

激光与光电子学进展

基于 Au-TiO₂ 涂层凹槽的 D 形光子晶体光纤的
等离激元红外传感器设计

陈思, 武京治, 王艳红*, 吴倩楠

中北大学仪器与电子学院, 山西 太原 030051

摘要 设计了一种基于 D 形光子晶体光纤(PCF)的新型等离激元传感器,用于检测低折射率的微小变化,并通过有限元法(FEM)对其性能进行了数值分析。与传统 D 形 PCF 不同,本文提出在 D 形光纤截面处刻蚀 C 型凹槽通道,并涂覆 Au 层来激发等离激元。C 形凹槽通道的设计可以增强纤芯的能量泄露以及光纤芯模和等离激元模的耦合强度。在 Au 层上方增覆一层 TiO₂ 介电层,可以增强对金属层的保护和提高传感器的灵敏度,将 PCF 表面等离共振(PCF-SPR)传感器的工作波长范围扩展到红外区域,仿真结果得到的最大灵敏度为 24236 nm/RIU。该传感器可以有效监测低折射率的微小变化,对于生物医学和有机检测及相关应用具有潜在的价值。

关键词 光纤光学与光通信; 光子晶体光纤; 等离激元; 低折射率检测; 高灵敏度; 限制损耗

中图分类号 TP212

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222145

Design of Plasmonic Infrared Sensor Based on D-Shaped Photonic Crystal
Fiber with Au-TiO₂ Coating Grooves

Chen Si, Wu Jingzhi, Wang Yanhong*, Wu Qiannan

School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China

Abstract A novel plasmonic sensor based on a D-shaped photonic crystal fiber (PCF) is designed to detect low refractive index changes, and its performance is numerically analyzed using the finite element method (FEM). Unlike the traditional D-shaped PCF, this paper proposes that etching a C-shaped groove channel at the cross-section of the D-shaped fiber and coating the Au layer to excite the plasmons. The design of the C-shaped groove channel can enhance the energy leakage of the fiber core and the coupling strength of both the fiber core and the plasmonic modes. A TiO₂ dielectric layer is added on top of the Au layer to enhance the protection of the metal layer and improve the sensitivity of the sensor. The operating wavelength range of the PCF surface plasmon resonance (PCF-SPR) sensor is extended to the infrared region. The maximum sensitivity obtained from the simulation results is 24236 nm/RIU. The sensor can effectively monitor small changes in a low refractive index and has potential value for biomedical and organic detection and related applications.

Key words optical fiber optics and optical communication; photonic crystal fiber; plasma; low refractive index detection; high sensitivity; confinement loss

1 引言

表面等离激元是金属中自由电子的集体振荡^[1],当激发光子的传播常数与电子振荡的传播常数相匹配时,就会发生表面等离共振(SPR)效应,其中部分入射光的能量被转移到表面等离激元^[2]。当金属周围的电介质发生变化时,SPR 谐振条件也会相应变化,可通过记录谐振峰的变化来检测外部环境的微小变化^[3]。

由于传统的棱镜设备装置比较庞大和笨重,随着小型化需求的增长,SPR 传感平台已经从传统的棱镜过渡到光纤甚至光子晶体光纤(PCF)^[4]。在各种传感结构中,基于 PCF 的 SPR 传感器由于具有可调范围宽、双折射高、灵敏度高和多参数功能灵活等优点在传感设计中备受关注^[5]。

