光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024090102

基于石墨烯涂层高灵敏 SPR-PCF 大气污染浓度检测传感器及特性研究

赵丽娟[1,2,3]，黄梓朦[1]，徐志钮[1*]，张　硕[4]，支九英[4]

（1. 华北电力大学 电气与电子工程学院，河北 保定 071003；2. 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；3. 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；4. 国网河北省电力公司保定供电分公司，河北 保定 071003）

摘　要： 为提升大气污染物检测的灵敏度，提出一种基于石墨烯涂层高灵敏表面等离子体光子晶体光纤（SPR-PCF）传感器。该传感器采用不同直径空气孔六边形双排列结构，在纤芯外围镀上金膜，并在金膜与待测物之间涂敷一层石墨烯材料来提升灵敏度。利用有限元方法系统分析了金属层厚度、空气孔间距及直径和石墨烯厚度等因素对 SPR-PCF 传感器灵敏度的影响。结果表明，当折射率范围为 1.398～1.402 时，该传感器具有显著的表面等离子体共振效应。研究得到了最优结构参数，此时传感性能几乎不受环境温度影响，最大波长灵敏度达到 55 000 nm/RIU，与之对应的折射率分辨率为 1.82×10^{-6} RIU。针对同一折射率测量范围、均为涂敷石墨烯的结构，所提出传感器的波长灵敏度是现有典型 SPR-PCF 传感器波长灵敏度的 2.86～9.17 倍，前者折射率分辨率是后者的 0.109～0.349。因此，在大气污染物浓度和种类检测方面，该 SPR-PCF 传感器具有较好的应用前景。

关键词： 表面等离子体共振；光纤传感；大气污染物；石墨烯；高灵敏度

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2024)06－0870－09

Graphene Coated Highly Sensitive Surface Plasmon Resonance-Photonic Crystal Fiber Sensor for Detecting Air Pollutant Concentration

ZHAO Lijuan[1,2,3], HUANG Zimeng[1], XU Zhiniu[1], ZHANG Shuo[4], ZHI Jiuying[4]

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN; 3. Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN; 4. Baoding Electric Power Supply Company, State Grid Hebei Electric Power Company, Baoding 071003, CHN)

Abstract: To improve the sensitivity of air pollutants detection, a type of surface plasmon resonance-photonic crystal fiber (SPR-PCF) sensor based on graphene coating is proposed. The sensor adopts a hexagonal double arrangement structure with air holes of different diameters. The outer core of the sensor is coated with gold film, and a layer of graphene material is coated between the gold film and the object to be measured to improve sensitivity. The effects of metal layer thickness, spacing and diameter of air holes, and graphene thickness on the sensitivity of the SPR-PCF sensor were systematically investigated using the finite element method. For a refractive index range of 1.398～1.402, the results show that the sensor exhibits significant

收稿日期：2024－09－01.

基金项目：国家自然科学基金项目(62171185,62273146)；河北省自然科学基金资助项目(E2020502010)；河北省省级科技计划资助(SZX2020034).

* **通信作者：**徐志钮

surface plasmon resonance effect. Applying the optimal structural parameters obtained by analysis, the sensing performance was almost unaffected by the ambient temperature. The maximum wavelength sensitivity reached 55,000 nm/RIU, and the corresponding refractive index resolution was 1.82×10^{-6} RIU. Compared with the structure coated with graphene in the same refractive index measurement range, the wavelength sensitivity of the proposed SPR-PCF sensor was 2.86～9.17 times that of the existing typical SPR-PCF sensor, and the refractive index resolution of the former was 0.109～0.349 that of the latter. Therefore, the proposed SPR-PCF sensor has good application prospects in the detection of atmospheric pollutant type and concentration.

Key words: surface plasmon resonance; optical fiber sensor; air pollutants; graphene; high sensitivity

0 引言

大气污染已经成为世界各国面临的重大环境问题，随着社会的发展与进步，对环境监测也提出了更高的要求[1]。尽管目前气体检测装置的功能越来越完备，但现有的气体检测技术通常不是基于光学方法，存在易与其他待测气体产生交叉敏感、使用寿命短等缺点[2-3]。因此，基于光学方法的高灵敏度气体检测成为当前的研究热点。

在基于光纤的众多传感检测技术中，表面等离子体共振(SPR)技术因具有实时性强、精度高和免标记等优势受到了广泛关注[4]。光子晶体光纤(PCF)具有不受电磁干扰、灵敏度高和易于小型化等优点[5]。因此，结合两者优势的表面等离子体光子晶体光纤(SPR-PCF)大气污染传感检测成为研究热点。由于不同大气污染物具有不同的折射率，而大气污染物折射率的变化会引起 SPR-PCF 共振峰位置的变化，通过分析不同条件下共振峰位置的变化就能实现大气污染物的检测[1]。涂敷石墨烯的 PCF 结构使待测物与石墨烯直接接触，增加传感灵敏度[6]。2017 年，Yang 等[7]提出将石墨烯-银交替涂覆于第二层空气孔内，可消除相邻空气孔间的干扰，提高信噪比。该结构传感器的灵敏度可以达到 2 520 nm/RIU。2019 年，Lou 等[8]提出了基于石墨烯-金的新型偏芯 PCF 传感器。在添加石墨烯后，灵敏度提高到 8 600 nm/RIU。2020 年，Han 等[9]提出一种涂有石墨烯和氧化锌的 SPR-PCF 传感器，当液体分析物折射率范围为 1.37～1.41 时，灵敏度可提升至 6 000 nm/RIU。由此可见，已提出的多种添加石墨烯的 SPR-PCF 传感器在灵敏度上有明显提升，但是目前适用于分析物折射率低于 1.41 的传感器灵敏度仍不够高，无法满足实际的工程需求。

