

## 激光与光电子学进展

基于表面等离子体共振的椭圆侧芯光子晶体  
光纤传感器研究

刘敏, 黄勇林\*, 詹平

南京邮电大学电子与光学工程、微电子学院, 江苏 南京 210023

**摘要** 设计出一种高灵敏度的新型椭圆侧芯光子晶体光纤传感器模型。圆形孔和 3 种不同大小椭圆孔构成该椭圆侧芯光子晶体光纤空气孔, 其中椭圆孔的椭圆率分别为  $e$ 、 $e_1$ 、 $e_2$ , 在椭圆率为  $e$  的左侧椭圆孔内涂敷金纳米薄膜。通过有限元分析软件 COMSOL 对传感器的传感特性进行数值分析。研究发现: 表面等离子体共振的共振峰对待测液体折射率的变化有很高的传感灵敏度; 光子晶体光纤传感器的灵敏度会随着椭圆率  $e$ 、 $e_1$  以及金纳米薄膜的厚度而变化。折射率在 1.40~1.42 范围内, 传感器灵敏度随着  $e_1$  的增大而增大; 折射率在 1.42~1.43 范围内, 传感器灵敏度随着  $e_1$  的增大先减小再增大。当椭圆率  $e_1=1.2$ 、折射率为 1.43 时, 灵敏度高达 31800 nm/RIU (折射率单元)。折射率在 1.38~1.43 范围内, 传感器灵敏度随着椭圆率  $e$  的增大而增大, 当椭圆率  $e=2.3$  时, 灵敏度高达 33200 nm/RIU。折射率在 1.42~1.43 范围内, 传感器灵敏度随着金纳米薄膜厚度的增大而减小, 在折射率为 1.43、金纳米薄膜厚度为 40 nm 时, 传感器灵敏度高达 34600 nm/RIU。

**关键词** 传感器; 数值分析; 椭圆率; 灵敏度

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212951

Elliptical Side-Core Photonic Crystal-Fiber Sensor Based on  
Surface Plasmon Resonance

Liu Min, Huang Yonglin\*, Zhan Ping

School of Electronic and Optical Engineering & Microelectronics, Nanjing University of Posts and  
Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China

**Abstract** A new model of high-sensitivity elliptical side-core photonic crystal-fiber sensor is designed. A circular hole and three elliptical holes of different sizes constitute the elliptical side-core photonic crystal-fiber air hole, where the  $e$ ,  $e_1$ , and  $e_2$  are the ellipticities of the elliptical holes, and the gold-nano-film is coated in the left elliptical hole with the ellipticity  $e$ . The finite element analysis software, COMSOL, is used to numerically analyze the sensing characteristics of the sensor. We found that the resonant peak of surface plasmon resonance has a high sensitivity to the change in the refractive index of the measured liquid; the sensitivity of the photonic crystal-fiber sensor varies with ellipticities  $e$ ,  $e_1$  and the gold-nano-film thickness. Within the refractive index range of 1.40-1.42, the sensor sensitivity increases with increasing  $e_1$ ; within the refractive index range of 1.42-1.43, the sensor sensitivity initially decreases and then increases with increasing  $e_1$ . When ellipticity  $e_1$  is 1.2, and the refractive index is 1.43, the sensitivity reaches as high as 31800 nm/RIU (refractive index). At a refractive index of 1.38-1.43, the sensor sensitivity increases with increasing ellipticity  $e$ . When ellipticity  $e$  is 2.3, the sensitivity reaches as high as 33200 nm/RIU. When the refractive index is 1.42-1.43, the sensor sensitivity decreases with an increase in the gold-nano-film thickness. When the refractive index is 1.43, and the gold-nano-film thickness is 40 nm, the sensor sensitivity reaches as high as 34600 nm/RIU.