传统的 PCF 的检测方法是将分析物选择性地注入气孔中,这给实际操作带来了很大难度,因此发展出

收稿日期: 2022-07-25; 修回日期: 2022-08-09; 录用日期: 2022-08-19; 网络首发日期: 2022-08-30

通信作者: *wangyanhong@nuc.edu.cn

侧面抛光的 D 形 PCF, 在截面上涂覆盖金属薄膜, 大大降低了制作工艺的难度^[6]。为了保护金属层, 可以在金属层上再涂覆一层氧化层, TiO₂ 因其化学稳定性好、具有较高的折射率和较高的介电常数, 成为保护层的最佳选择之一^[7]。大多数对 PCF-SPR 传感器的研究都集中在可见光区域的折射率检测, 并且这些传感器中的大多数都应用于高折射率的检测^[8]。相较于工作在可见光波段的检测, 红外波段的检测具有独特的优势, 例如, 可减少活细胞造成光损伤的危害性^[9]。随着医学检测和材料学科的发展, 低折射率检测也非常重要, 例如液态 CO₂、医用氧气、含氟有机物以及麻醉剂等折射率都处于一个低折射率范围内^[10]。2017 年, Liu 等^[11]提出一种 D 形 SPR-PCF, 工作波段为红外区域, 平均灵敏度为 5500 nm/RIU。本文提出一种 D 形 PCF-SPR 传感器, 在其截面刻蚀 C 形凹槽并在其表面沉积 Au 膜和 TiO₂ 膜来进行红外范围内的低折射率检测。

2 结构设计

图 1 为 C 形凹槽 D 形 FCF 传感器示意图。利用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 对结构进行建模与模式耦合分析。结构由两圈数量相等的六边形气孔组成: 内圈有两个不同半径的气孔, 分别为 $r_1=0.75 \mu\text{m}$ 和 $r_2=0.60 \mu\text{m}$; 外圈气孔的半径为 $r_3=0.90 \mu\text{m}$ 。内圈相邻气孔圆心间距 $\Delta=3.00 \mu\text{m}$, 外圈相邻气孔圆心间距为 $\sqrt{3}\Delta$; C 形凹槽通道的半径为 $r_4=1.00 \mu\text{m}$, D 形截面与纤芯圆心之间的距离 $h=6.00 \mu\text{m}$ 。为了激发表面等离子体, 在 C 形凹槽通道的内表面上沉积了一层厚度为 $t_2=50 \text{ nm}$ 的 Au 膜, 刻蚀凹槽的优点是增加了芯模到等离子体模的有效耦合距离, 从而增大了两种模式之间的耦合强度, 另外, 从制作角度来看, 相较于在气孔内部涂覆金属膜, 也显著降低了工艺难度。金属涂层能在光纤截面激发 SPR 效应, 但金属的缺点是长时间容易氧化, 因此为了增强对 Au 层的保

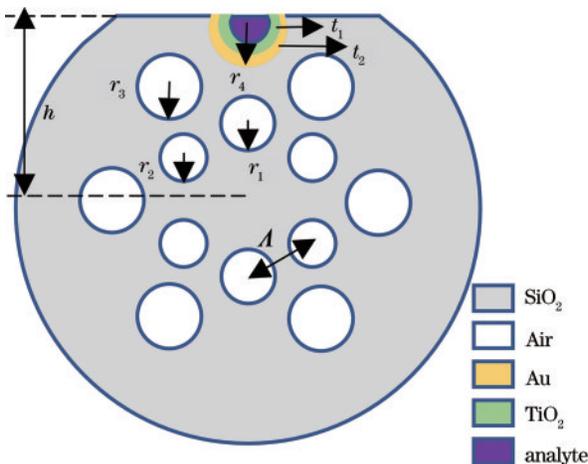


图 1 光纤传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber optic sensor structure

护, 提高传感器的可重复使用性, 在 Au 层上方增加一层厚度为 $t_1=20 \text{ nm}$ 的氧化层 TiO₂。分析物存在于 C 形凹槽通道内。

采用堆叠法、拉伸法以及侧面抛光研磨法制造 D 形光纤, Au 膜和氧化层薄膜用化学沉积技术涂覆^[12]。纤芯材料是熔融石英, 根据 Sellmeier 方程确定折射率^[13]:

$$n^2 = 1 + \frac{0.696166300\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + \frac{0.407942600\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.897479400\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161^2} \quad (1)$$