设计了一种在金属层外涂敷石墨烯的 SPR-PCF 传感器，该传感器采用不同直径空气孔六边形双排列结构，在纤芯表面镀上金膜，并在金膜与待测物之间涂敷一层敏感材料石墨烯。采用有限元方法分析了结构参数对传感器灵敏度的影响，最终得出最优结构。研究内容框图如图 1 所示。与已有的 SPR-PCF 传感器相比，该传感器具有更高的波长灵敏度，在大气污染物浓度和种类检测上具有较好的应用前景。

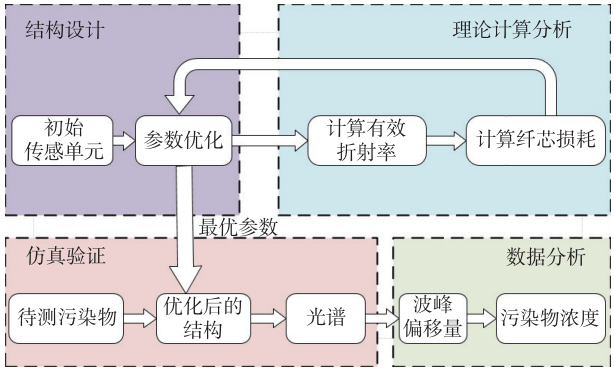


图 1 研究内容框图

1 结构设计与模型

该 SPR-PCF 传感器的截面如图 2 所示。结构从外层到内层材料分别为：待测物层、石墨烯层、金属层、二氧化硅和空气。其中，大空气孔(图中大圆)直径 $d_1=1.00\ \mu m$，小空气孔(图中小圆)直径 $d_2=0.40\ \mu m$，石墨烯层厚度 $d=1.02$ nm，金属层厚度 $t_g=30$ nm，空气孔间距 $P=2.00\ \mu m$。根据文献[1]，待测物体厚度 $t_a=1.00\ \mu m$。

选用石墨烯作为敏感材料层的有效介质，其复

折射率可表示为[1]：

$$n_g = 3 + \frac{iC\lambda}{3} \tag{1}$$

式中，常数 $C=5.446\ \mu m^{-1}$，λ 是波长，i 为虚数单位。根据 Kubo 公式，单层石墨烯的表面电导率可以在很宽的频率范围内直接测量[10]。

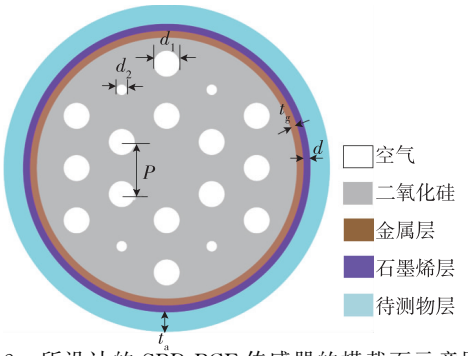


图 2 所设计的 SPR-PCF 传感器的横截面示意图

金属层材料选择金或银，金与银纳米层的折射率由 Drude-Lorentz 公式[11]计算，在公式(2)和(3)中给出：

$$n_{Au}(\omega) = \varepsilon_{Au} - \frac{\omega_{pu}^2}{\omega(\omega + i\omega_{cu})} \tag{2}$$

$$n_{Ag}(\omega) = \varepsilon_{Ag} - \frac{\omega_{pg}^2}{\omega(\omega + i\omega_{cg})} \tag{3}$$

式中，n_{Au} 和 n_{Ag} 分别为金与银纳米层的折射率；ε_{Au} 为金的介电常数，取值为 9.84，ω_{pu} 和 ω_{cu} 分别为对应的等离子体频率和阻尼频率，分别取值为 1.36×10^{16} 和 1.45×10^{14} rad/s；ε_{Ag} 为银的介电常数，取值为 2.148 5，ω_{pg} 和 ω_{cg} 分别为对应的等离子体频率和阻尼频率，分别取值为 1.39×10^{16} 和 3.04×10^{14} rad/s。

空气孔包括一大一小两种孔径，主要作用是确保入射光能够在纤芯中传播以及满足基模和等离子模(SPP)相位匹配条件。

2 SPR-PCF 的光谱分析方法

当 PCF 中的金属层表面接收到入射光波时，波矢在 x 轴上的分量为[12]：

$$k_x = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_{co}(\lambda)}\sin\theta \tag{4}$$

式中，λ 为入射光波长，$\varepsilon_{co}(\lambda)$ 为 PCF 纤芯材料的介电常数，θ 为光的入射角。表面等离子体的本征波数为[12]：

$$k_{sp} = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\frac{\varepsilon_s(\lambda)\varepsilon_m(\lambda)}{\varepsilon_s(\lambda)+\varepsilon_m(\lambda)}} \tag{5}$$

式中，$\varepsilon_s(\lambda)$ 和 $\varepsilon_m(\lambda)$ 分别为待测分析物和金属层的介电常数。当 $k_x = k_{sp}$ 时，产生的 SPR 效应最强，此时 PCF 的透射光谱中的对应波长(共振波长)位置出现损耗峰[13]。SPR-PCF 的损耗可用式(6)计算。

$$\alpha_{loss} = \frac{40\pi}{\lambda\ln10}\mathrm{Im}(n_{eff}) \times 10^6 \tag{6}$$