**Key words** sensors; numerical analysis; ellipticity; sensitivity

## 1 引言

表面等离子体共振 (Surface plasmon resonance,

SPR)<sup>[1]</sup>是纳米金属薄膜表面自由电子与光子相互作用而产生的一种谐振吸收现象<sup>[2]</sup>。当表面等离子体激元 (Surface plasmon polariton, SPP) 与相同频率和波

收稿日期: 2021-11-12; 修回日期: 2021-11-22; 录用日期: 2021-12-01; 网络首发日期: 2021-12-10

基金项目: 江苏省光通信工程技术研究中心项目 (ZXF201804)

通信作者: \*huangyl@njupt.edu.cn

矢的倏逝波<sup>[3]</sup>共振时,入射光的能量被耦合到表面等离子体中,反射光能量急剧下降,在光谱中出现共振峰,当介质折射率变化时,共振峰位置会相应变化,而共振峰所对应的波长即为共振波长<sup>[4]</sup>。SPR技术的无需标记、实时监测、方便快捷等特点使 SPR 传感器在环境检测、医疗检测等领域具有广泛的应用需求<sup>[5]</sup>。

近年来 SPR-PCF 基于 SPR 的光子晶体光纤 (Photonic crystal fiber, PCF) 传感器受到了众多学者的密切关注。2015 年,施伟华等<sup>[6]</sup>设计出一种基于 SPR 和定向耦合的新型 D 形 PCF 传感器模型,折射率在 1.34~1.44 之间,达到了 26000 nm/RIU (折射率单元) 的灵敏度。2017 年,梁红勤等<sup>[7]</sup>设计出一种新型 SPR 折射率传感器模型,折射率在 1.45~1.50 之间,达到了 10412 nm/RIU 的灵敏度。2020 年,魏方皓等<sup>[8]</sup>设计出一种新型 PCF 传感器模型,折射率在 1.31~1.38 之间,达到 10<sup>4</sup> nm/RIU 的灵敏度。2020 年,房黎明<sup>[9]</sup>设计出新型 PCF 折射率传感器,对于涂敷金的新型 PCF 折射率传感器,折射率在 1.26~1.30 之间,达到 8100 nm/RIU 的灵敏度;对于涂敷铜材料新型 PCF 折射率传感器,折射率在 1.31~1.35 之间,达到 9600 nm/RIU 的灵敏度。可见,科研人员设计出了多种不同结构的 SPR-PCF 传感器,但是传感器的灵敏度还有待于进一步提高。

本文设计出基于 SPR 的椭圆侧芯 PCF 传感器模型,在左侧椭圆检测孔内涂敷金纳米薄膜,实现对液体折射率的检测,具有高灵敏度。研究表明:该传感器在液体折射率为 1.38~1.43 时具有高灵敏度,且传感器的灵敏度会随着金纳米层厚度和椭圆孔的椭圆率变化而变化。

## 2 理论模型

基于 SPR 的椭圆侧芯 PCF 传感模型如图 1 所示。包层由 4 层空气孔组成,空气孔间距  $\Lambda=3.9 \mu\text{m}$ ,外 3 层由直径  $d=2.2 \mu\text{m}$  的圆形孔组成,呈正六边形;最内层由 3 种不同大小椭圆孔组成。椭圆孔的短轴直径分别为  $a=3 \mu\text{m}$ ,  $a_1=1.92 \mu\text{m}$ ,  $a_2=0.5 \mu\text{m}$ ,长轴直径分别为  $b=3.6 \mu\text{m}$ ,  $b_1=2.4 \mu\text{m}$ ,  $b_2=0.6 \mu\text{m}$ ,椭圆的长轴