Au 的介电常数采用 Drude 模型^[14]:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_1 + i\epsilon_2 = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\omega_c)} \quad (2)$$

式中: $\epsilon_\infty=9.75$ 是 Au 在高频下的介电常数; $\omega_p=1.36 \times 10^{16}$ 是等离子体频率; $\omega_c=1.45 \times 10^{14}$ 是电子的散射频率; ω 是入射光的角频率。

TiO₂ 介电常数公式如下^[15]:

$$n^2 = 5.913 + \frac{0.2441}{\lambda^2 - 0.0803} \quad (3)$$

在波导光学领域, 根据以下方程式计算限制损耗^[16]:

$$\alpha_i(\text{dB/cm}) = 8.686k_0 \text{Im}[n_{\text{eff}}(\lambda)] \times 10^4 \quad (4)$$

式中: $k_0=2\pi/\lambda$ 是真空中波数; $\text{Im}[n_{\text{eff}}(\lambda)]$ 是纤芯芯模有效折射率的虚部。

3 仿真结果

计算了当分析物折射率 $n_a=1.26$ 时, 芯模 (core mode) 和表面等离子体模 (SPP mode) 之间的色散关系以及该传感器的耦合特性, 结果如图 2 所示。随着

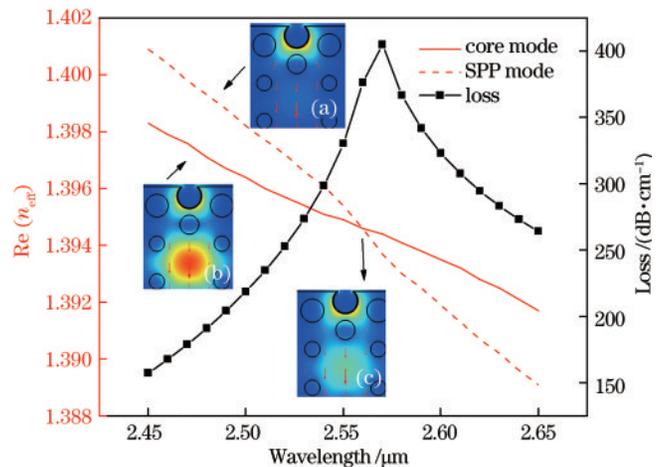


图 2 分析物折射率 $n_a=1.26$ 时模式色散特性与限制损耗。
(a) 2.45 μm 处的 SPP 模; (b) 2.45 μm 处的芯模;
(c) 2.56 μm 处的耦合模式

Fig. 2 Mode dispersion characteristics and confinement loss when analyte refractive index $n_a=1.26$. (a) SPP mode at 2.45 μm ; (b) core mode at 2.45 μm ; (c) coupled mode at 2.56 μm

工作波长的增加,从 2.45 μm 开始,芯模和 SPP 模的有效折射率的实部相互接近,从芯模转移到 SPP 模的能量逐渐增加,导致限制损耗逐渐增加。在相位匹配条件下,即两种模式的有效折射率的实部在 2.56 μm 处匹配时,最大能量从芯模转移到 SPP 模,此时在损耗曲线处观察到一个尖峰。图 2(a)和 2(b)是在非谐振波长 2.45 μm 处 SPP 模和芯模的电场强度。如图 2(c)所示,在相位匹配时芯模和 SPP 模的电场强度基本一致,在此时两种模式的耦合达到最大。

结构参数的优化对于传感器设备的稳定性和有效的传感响应都是至关重要的。通常,限制损耗是考量光纤传感器性能的最佳参数之一,因此,选择限制损耗 $\alpha(\lambda)$ 作为本研究中的传感参数,用于优化结构参数并评估传感性能。