式中，n_{eff} 为光纤有效折射率，$\mathrm{Im}(n_{eff})$ 为光纤有效折射率的虚部。SPR-PCF 的波长灵敏度计算公式为[14]：

$$S_\lambda = \frac{\Delta\lambda_{peak}}{\Delta n_a} \tag{7}$$

式中，Δn_a 和 $\Delta\lambda_{peak}$ 分别表示分析物折射率变化量和对应的共振波长的变化量。此时，折射率分辨率为[11]：

$$R = \frac{\Delta n_a \Delta\lambda_{min}}{\Delta\lambda_{peak}} \tag{8}$$

式中，$\Delta\lambda_{min}$ 为光谱仪的最小分辨率。

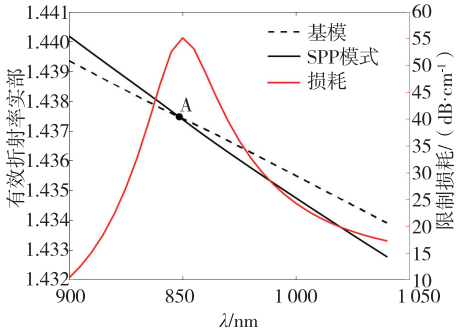
3 结果与讨论

传感器是否会发生 SPR 效应可以通过色散关系来判断，所以需要对色散关系进行分析[13]。金属材料可以激发等离子体效应，对传感器的性能影响很大，因此考虑金属类型的影响。另外，传感器结构参数(金属膜厚度 t_g、空气孔间距 P、大空气孔直径 d_1、石墨烯厚度 d)的改变可能会导致共振波长发生漂移，进而对传感器的性能产生影响，需要通过进一步分析来确定 SPR-PCF 的最佳参数。大多数传感器对温度的变化敏感，因此需要探究温度的改变对传感性能的影响。

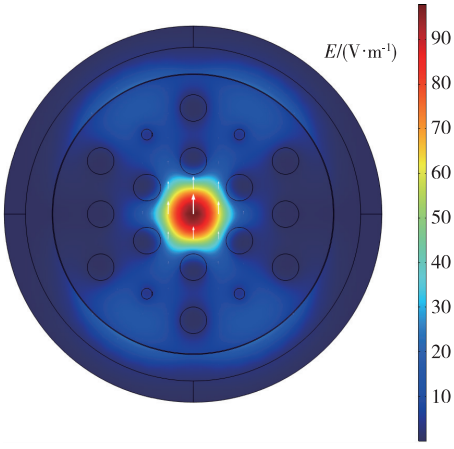
3.1 色散关系

文献[14]研究结果相关参数设置如下：金膜厚度 $t_g=28.00$ nm、空气孔间距 $P=2.00\ \mu$m、大气孔直径 $d_1=1.00\ \mu$m、小气孔直径 $d_2=0.40\ \mu$m 和石墨烯厚度 $d=1.02$ nm。采用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 中的波动光学模块进行建模分析。折射率 $n_a=1.4$ 时对波长在 900～1 050 nm 范围内的情况进行参数化扫描，得到基模和 SPP 的有效模式折射率实部与波长的色散关系，如图 3(a)所示。然后，利用式(6)得到纤芯基模的损耗谱与波长的色散关系也一并画于图 3(a)中。其中图 3(a)中 A 点处的场强分布如图 3(b)所示。由图 3(a)和图 3(b)可知，在共振波长处即 A 点出现损耗峰，此时能量汇集在中心位置，即产生的 SPR 效应也最强，与理论

情况吻合。



（a）加入石墨烯时纤芯基模与SPP模式的有效折射率实部和基模的损耗谱



（b）A点的电场分布

图 3 色散关系

图 4 展示了所提出的传感器损耗谱随折射率的变化。由图 4 可知，共振波长随着折射率的增加而增加。因此，污染物折射率的变化可以由损耗峰漂移量推算得出。

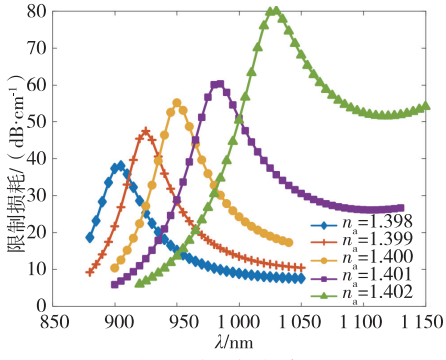


图 4 损耗谱随折射率的变化

3.2 不同金属材料下的传感性能

金与银易激发出表面等离子共振效应，且其在日常生活中较为常见、易制备。因此，不失一般性，当其余参数固定时（金属厚度 t_g=30.00 nm、空气孔间距 P=2.00 μm、大空气孔直径 d_1=1.00 μm、小气孔直径 d_2=0.40 μm 和石墨烯厚度 d=1.02 nm），当待测样品折射率在 1.398～1.402 范围内变化、金属层选择金与银时传感特性进行比较，结果如图 5 所示。

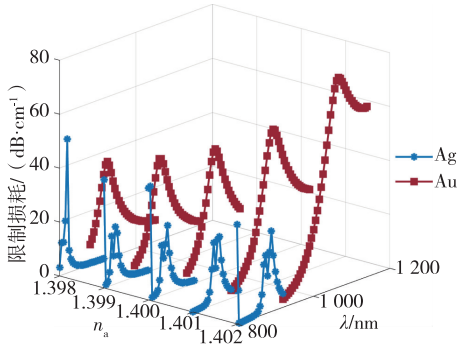


图 5 不同金属材料下的损耗谱

结果表明，银的损耗谱容易出现干扰峰，而金的损耗谱变化相对稳定。金具有比银更稳定的化学性质，由金制造的传感器性能也较为稳定[15]。银虽然具有尖锐的、更利于测量的损耗峰，但是由于其化学性质不稳定，氧化反应会显著降低传感器的性能和可靠度。因此，综合考虑传感器的稳定性，应选择金作为表面等离子体材料。