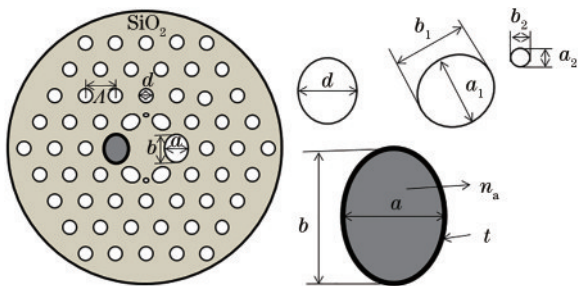


图 1 基于 SPR 的椭圆侧芯 PCF 传感模型

Fig. 1 SPR-based PCF sensing model with elliptical side core

直径与短轴直径的比值定义为椭圆率,其值分别为  $e=b/a=1.2$ ,  $e_1=b_1/a_1=0.8$ ,  $e_2=b_2/a_2=1.2$ ,其中最小椭圆孔位置坐标为  $(0, 1.1\Lambda)$ 。左侧椭圆孔填充待测液体作为液体通道,待测液体折射率  $n_a$  由 Drude<sup>[10]</sup> 模型得出,且孔内涂敷一层厚度  $t=45 \text{ nm}$  的金纳米薄膜,利用高压微流化学沉淀法<sup>[11]</sup> 制备实现。二氧化硅作为本文提出的新型 PCF 结构的背景材料,其折射率由 Sellmeier<sup>[12-14]</sup> 方程确定。

## 3 传感特性分析

讨论液体通道折射率  $n_a$  在 1.32~1.43 范围内基于 SPR 效应的传感特性。

纤芯损耗<sup>[15]</sup> 定义为

$$\alpha_{\text{loss}} = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (1)$$

式中:纤芯损耗的单位为 dB/cm;  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  为折射率虚部; $\lambda$  为光波长。

图 2 是液体折射率  $n_a=1.40$  时,  $x$ 、 $y$  偏振 ( $x$ -pol,  $y$ -pol) 的纤芯基模损耗随波长变化的曲线图。由图可见  $x$  偏振纤芯基模产生的损耗更大、更明显、更有利于观察,因此后续均以  $x$  偏振模为研究对象。利用 COMSOL Multiphysics 软件中电磁波、频域分析对模型实现模式分析,得到 SPP 模与纤芯模的分布结果,如图 3 所示。

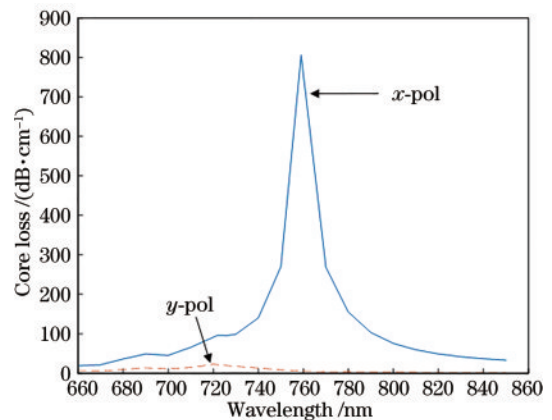


图 2  $n_a=1.40$  时  $x$ 、 $y$  偏振的纤芯基模损耗随波长变化的曲线图  
Fig. 2 Graph of  $x$  and  $y$  polarization of core fundamental mode loss versus wavelength when  $n_a=1.40$

图 4 为液体折射率  $n_a=1.40$  时,随着入射波长变化的纤芯损耗、有效折射率实部的变化曲线。在纤芯损耗曲线图中, SPP1、SPP2、SPP3 分别为 3 个共振峰对应的模式。SPP1、SPP2、SPP3 模式的有效折射率实部与纤芯基模的有效折射率实部相交时,纤芯能量大部分转移到左侧椭圆孔内金纳米薄膜中,发生 SPR 效应。当基模有效折射率发生跃变时,光纤损耗达到最大值,损耗峰对应的波长 759 nm 为共振波长,此时损耗峰值、SPP1 模式与基模的交点与共振波长在图中位于一条直线上。

