折射率的拟合曲线，从图中看出，金材料和银材料具有相近的灵敏度，分别为 4370 nm/RIU 和 4820 nm/RIU，而铜材料的灵敏度最低。

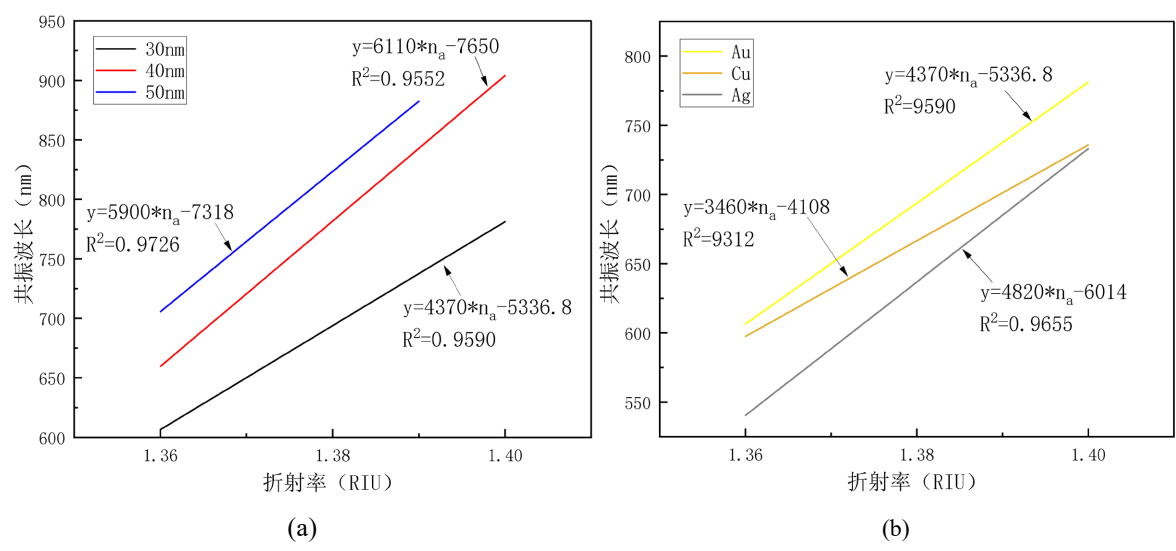


Figure 8. (a) The fitting straight lines of resonance wavelengths and refractive indices of gold films of different thicknesses (b) The fitting straight lines of resonance wavelengths and refractive indices of different metallic materials

图 8. (a) 不同厚度的金膜共振波长与折射率的拟合直线 (b) 不同金属材料的共振波长与折射率的拟合直线

相比之下，银作为基底材料表现出略高于金的灵敏度指标。然而，为确保 SPR 传感器在实际应用中的高精度测量需求，仅具备较高的灵敏度指标是远远不够的。为了实现对介质折射率微小变化的高精度探测，必须同时提升其分辨能力。分辨率可以由下式定义：

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

式中 Δn_a 代表待测介质折射率的变化量， $\Delta \lambda_{\text{peak}}$ 代表共振波长的变化量，分别取 0.01 和表 2 中金和银的数据；通常情况下，取 $\Delta \lambda_{\min}$ 为 0.1 nm，其意义为在进行介质折射率检测时，只有当损耗谱中共共振波长的改变量大于或等于 0.1 nm 时，才能被有效探测到；而当改变量小于 0.1 nm 时，由于检测灵敏度不足，无法识别出这种变化，导致检测系统误判为无变化。这表明在实际应用场景中，当光纤传感器所探测的折射率变化所对应的波长位移小于等于 0.1 nm 时，该检测装置将无法有效识别此变化，从而导致介质折射率测量结果的不准确性。代入数据算得，使用材料金时，分辨率为 2.2883×10^{-5} RIU，使用银时，分辨率为 2.074×10^{-5} RIU，通过比较可以看出，使用金时的分辨率更高，所以综合来看，使用金作为激发材料优势更大。

Table 3. Performance comparison of sensors with different structures

表 3. 不同结构传感器的性能对比

PCF 结构	检测范围(RIU)	灵敏度(nm/RIU)	分辨率(RIU)	文献
正六边形结构	1.33~1.34	2400	N/A	[10]
空心纤芯结构	1.33~1.34	5030	N/A	[11]
垂直双芯结构	1.33~1.37	1000	1×10^{-4}	[12]
两层六角结构	1.33~1.37	4000	2.5×10^{-5}	[13]
方形排列结构	1.38~1.42	7250	1.0638×10^{-5}	[14]
小孔纤芯结构	1.36~1.40	6110	1.6367×10^{-5}	本文结构

为了全面评估本文所设计传感器的性能特征(主要指灵敏度与分辨率),通过多维度的性能对比分析,从三个关键指标对所设计传感器与其他外镀膜结构进行了系统性比较,具体包括对其检测范围、RI 灵敏度以及分辨率等参数的综合评估。本文所设计的 D 型 40 nm 金膜 PCF-SPR 传感器在 1.36~1.40 的检测范围内具有 6110 nm/RIU 的灵敏度和 1.6367×10^{-5} RIU 的良好分辨率,通过与表 3 中的结构对比发现,该结构具有一定的性能优势。