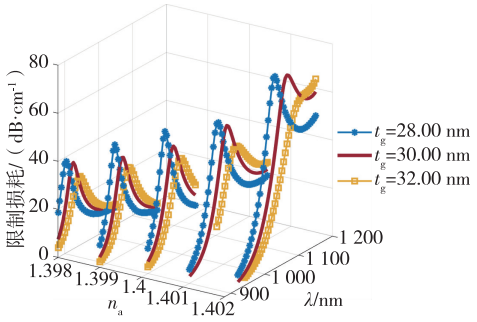
3.3 不同结构参数下的传感性能

3.3.1 金膜厚度

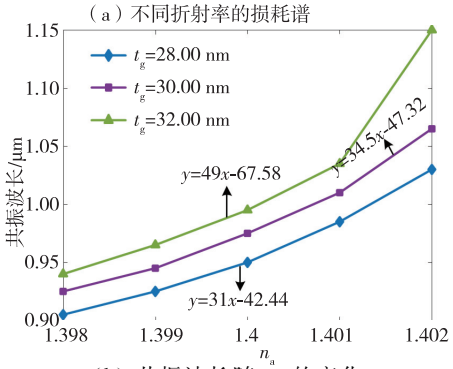
SPR-PCF 传感器是通过光入射到金属表面，使纤芯基模与等离子体模耦合来实现的。由 3.2 节可知，选择金作为表面等离子体材料。当金膜较薄时，辐射阻尼会引发强阻尼；当金膜较厚时，电场会无法穿过金膜，导致波长灵敏度显著降低[16]。因此，金膜厚度对于纤芯基模与等离子体模之间的耦合发挥着重要作用。依据文献[1]，当折射率在 1.398～1.402 范围内变化、金膜厚度 t_g 在 28～32 nm 范围内变化时，对损耗谱和共振波长进行分析，结果如图 6 所示。

为了进一步提升所设计的 SPR-PCF 传感器的灵敏度，因此优先选择灵敏度较大的结构参数。图 6(a)展示了当 P=2.00 μm，d_1=1.00 μm 和 d=1.02 nm 时的损耗谱。可以发现，当 t_g=28.00 nm 和 30.00 nm 时，虽然谱宽适中，但灵敏度较小且损耗峰值偏大；当 t_g=32.00 nm 时，灵敏度较大且损耗峰值较小，此时传感器性能处于较优的状态。在不失一般性的情况下，图 6(b)展示了当 t_g 取不同值时，共振波长随折射率的变化情况。由式(7)可知，所提出的传感器波长灵敏度由图中曲线的斜率表

示。由图 6(b)可以发现，曲线的斜率随 t_g 的增加逐渐增大，即波长灵敏度随 t_g 的增加逐渐增加，这与图 6(a)吻合。另外，由图 6(a)可知，当 t_g 取不同值时，不同折射率的损耗谱具有相同的规律，故以 n_a=1.4 为例，探究其他结构参数是否会影响最优 t_g 的选取。



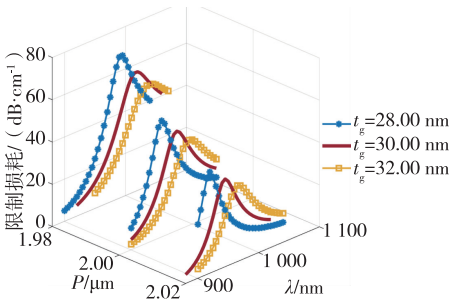
(a) 不同折射率的损耗谱



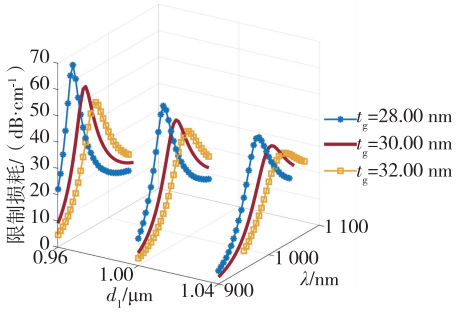
(b) 共振波长随 n_a 的变化

图 6 当 P=2.00 μm，d_1=1.00 μm 和 d=1.02 nm 时，不同 t_g 下的损耗谱和共振波长

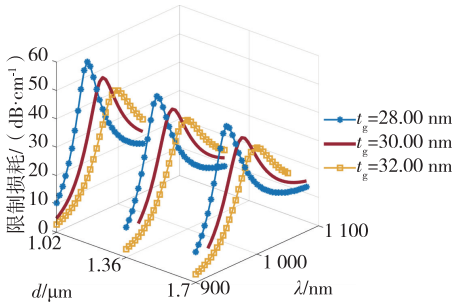
为探究空气孔间距、大空气孔直径和石墨烯厚度对最优金属厚度的影响，通过分别改变空气孔间距 P、大空气孔直径 d_1 与石墨烯厚度 d 的方式对损耗谱进行分析，结果如图 7 所示。由图可知，无论 P，d_1 和 d 取何值，当 t_g=28.00 nm 和 30.00 nm 时，虽然谱宽适中，但灵敏度较小且损耗峰值偏大；当 t_g=32.00 nm 时，灵敏度较大且损耗峰值较小，此时传感器性能处于较优的状态，说明以上参数不