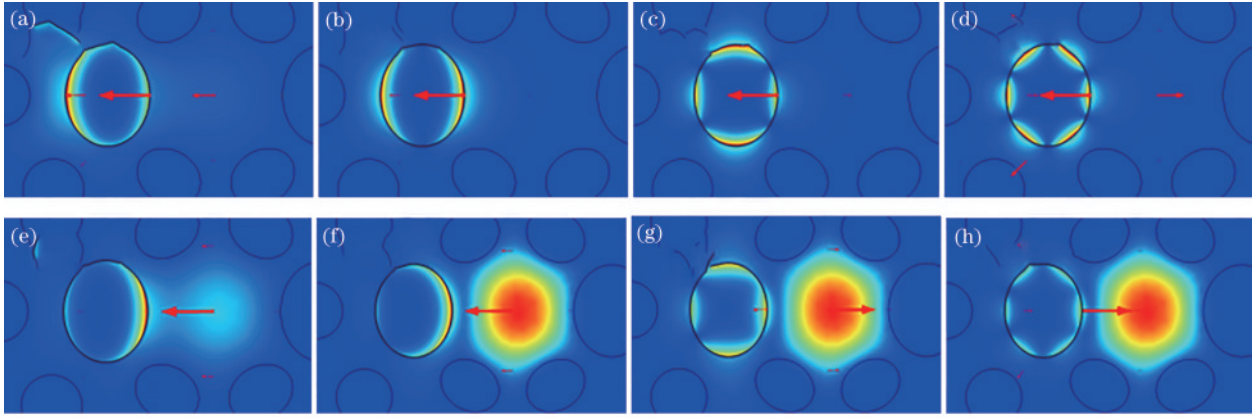


图 3 SPP 模式与纤芯模式仿真结果。(a) 0 阶 SPP 模;(b) 一阶 SPP 模;(c) 二阶 SPP 模;(d) 三阶 SPP;(e) 0 阶纤芯模;(f) 一阶纤芯模;(g) 二阶纤芯模;(h) 三阶纤芯模

Fig. 3 SPP mode and core mode simulation results. (a) 0-order SPP mode; (b) 1-order SPP mode; (c) 2-order SPP mode; (d) 3-order SPP mode; (e) 0-order core mode; (f) 1-order core mode; (g) 2-order core mode; (h) 3-order core mode

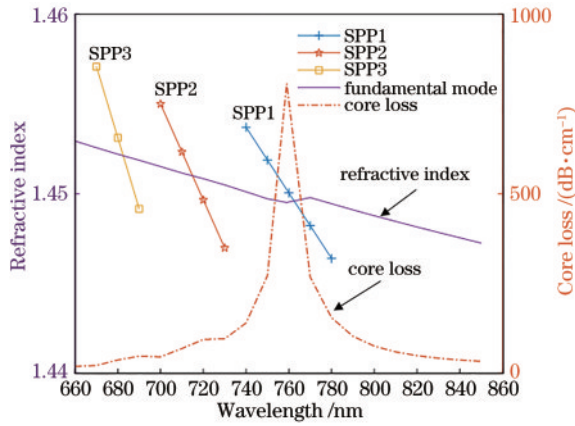


图 4  $n_a=1.40$  时纤芯损耗、有效折射率实部随入射波长的变化曲线

Fig. 4 Core loss and real part of effective refractive index vary with incident wavelength when  $n_a=1.40$

图 5 是在不同待测液体折射率下的纤芯损耗曲线,可以发现待测物折射率  $n_a$  在 1.40~1.42 范围内,由

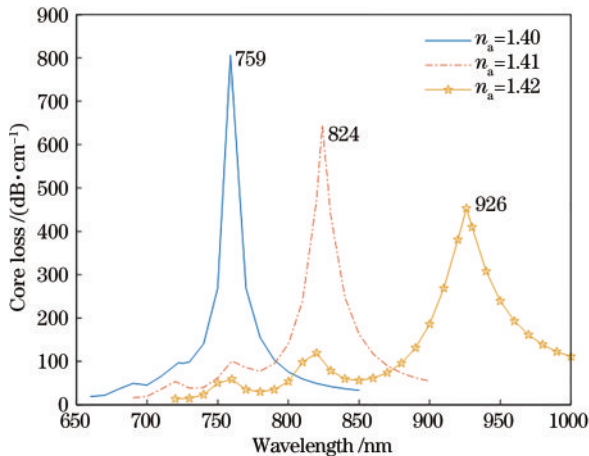


图 5 不同待测液体折射率下的纤芯损耗曲线

Fig. 5 Core loss curve under different refractive indexes of the liquid to be measured