首先分析 TiO_2 层厚度对传感性能的影响,固定其他参数条件不变,分别计算了未涂覆 TiO_2 层、涂覆 20 nm TiO_2 层、涂覆 40 nm TiO_2 层时的芯模限制损耗,结果如图 3 所示。增加 TiO_2 层厚度时,峰值损耗相较于未涂覆 TiO_2 时有所增加,随着厚度增加,损耗谱谐振波长发生红移。由图 3 可知,在 20 nm 处,峰值损耗最大,计算值为 405 dB/cm,因此选择 20 nm TiO_2 层作为最优参数。

下面改变气孔半径大小 r_1 、 r_2 、 r_3 及气孔圆心间隔

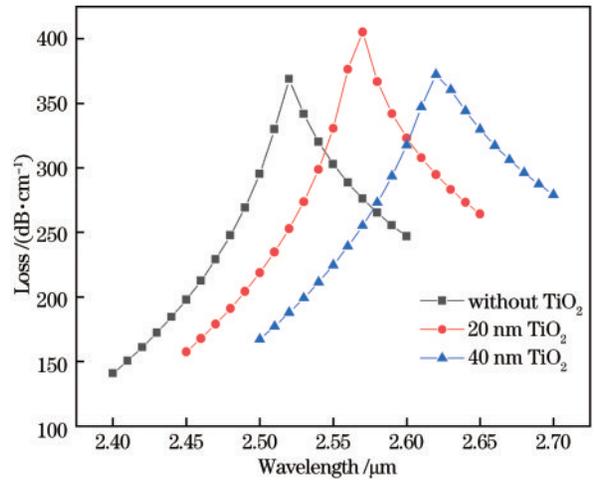


图 3 不同 TiO_2 厚度时的限制损耗
Fig. 3 Confinement losses at different TiO_2 thicknesses

Δ ,如图 4(a)所示,当 $r_1=0.725 \mu\text{m}$ 时,计算得到的峰值损耗为 406 dB/cm;当 $r_1=0.750 \mu\text{m}$ 时,计算得到的峰值损耗为 405 dB/cm;当 $r_1=0.775 \mu\text{m}$ 时,计算得到的峰值损耗为 204 dB/cm。 r_1 增大时峰值损耗显著降低。 r_1 为 0.750 μm 和 r_1 为 0.725 μm 时峰值损耗相差不大,考虑到当 $r_1=0.750 \mu\text{m}$ 时损耗谱的半峰全宽 (FWHM) 最窄,更有利于实际应用中的检测,选择 $r_1=0.750 \mu\text{m}$ 作为最优参数。