(a) 当n_a=1.4，d_1=1.00 μm，d=1.02 nm时，待测样品的损耗谱



(b) 当n_a=1.4，P=2.00 μm，d=1.02 nm时，待测样品的损耗谱



(c) 当n_a=1.4，P=2.00 μm，d_1=1.00 μm时，待测样品的损耗谱

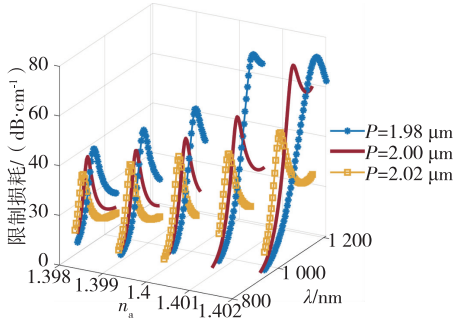
图 7 不同 t_g 下的损耗谱

影响最优金属厚度的选择。因此，综合考虑波长灵敏度、损耗峰值和损耗谱宽度，应选金膜厚度 t_g=32.00 nm。

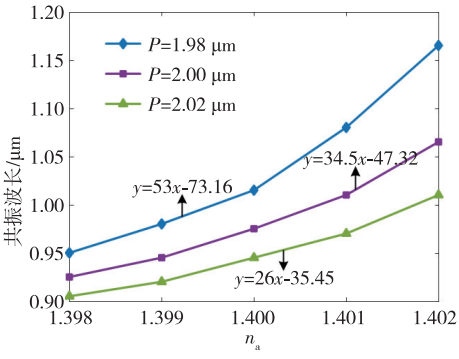
3.3.2 气孔间距

空气孔间距 P 太小会导致 SPR-PCF 结构不稳定，制造难度增大；而过大会导致纤芯能量转移到包层，损耗增大[17]。因此，需要探究其对传感性能的影响。由 3.2 节可知，应选择金作为表面等离子体材料；由 3.3.1 节可知，t_g=32 nm 是最优选择，故在此条件下，依据文献[14]对折射率在 1.398～1.402 范围内、空气孔间距 P 在 1.98～2.02 μm 范围内传感特性进行研究，结果如图 8 所示。为了进一步提升所设计的 SPR-PCF 传感器的灵敏度，优先选择灵敏度较大的结构参数。由图 8(a)可知，当 P=2.00 μm 和 P=2.02 μm 时，虽然损耗峰和谱宽较优，但灵敏度偏低；当 P=1.98 μm 时，所提出的传感器灵敏度较大，此时传感器的性能较好。不失一般性，d_1 和 d 分别取值为 1.00 μm 和 1.02 nm，图 8(b)展示了当 P 取不同值时，共振波长随折射率的变化情况。所提出的传感器的波长灵敏度由图中曲线的斜率表示，可以发现，斜率随着 P 的减小而增加，即波长灵敏度随着 P 的减小逐渐增加，这与图 8(a)吻合。另外，由图 8(a)可知，当 P 取不同值

时，不同折射率的损耗谱具有相同的规律，故以n_a=1.4 为例，探究其他结构参数是否会影响最优 P 的选取。



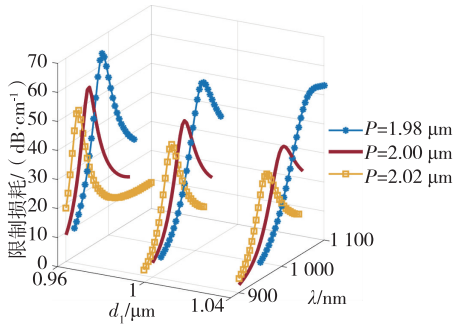
（a）不同折射率的损耗谱



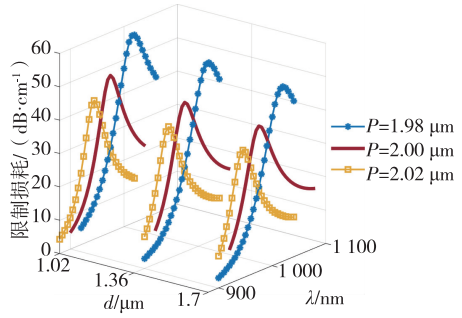
（b）共振波长随n_a的变化

图 8 当 t_g=32.00 nm，d_1=1.00 μm，d=1.02 nm 时，不同 P 下的损耗谱和共振波长

为探究大空气孔直径和石墨烯厚度对最优空气孔间距的影响，实验获得了不同大空气孔直径、石墨烯厚度和空气孔间距下的损耗谱，结果如图 9 所示。由图 9 可知，无论 d_1 和 d 取何值，当 P=2.00 μm 和 P=2.02 μm 时，虽然损耗峰和谱宽较优，但灵敏度偏低；当 P=1.98 μm 时，所提出的传感器灵敏度较大，此时传感器的性能处于较优的状态，说明 d_1 和 d 均不影响金属厚度的选择。因此，综合考虑波长灵敏度、损耗峰值和损耗谱宽度，应选择空气孔间距 P=1.98 μm。