于纤芯基模与等离子体基模之间强烈的共振耦合,随着待测液体折射率的增大,纤芯损耗峰值往长波长方向移动,纤芯损耗最大值不断减小,即发生 SPR 效应时,转移到左侧椭圆孔内金纳米薄膜中的能量减少。

椭圆率  $e$ 、 $e_1$  以及金纳米薄膜厚度是传感器灵敏度的主要影响因素,因此使用控制变量法分别研究它们对灵敏度的影响。

灵敏度定义为<sup>[16]</sup>

$$S(\lambda) = \frac{\Delta\lambda_{\text{peak}}}{\Delta n_a} \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_{\text{peak}}$  为共振波长随折射率变化的偏移量; $\Delta n_a$  为待测液体折射率的变化值。

当椭圆率  $e$  变化时,共振波长随折射率的变化情况如图 6(a) 所示。折射率在 1.32~1.43 范围内,共振波长随着待测液体折射率增大而增大。折射率在 1.38~1.43 区间内,当椭圆率从 1.2 增大到 2.3 时,共振波长不断增大,即椭圆率的增加使纤芯损耗峰往长波长方向移动,而椭圆率的增加对折射率在 1.32~1.38 区间内的共振波长影响不大。当椭圆率  $e$  变化时,折射率与纤芯损耗关系如图 6(b) 所示。纤芯损耗随着液体折射率增加先增大再减小,最后再增大。随着椭圆率的增加,损耗最大值往低折射率方向移动。当椭圆率  $e$  变化时,传感器的灵敏度随待测液体折射率的变化情况如图 6(c) 所示。光子晶体光纤传感器的灵敏度随着液体折射率的增加而增大。折射率在 1.38~1.42 区间内,传感器的灵敏度随着椭圆率  $e$  的增大而增大,在液体折射率  $n_a=1.43$ 、椭圆率  $e=2.3$  时,灵敏度高达 33200 nm/RIU。

当  $e_1$  变化时待测液体折射率与共振波长的关系如图 7(a) 所示。椭圆率  $e_1$  对传感器灵敏度的影响如图 7(b) 所示。表 1 为折射率在 1.40~1.43 范围内,当椭圆率  $e_1$  取不同值时共振波长和灵敏度的大小。折射率在 1.40~1.42 范围内,当椭圆率  $e_1$  从 0.8 增大到 1.2 时,