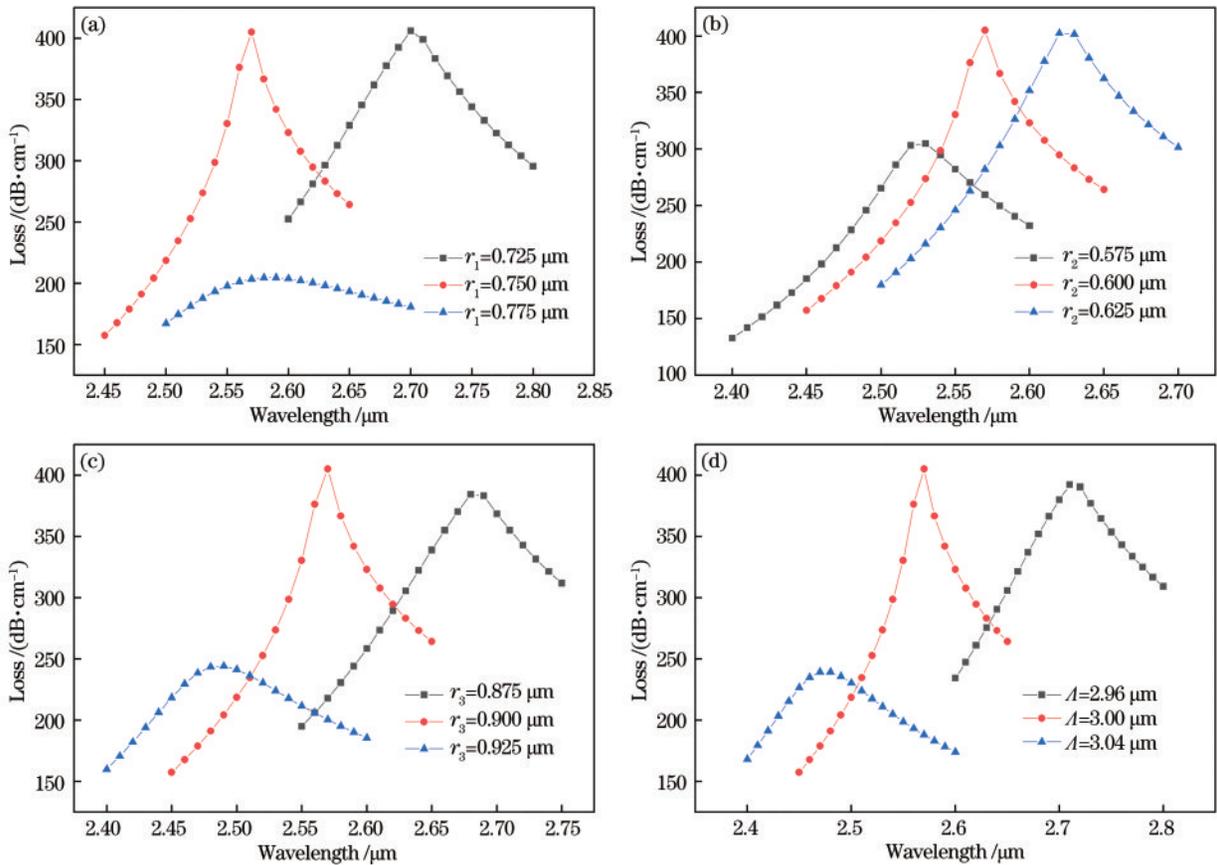


图 4 不同条件下的限制损耗。(a) 不同的 r_1 ; (b) 不同的 r_2 ; (c) 不同的 r_3 ; (d) 不同相邻气孔间隔 Δ
Fig. 4 Confinement losses under different conditions. (a) Different r_1 ; (b) different r_2 ; (c) different r_3 ; (d) different adjacent stomatal spacing Δ

观察图 4(b)可知, r_2 的值从小增大时, 损耗谱的谐振波长逐渐红移, 当 $r_2=0.575 \mu\text{m}$ 时, 计算得到的峰值损耗为 304 dB/cm ; 当 $r_2=0.625 \mu\text{m}$ 时, 计算得到的峰值损耗为 402 dB/cm 。在 $r_2=0.600 \mu\text{m}$ 时得到最大峰值损耗, 此时, 芯模到 SPP 模的耦合强度最大, 观察到的谱形状最尖锐, FWHM 最窄, 更有利于检测。因此选择 $r_2=0.600 \mu\text{m}$ 作为最佳参数。

观察图 4(c)、4(d)可知, r_3 、 Δ 的值从小增大时, 损耗谱的谐振波长逐渐蓝移, 分别在 $r_3=0.9 \mu\text{m}$ 、 $\Delta=3.0 \mu\text{m}$ 得到最大峰值损耗, 此时, 芯模到 SPP 模的耦合强度最大, 观察到的谱形状最尖锐, FWHM 最窄, 更有利于检测。因此选择 $r_3=0.9 \mu\text{m}$ 、 $\Delta=3.0 \mu\text{m}$ 作为最佳参数。

改变 C 形凹槽半径 r_4 , 如图 5(a) 所示, 当 r_4 距离从 $0.98 \mu\text{m}$ 增大到 $1.02 \mu\text{m}$ 时, 谐振条件下的峰值损耗先增大然后减小, 计算所得当 $r_4=0.98 \mu\text{m}$ 时, 峰值