（a）当n_a=1.4，d=1.02 nm时，待测样品的损耗谱

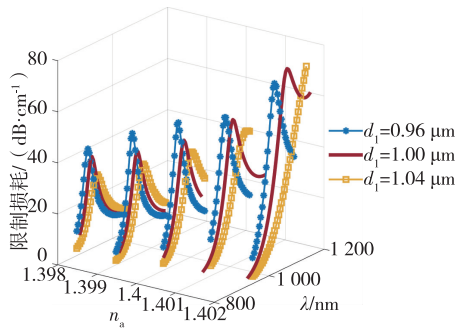


（b）当n_a=1.4，d_1=1.00 μm时，待测样品的损耗谱

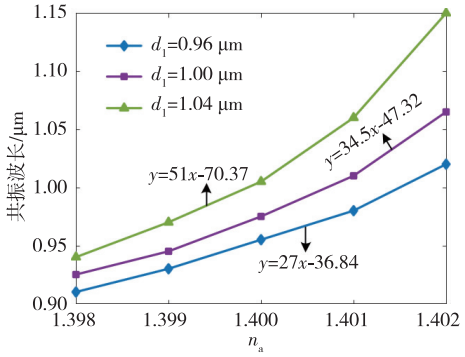
图 9 不同 P 下的损耗谱

3.3.3 大空气孔直径

纤芯中空气孔的存在是为了保证入射光可以在纤芯中进行传输并满足基模与 SPP 的相位匹配条件。空气孔直径过小，导致纤芯能量向包层转移，损耗增大；空气孔直径过大，光纤的结构稳定性就会越差[19]。因此，需要探索最优的空气孔直径。由 3.2 节可知，应选择金作为表面等离子体材料；由 3.3.1 节和 3.3.2 节可知，t_g=32.00 nm，P=1.98 μm 是最优选择，故在此条件下，依据文献[15]，对待测样品折射率在 1.398～1.402 范围内、大空气孔直径 d_1 在 0.96～1.04 μm 的范围内时的传感特性进行分析，结果如图 10 所示。图 10(a)中，当 d_1=0.96 μm 和 d_1=1.00 μm 时，虽然谱宽适中，但灵敏度较小且损耗峰值偏大；当 d_1=1.04 μm 时，灵敏度较大且损耗峰值较小。实验希望传感器在灵敏度上做进一步提升，故此时传感器性能较好。不失一般性，d 取值为 1.02 nm，图 10(b)为当 d_1 取不同值时，共振波长随折射率的变化情况。可以发现，斜率随着 d_1 的增加而增加，即波长灵敏度随着 d_1 的增加逐渐增加，这与图 10(a)吻合。另外，由图 10(a)可知，当 d_1 取不同值时，不同折射率的损耗谱具有相同的规律，故以 n_a=1.4 为例，探究其他结构参数是否会影响最优 d_1 的选取。



（a）不同折射率的损耗谱



（b）共振波长随n_a的变化

图 10 当 t_g=32 nm，P=1.98 μm，d=1.02 nm 时，不同 d_1 下的损耗谱和共振波长

为探究石墨烯厚度对最优大空气孔直径的影响，给出了不同石墨烯厚度和大空气孔直径下损耗谱，结果如图 11 所示。由图 11 可知，无论 d 取何值，当 d_1=0.96 μm 和 d_1=1.00 μm 时，虽然谱宽适中，但灵敏度较小且损耗峰值偏大；当 d_1=1.04 μm 时，灵敏度较大且损耗峰值较小，此时传感器性能处于较优的状态，说明 d 不影响最优大空气孔直径的选择。因此，综合考虑波长灵敏度、损耗峰值和损耗谱宽度，应选择大空气孔直径 d_1=1.04 μm。

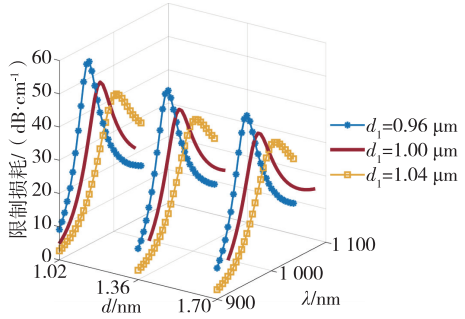
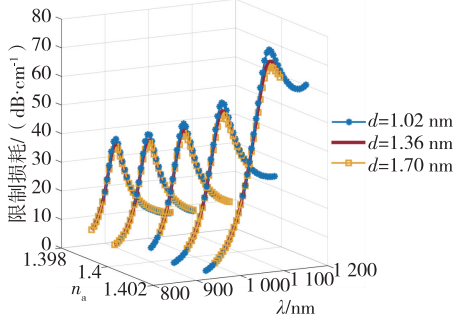


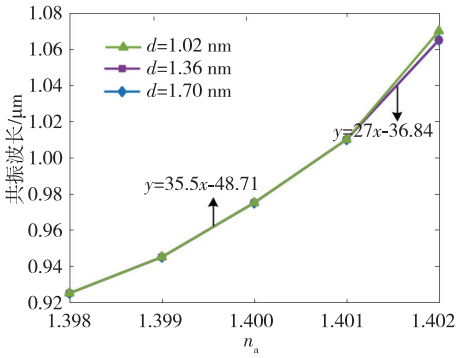
图 11 当 n_a=1.4 时，不同 d_1 下 d 的损耗谱

3.3.4 石墨烯厚度

由 3.2 节可知，应选择金作为表面等离子体材料；由 3.3.1 节、3.3.2 节和 3.3.3 节可知，t_g=32.00 nm，P=1.98 μm，d_1=1.04 μm 是最优选择，故在此条件下，依据文献[14]，对折射率在 1.398～1.402 范围内、石墨烯厚度 d 在 1.02～1.70 nm 范围内时的传感特性进行分析，结果如图 12 所示。由图 12(a)可知，无论 d 在 1.02～1.70 nm 的范围内取何值，该传感器的损耗谱宽度都相同。但当 d=1.02 nm 时，所提出的传感器灵敏度较大，同样希望传感器在灵敏度上做进一步提升，故此时传感器的性能处于较优的状态。图 12(b)展示了当 d 取不同值时，共振波长随折射率的变化情况。可以发现，当 d=1.36 nm 与 d=1.70 nm 时，斜率相同即波长灵敏度相同，此时的斜率相较于 d=1.02 nm 时偏小，因此，d=1.02 nm 的波长灵敏度最高，这与图 12(a)吻合。故综合考虑损耗谱的损耗峰值和波长灵敏度，应选择石墨烯厚度 d=1.02 nm。