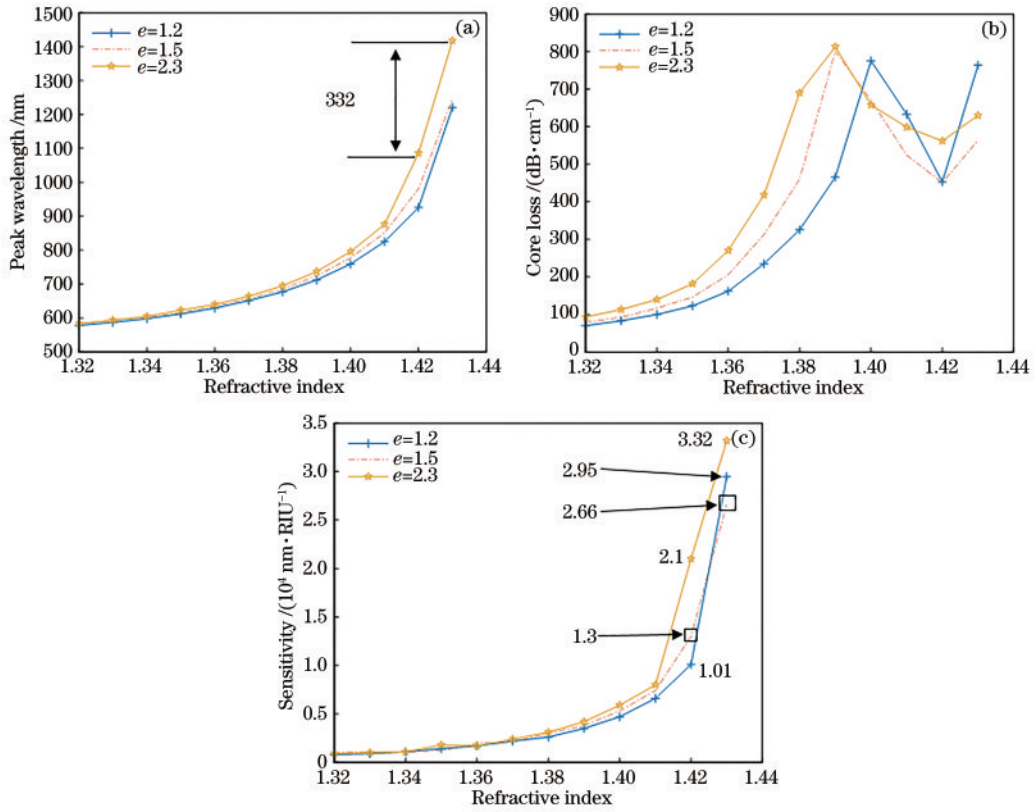


图 6  $e$  取不同值时,待测液体折射率与共振波长、纤芯损耗、传感器灵敏度的关系图。(a) 共振波长;(b) 纤芯损耗;(c) 传感器灵敏度  
Fig. 6 Relationship between refractive index of the liquid to be measured and resonance wavelength, core loss, sensor sensitivity when  $e$  takes different values. (a) Resonance wavelength; (b) core loss; (c) sensor sensitivity

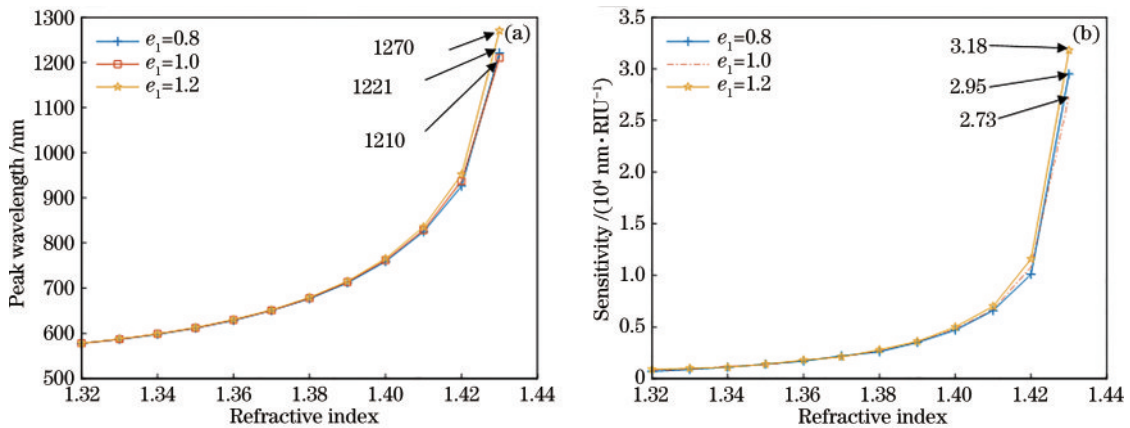


图 7  $e_1$  取不同值时,待测液体折射率与共振波长、传感器灵敏度的关系图。(a) 共振波长;(b) 传感器灵敏度  
Fig. 7 Relationship between refractive index of the liquid to be measured and resonance wavelength, sensor sensitivity when  $e_1$  takes different values. (a) Resonance wavelength; (b) sensor sensitivity