4. 总结

本文设计了一种高灵敏度的 D 型光子晶体光纤传感器,其由上下两个大空气孔和左右两个小空气孔组成纤芯,并在纤芯左右两边设计两个更大的空气孔来加强传感性能,为实现金属膜的均匀沉淀,本结构不采用多种等离子体材料组合激发的方式,只采用单一金属材料作为 SPR 效应的激发材料,大幅降低了镀膜过程的复杂程度,此外将待测液体通道放置在外层区域,这样可以大大简化操作流程,还可以减小多纤芯结构之间的干扰,降低检测难度。首先对传感器的模场进行分析,交代了基模和 SPP 模在发生共振时的关系,并展示了发生 SPR 现象时的损耗谱,其次分析讨论了不同结构参数对传感性能的影响,主要讨论了金属膜的厚度和金属膜的材料对传感性能的影响,确定了最优的参数。最后通过对灵敏度和分辨率的综合评估并和其他结构的性能进行了对比,得到了在 1.36~1.40 的检测范围内,灵敏度为 6110 nm/RIU,分辨率为 1.6367×10^{-5} RIU 的 D 型 PCF-SPR 传感器。

参考文献

- [1] Jorgenson, R.C. and Yee, S.S. (1993) A Fiber-Optic Chemical Sensor Based on Surface Plasmon Resonance. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **12**, 213-220. [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(93\)80021-3](https://doi.org/10.1016/0925-4005(93)80021-3)
- [2] Wang, D., Yi, Z., Ma, G., et al. (2022) Two-Channel Photonic Crystal Fiber Based on Surface Plasmon Resonance for Magnetic Field and Temperature Dual-Parameter Sensing. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **24**, 21233-21241. <https://doi.org/10.1039/D2CP02778J>
- [3] Liedberg, B., Nylander, C. and Lunström, I. (1983) Surface Plasmon Resonance for Gas Detection and Biosensing. *Sensors and Actuators*, **4**, 299-304. [https://doi.org/10.1016/0250-6874\(83\)85036-7](https://doi.org/10.1016/0250-6874(83)85036-7)
- [4] Tiefenthaler, K. and Lukosz, W. (1984) Integrated Optical Switches and Gas Sensors. *Optics Letters*, **9**, 137-139. <https://doi.org/10.1364/ol.9.000137>
- [5] Lambeck, P.V. (1991) Chemo-Optical Micro-Sensing Systems. *Proceedings of the SPIE—The International Society for Optical Engineering*, **15**, 100-113. <https://doi.org/10.1117/12.45982>
- [6] Otto, A. (1968) Excitation of Nonradiative Surface Plasma Waves in Silver by the Method of Frustrated Total Reflection. *Zeitschrift für Physik a Hadrons and Nuclei*, **216**, 398-410. <https://doi.org/10.1007/bf01391532>
- [7] Jiang, H., Shen, T., Feng, Y., et al. (2023) Characterization of Incompletely Coated D-Shaped PCF-SPR Refractive Index Sensors. *Physica Scripta*, **98**, Article ID: 105520. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/acf797>
- [8] Ghosh, G., Endo, M. and Iwasaki, T. (1994) Temperature-Dependent Sellmeier Coefficients and Chromatic Dispersions for Some Optical Fiber Glasses. *Journal of Lightwave Technology*, **12**, 1338-1342. <https://doi.org/10.1109/50.317500>
- [9] Hassani, A. and Skorobogatiy, M. (2006) Design of the Microstructured Optical Fiber-Based Surface Plasmon Resonance Sensors with Enhanced Microfluidics. *Optics Express*, **14**, 11616-11621. <https://doi.org/10.1364/oe.14.011616>
- [10] Yang, X., Lu, Y., Liu, B. and Yao, J. (2017) Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature Based on SPR in D-Shaped MoF. *Applied Optics*, **56**, 4369-4637. <https://doi.org/10.1364/ao.56.004369>
- [11] Luan, N., Wang, R., Lv, W. and Yao, J. (2015) Surface Plasmon Resonance Sensor Based on D-Shaped Microstructured Optical Fiber with Hollow Core. *Optics Express*, **23**, 8576-8582. <https://doi.org/10.1364/oe.23.008576>
- [12] Rifat, A.A., Mahdiraji, G.A., Shee, Y.G., Shawon, M.J. and Adikan, F.R.M. (2016) A Novel Photonic Crystal Fiber Biosensor Using Surface Plasmon Resonance. *Procedia Engineering*, **140**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1107>
- [13] Rifat, A.A., Mahdiraji, G.A., Sua, Y.M., Shee, Y.G., Ahmed, R., Chow, D.M., et al. (2015) Surface Plasmon Resonance Photonic Crystal Fiber Biosensor: A Practical Sensing Approach. *IEEE Photonics Technology Letters*, **27**, 1628-1631. <https://doi.org/10.1109/lpt.2015.2432812>
- [14] 杨虚. 基于 SPR 的光子晶体光纤传感结构设计及其特性研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2018.