（a）不同折射率的损耗谱



（b）共振波长随n_a的变化

图 12 当 t_g=32 nm，P=1.98 μm，d_1=1.04 μm 时，不同 d 下的损耗谱和共振波长

3.4 不同温度下的传感性能

由 3.2 节可知，应选择金作为表面等离子体材料；根据 3.3 节中对影响 SPR-PCF 传感器的结构参数进行分析，确定了其最佳参数，即金膜厚度 t_g=32.00 nm、空气孔间距 P=1.98 μm、大空气孔直径 d_1=1.04 μm 和石墨烯厚度 d=1.02 nm。实验结合实际大气温度，并考虑极端天气的影响，分析了大气温度范围在 203.15～333.15 K（−70～60 ℃）内，该 SPR-PCF 传感器的损耗谱结果，如图 13 所示，各温度之间损耗谱的差值最大不超过 0.01 dB/cm，因

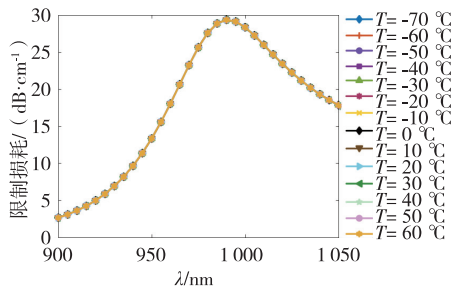


图 13 不同温度下的损耗谱

此，说明温度的变化对所提出的 SPR-PCF 传感器几乎没有影响。

3.5 SPR-PCF 传感器的折射率灵敏度

根据 3.3 节中对影响 SPR-PCF 传感器的结构参数进行分析，确定了所述传感器的最优参数。研究分析了折射率在 1.398～1.402 范围内该传感器的损耗谱，结果如图 14 所示。

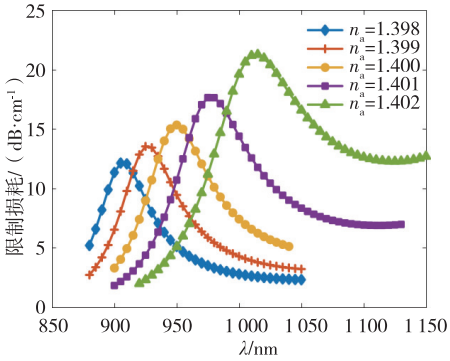


图 14 最优结构下不同折射率的损耗谱

图 15 给出了该 SPR-PCF 传感器的共振波长随折射率变化情况及多项式的拟合结果，当选用线性时，拟合校正系数 R^2 为 0.965，拟合一致性较差；当拟合结果选用三次及以上多项式时，拟合出的方程为病态方程，因此选择二次多项式拟合。拟合校正系数 R^2 为 0.999 9，证明拟合一致性较好。由拟合方程可知，该 SPR-PCF 传感器的最大波长灵敏度在折射率为 1.402 时取得。此时，由式(7)和式(8)分别得出最大波长灵敏度为 55 000 nm/RIU，以及当光谱仪最小分辨率为 0.1 nm 时，折射率分辨率为 1.82×10^{-6} RIU。

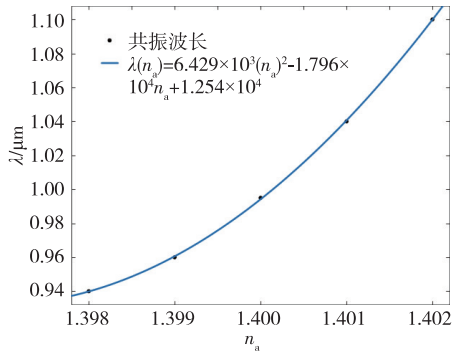


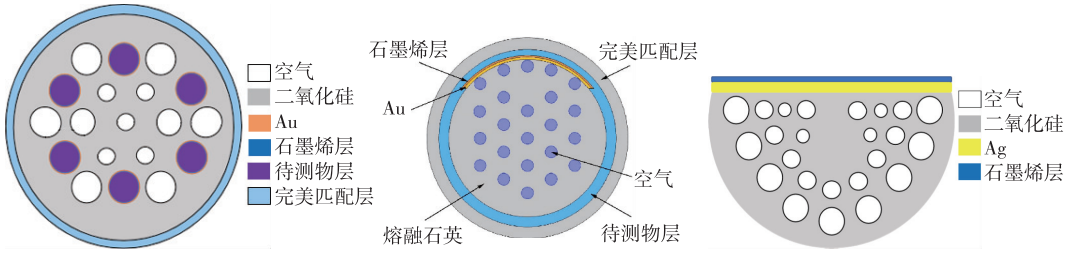
图 15 最优结构时共振波长随折射率的变化及对应的二次多项式拟合曲线

表 1 为所述 SPR-PCF 传感器与现有典型 SPR-PCF 传感器在相同折射率范围下的性能比较。可以发现与现有研究[1,9,14]相比，在同一折射率测量范围内，所提出的 SPR-PCF 传感器的波长灵敏度和折射率分辨率分别是现有典型 SPR-PCF 传感器的 2.86～9.17 倍和 0.109～0.349。较高的波长灵敏度和更高的折射率分辨率使该传感器在大气污染检测中具有较大的应用潜力。

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

参考文献	折射率范围	波长范围/nm	灵敏度/（nm·RIU^{-1}）	分辨率/RIU
[1]	1.398～1.400	980～1 050	13 230	7.56×10^{-6}
[9]	1.398～1.400	1 812～1 966	6 000	1.67×10^{-5}
[14]	1.398～1.400	700～1 250	19 200	5.21×10^{-6}
本文	1.398～1.402	890～1 070	55 000	1.82×10^{-6}