损耗为 377 dB/cm ; 当 $r_4=1.02 \mu\text{m}$ 时, 峰值损耗为 213 dB/cm 。在 $1.00 \mu\text{m}$ 处峰值损耗最大, 耦合效率最好, FWHM 最窄, 更有利于检测。因此, 选择 $r_4=1.00 \mu\text{m}$ 作为最优参数。另外, 也可观察到随着半径 r_4 增大, 损耗谱谐振波长发生蓝移。

改变 D 形截面与纤芯圆心之间的距离 h 来观察对光纤耦合性能和传感器性能的影响, 如图 5(b) 所示, h 在 $5.97 \mu\text{m}$ 时的峰值损耗最小, 值为 246 dB/cm ; 在 $6.00 \mu\text{m}$ 处最大, 值为 405 dB/cm ; 增大到 $6.03 \mu\text{m}$ 时, 峰值损耗变小, 值为 391 dB/cm 。距离的微小变化对限制损耗的影响较大, 选择合适的结构参数能对传感器的传感性能有很大程度上的提升, 为了得到更大的芯模限制损耗, 选择 $h=6.00 \mu\text{m}$ 作为最优参数。在 $h=6.00 \mu\text{m}$ 时观察到的损耗谱 FWHM 最窄, 在实际应用中的检测灵敏度更高。另外, 随着距离 h 增大, 谐振波长逐渐红移。

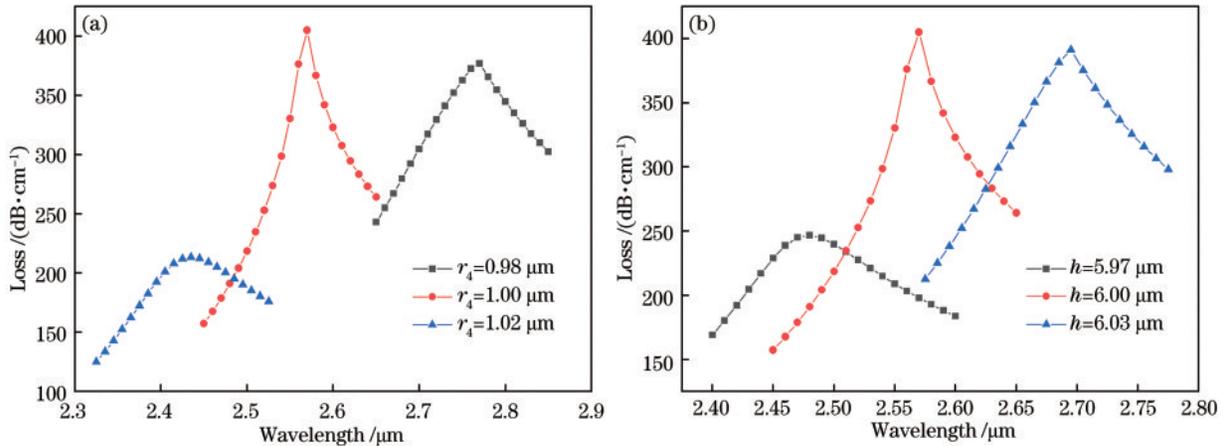


图 5 不同条件下的限制损耗。(a) 不同的 r_4 ; (b) 不同截面到圆心的间距 h

Fig. 5 Confinement losses under different conditions. (a) Different r_4 ; (b) distance h from different sections to center of circle

改变 Au 膜厚度, 如图 6 所示, 随着 Au 膜厚度的增加, 谐振波长逐渐蓝移, 且峰值损耗逐渐变低, 在 $t_2=50 \text{ nm}$ 时, 损耗谱峰值损耗最大, 芯模到 SPP 模的耦合效果更好。太厚的 Au 层会使阻尼增大, 倏逝场削弱, 为了得到更好的传感效果选择 50 nm 的 Au 层作为最优参数。

传感器灵敏度使用如下公式^[17]计算:

$$S(\lambda) (\text{nm}/\text{RIU}) = \frac{\Delta\lambda_{\text{peak}}}{\Delta n_a}, \quad (5)$$