共振波长和灵敏度都不断增大;折射率在 1.42~1.43 范围内,随着  $e_1$  的增大,共振波长和灵敏度先减小再增大,在  $e_1=1.2, n_s=1.43$  时灵敏度高达 31800 nm/RIU, 而  $e_1$  的变化对折射率 1.32~1.40 区间内的共振波长和灵敏度影响不大。

待测液体折射率  $n_s=1.40$ ,金纳米薄膜在不同厚度下,纤芯损耗随波长变化的曲线如图 8 所示。由图可知,当金纳米薄膜厚度  $t$  不断增大时,纤芯损耗峰值往长波长方向移动,损耗峰值先增大再减小。当  $t=$

45 nm 时,损耗值最大,其值为 806.32 dB/cm,共振波长为 759 nm,此时共振效果最佳。金纳米厚度  $t$  变化时,灵敏度与待测液体折射率的关系如图 9 所示。折射率在 1.42~1.43 范围内,当金纳米薄膜厚度从 40 nm 增大到 50 nm 时,灵敏度不断减小,在折射率  $n_s=1.43$ ,且当金纳米薄膜厚度  $t=40$  nm 时,传感器灵敏度高达 34600 nm/RIU;而折射率处于 1.32~1.42 范围内,金纳米薄膜的厚度变化对传感器的灵敏度影响不大。

表 1 折射率在 1.40~1.43 范围内,椭圆率  $e_1$  不同取值对应的共振波长和灵敏度

Table 1 Resonance wavelength and sensitivity corresponding to different values of ellipticity  $e_1$  in the range of 1.40~1.43 for refractive index

$n_a$	$e_1$ /nm	Peak wavelength /nm	Sensitivity / (nm·RIU <sup>-1</sup> )
1.40	0.8	759	4700
	1.0	762	4800
	1.2	766	5000
1.41	0.8	825	6600
	1.0	829	6700
	1.2	836	7000
1.42	0.8	926	10100
	1.0	937	10800
	1.2	952	11600
1.43	0.8	1221	29500
	1.0	1210	27300
	1.2	1270	31800

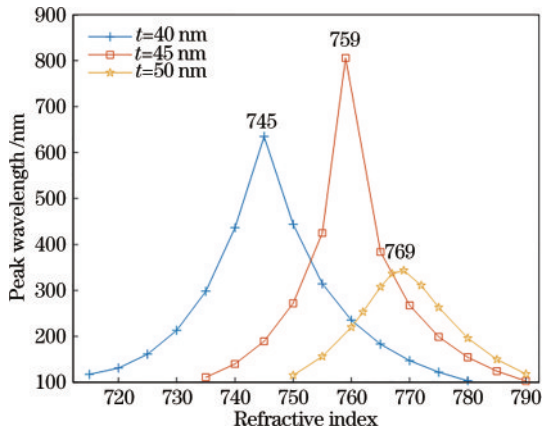


图 8 不同金纳米层厚度下的纤芯损耗曲线

Fig. 8 Core loss curves under different gold nanolayer thicknesses

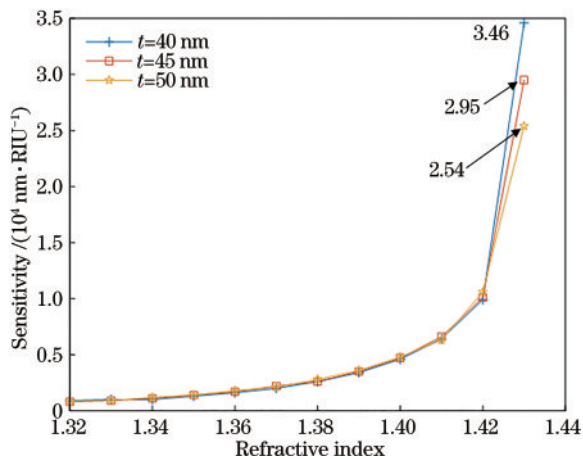


图 9 不同金纳米厚度下,待测液体折射率与传感器灵敏度的关系图

Fig. 9 Relationship between the refractive index of the liquid to be measured and sensor sensitivity under different gold nanolayer thicknesses