此外，将文献[7-9]中设计的 SPR-PCF 传感器分别展示于图 16 中。图 16(a)所示的结构中石墨烯层和金属层布局复杂，较难制造；图 16(b)所示的结构中金属层布置困难，结构复杂；图 16(c)所示的结构中空气孔个数较多，布局复杂。相比于上述涂敷石墨烯结构的 SPR-PCF 传感器，所设计的 SPR-PCF 传感器都是常见的圆形空气孔，且孔数较少、布局对称、结构简单，这大大降低了制造难度。



（a）文献[8]中的传感器结构 （b）文献[9]中传感器结构 （c）文献[10]中传感器结构

图 16 现有涂敷石墨烯结构的 SPR-PCF 传感器

4 结论

设计了一种适用于大气污染的高灵敏度 SPR-PCF 传感器，该传感器采用不同直径空气孔六边形双排列的结构，金薄膜外围镀有高灵敏材料石墨烯，结构简单，易于制造。采用有限元分析法系统研究

了结构参数及金属层材料对该传感器灵敏度的影响，并获得了其最优结构。研究结果表明，在折射率范围为1.398～1.402内，该传感器具有显著的表面等离子体共振效应，且传感性能几乎不受环境温度影响。当折射率为1.402时获得最大波长灵敏度55 000 nm/RIU，此时的折射率分辨率为1.82×10^{-6} RIU。与现有研究相比，在同一折射率测量范围内，该SPR-PCF传感器的灵敏度是典型SPR-PCF传感器的2.86～9.17倍，折射率分辨率是典型SPR-PCF传感器的0.109～0.349。由于该传感器利用的是光传感，更适用于检测大气污染气体，具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 王鑫磊. 基于光子晶体光纤的大气污染物传感特性研究[D]. 绵阳：西南科技大学，2021：1-59.
Wang Xinlei. Research on sensing characteristics of air pollutants based on photonic crystal fiber[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021: 1-59.

[2] Lv W D, Ji S P. Atmospheric environmental quality assessment method based on analytic hierarchy process[J]. Discrete and Continuous Dynamical Systems-Series S, 2019, 12(4/5): 941-955.

[3] 苏 佳，武 茜，黄光球. 面向工业污染源排放的城市大气环境系统韧性评价及其时空演化[J]. 环境工程学报，2023，17(4)：1263-1273.
Su Jia, Wu Qian, Huang Guangqiu. Toughness evaluation and spatiotemporal evolution of urban atmospheric environment system for industrial pollution source emissions[J]. Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(4): 1263-1273.

[4] 吕健滔，王春明，朱晟昇，等. 基于表面等离子体共振的双芯光子晶体光纤横向应力传感器[J]. 光学学报，2017，37(8)：0828002.
Lv Jiantao, Wang Chunming, Zhu Shenghao, et al. Dual-core photonic crystal fiber transverse-stress sensor based on surface plasmon resonance[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0828002.

[5] 赵丽娟，赵海英，徐志钮. 一种高双折射低损耗大负色散光子晶体光纤的设计[J]. 半导体光电，2020，41(3)：368-373，378.
Zhao Lijuan, Zhao Haiying, Xu Zhiniu, et al. Design of photonic crystal fiber with high birefringence, low confinement loss and large negative dispersion [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(3): 368-373, 378.

[6] Duan D W, Rao Y J, Xu L C, et al. In-fiber Mach-Zehnder interferometer formed by large lateral offset fusion splicing for gases refractive index measurement with high sensitivity[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 160(1): 1198-1202.

[7] Yang X, Lu Y, Liu B, et al. Analysis of graphene-based photonic crystal fiber sensor using birefringence and surface plasmon resonance[J]. Plasmonics, 2017, 12(2): 489-496.

[8] Lou J, Cheng T, Li S, et al. Surface plasmon resonance photonic crystal fiber biosensor based on gold-graphene layers [J]. Optical Fiber Technology, 2019, 50: 206-211.

[9] Liang H, Shen T, Feng Y, et al. A D-shaped photonic crystal fiber refractive index sensor coated with graphene and zinc oxide[J]. Sensors, 2020, 21(1): 71.

[10] Wang D J, He X J, Jiang J X, et al. Photoelectrically-excited terahertz metasurface for switchable and tunable broadband propagation and polarization manipulations [J]. Optical Materials, 2023, 131: 109570.

[11] Srivastava R, Prajapati Y K, Pal S, et al. Micro-channel plasmon sensor based on a D-shaped photonic crystal fiber for malaria diagnosis with improved performance [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(15): 14834-14841.

[12] 赵海英，赵丽娟，徐志钮. 基于D型光子晶体光纤的低折射率化学物传感器[J]. 光学学报，2022，42(20)：2006002.
Zhao Haiying, Zhao Lijuan, Xu Zhiniu. Sensor based on D-shaped photonic crystal fiber for detecting chemicals with low refractive index [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(20): 2006002.

[13] 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.
Liu Baolin. Research on photonic crystal fiber sensors filled with composite nanomaterials[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.

[14] 刘孟银. 石墨烯光纤等离子体生物传感器及应用研究[D]. 桂林：桂林电子科技大学，2022.
Liu Mengyin. Research on graphene fiber plasma biosensor and its application [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2022.

[15] 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.

[16] Hassani A, Skorobogatiy M. Design of the micro structured optical fiber-based surface plasmon resonance sensors with enhanced microfluidics[J]. Optics Express, 2006, 14(24): 11616-11621.

[17] Han T, Liu Y G, Wang Z, et al. Control and design of fiber birefringence characteristics based on selective-filled hybrid photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2014, 22(12): 15002.

作者简介：

赵丽娟(1981—)，女，博士，教授，主要从事光纤传感与光纤通信方面的研究；

徐志钮(1979—)，男，博士，教授，主要从事分布式光纤传感器及其在电气设备状态监测和故障诊断的应用方面的研究。