式中: $\Delta\lambda_{\text{peak}}$ 是谐振波长偏移量; Δn_a 是分析物折射率的变化。用以上灵敏度公式计算传感器灵敏度, 采用多项式拟合曲线, 得到结果如图 7 所示, 图 7(a) 显示随着分析物折射率的增加, 谐振波长逐渐红移。多项式拟合结果如图 7(b) 所示, 在 $n_a=1.29$ 时获得最大灵敏度为 $24236 \text{ nm}/\text{RIU}$ 。

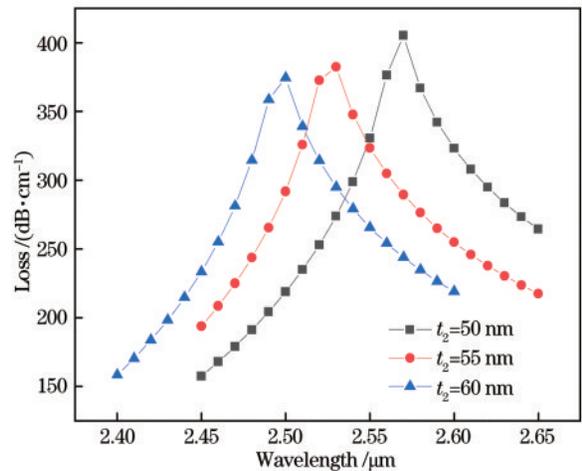


图 6 不同 Au 膜厚度时的限制损耗

Fig. 6 Confinement losses with different Au film thicknesses

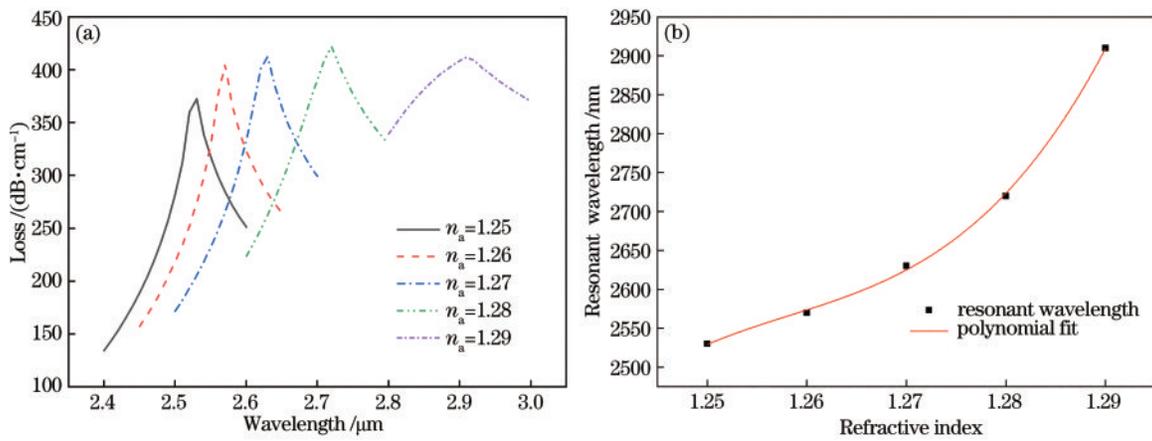


图7 传感性能分析。(a)不同分析物折射率时的限制损耗;(b)谐振波长与对应折射率的拟合

Fig. 7 Sensing performance analysis. (a) Confinement losses for different analyte refractive indices; (b) fitting of resonance wavelength to corresponding refractive index

4 结 论

详细分析了一种基于侧面抛光的新型D形SPR-PCF的高灵敏度折射率传感器。在D形截面处刻蚀C形凹槽通道,并在其上面涂覆Au膜作为等离激元材料激发SPR,添加一层高折射率TiO₂层,增强了对金属层的保护,将工作波长调谐至红外区域,大大提高了传感器的灵敏度。采用有限元法研究了不同结构参数对传感性能的影响。研究表明,该传感器在低折射率范围1.25~1.29内表现出良好的传感响应,分析物折射率为1.29时,获得的最大灵敏度为24236 nm/RIU。因此,所提出的结构在医学、化学和生物检测等领域具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] 范振凯, 张子超, 王保柱, 等. 基于表面等离子体共振效应的光子晶体光纤折射率传感器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 070004.
Fan Z K, Zhang Z C, Wang B Z, et al. Research progress of photonic crystal fiber refractive index sensors based on surface plasmon resonance effect[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(7): 070004.
- [2] 马健, 余海湖, 熊家国, 等. 光子晶体光纤传感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070006.
Ma J, Yu H H, Xiong J G, et al. Research progress of photonic crystal fiber sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070006.
- [3] 刘海, 白冰冰, 张昶曾, 等. 基于SPR效应的金-PDMS涂覆光子晶体光纤高灵敏度温度测量[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0404003.
Liu H, Bai B B, Zhang Y Z, et al. High-sensitivity temperature measurement based on SPR in gold-PDMS-coated photonic crystal fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0404003.
- [4] 冯宪, 杨志勇, 施进丹. 超大模场硫系玻璃光子晶体光纤研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101006.
Feng X, Yang Z Y, Shi J D. Progress in chalcogenide glass photonic crystal fibers with ultra-large mode area[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101006.
- [5] 王双双, 黄勇林, 詹平. 基于正十六边形光子晶体光纤的表面等离子体共振传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(7): 0706001.
Wang S S, Huang Y L, Zhan P. Surface plasmon resonance sensor based on photonic crystal fiber in regular hexadecagon[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(7): 0706001.
- [6] 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 Journal, 2019, 11(5): 7905309.
- [7] Gangwar R K, Amorim V A, Marques P V S. High performance titanium oxide coated D-shaped optical fiber plasmonic sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(20): 9244-9248.
- [8] Zhang Z, Li S G, Liu Q, et al. Groove micro-structure optical fiber refractive index sensor with nanoscale gold film based on surface plasmon resonance[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 43: 45-48.
- [9] Bai Y K, Wang B, Ma X R. Versatile infrared refractive-index sensor based on surface plasmon resonance in graphene sheet[J]. Optical Engineering, 2018, 57(3): 037107.
- [10] Yang Z, Xia L, Li C, et al. A surface plasmon resonance sensor based on concave-shaped photonic crystal fiber for low refractive index detection[J]. Optics Communications, 2019, 430: 195-203.
- [11] Liu C, Yang L, Lu X L, et al. Mid-infrared surface plasmon resonance sensor based on photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14227-14237.
- [12] Liu L, Deng S J, Zheng J, et al. An enhanced plastic optical fiber-based surface plasmon resonance sensor with a double-sided polished structure[J]. Sensors, 2021, 21(4): 1516.
- [13] Singh S, Mishra S K, Gupta B D. Sensitivity enhancement of a surface plasmon resonance based fibre optic refractive index sensor utilizing an additional layer of oxides[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013,

- 193: 136-140.
- [14] 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.
- [15] Al-Qazwini Y, Noor A S M, Yadav T K, et al. Performance evaluation of a bilayer SPR-based fiber optic RI sensor with TiO₂ using FDTD solutions[J]. Photonic Sensors, 2014, 4(4): 289-294.
- [16] 张文, 白冰冰, 张砚曾, 等. 基于新型光子晶体光纤近红外波段的传感特性[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0706001.
- Zhang W, Bai B B, Zhang Y Z, et al. Sensing characteristics of near-infrared band based on new photonic crystal fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0706001.
- [17] 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 H Y, Zhao L J, Xu Z N. Sensor based on D-shaped photonic crystal fiber for low refractive index detection[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(20): 2006002.