## 4 结 论

设计出一种具有高灵敏度的基于 SPR 的椭圆侧芯 PCF 传感器,包层由圆形空气孔和几个大小不同的椭圆孔组成,其中左侧椭圆孔内涂敷金纳米薄膜,作为 SPR 传感液体通道。该 PCF 传感器在折射率为 1.38~1.43 范围内具有高灵敏度,并且传感器灵敏度会随着椭圆率  $e_1$  以及金纳米薄膜厚度而变化。折射率在 1.40~1.42 范围内,传感器灵敏度随着  $e_1$  的增大而增大;折射率在 1.42~1.43 范围内,传感器灵敏度随着  $e_1$  的增大先减小再增大。当椭圆率  $e_1=1.2$ ,折射率 1.43 时,灵敏度高达 31800 nm/RIU。折射率在 1.38~1.43 范围内,传感器灵敏度随着椭圆率  $e$  的增大而增大,在椭圆率  $e=2.3$  时,灵敏度高达 33200 nm/RIU。折射率在 1.42~1.43 范围内,传感器灵敏度随着金纳米薄膜厚度的增大而减小,在折射率为 1.43、金纳米薄膜厚度为 40 nm 时,灵敏度达到最大值 34600 nm/RIU。该基于 SPR 的椭圆侧芯 PCF 传感器实现了很高的灵敏度,可应用于高灵敏度传感器,在含量测量等方面有很大的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] 魏方皓,张祥军,唐守锋.高灵敏度光子晶体光纤温度传感器的设计[J].光通信研究,2020(4):43-47.  
Wei F H, Zhang X J, Tang S F. Design of high sensitivity photonic crystal fiber temperature sensor[J]. Study on Optical Communications, 2020(4): 43-47.
- [2] Liu C, Lü J, Liu W, et al. Overview of refractive index sensors comprising photonic crystal fibers based on the surface plasmon resonance effect[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(10): 102202.
- [3] Naraoka R, Okawa H, Hashimoto K, et al. Surface plasmon resonance enhanced second-harmonic generation in Kretschmann configuration[J]. Optics Communications, 2005, 248(1/2/3): 249-256.
- [4] Allsop T, Neal R, Davies E M, et al. Low refractive index gas sensing using a surface plasmon resonance fibre device[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(9): 094029.
- [5] 郭团.等离子体共振光纤光栅生物传感器综述[J].光学学报,2018,38(3):0328006.  
Guo T. Review on plasmonic optical fiber grating biosensors[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328006.
- [6] 施伟华,尤承杰,吴静.基于表面等离子体共振和定向耦合的 D 形光子晶体光纤折射率和温度传感器[J].物理学报,2015,64(22):224221.  
Shi W H, You C J, Wu J. D-shaped photonic crystal fiber refractive index and temperature sensor based on surface plasmon resonance and directional coupling[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(22): 224221.
- [7] 梁红勤,刘彬,陈佳,等.基于双芯光子晶体光纤的高灵敏度椭圆侧芯表面等离子体共振折射率传感特性[J].激光与光电子学进展,2017,54(9):105-111.

- Liang H Q, Liu B, Chen J, et al. High sensitive elliptic side core surface plasmon resonance refractive index sensing characteristics based on dual-core photonic crystal fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 105-111.
- [8] 魏方皓, 张祥军, 唐守锋. 基于表面等离子体共振的光子晶体光纤折射率传感器的设计与分析[J]. *半导体光电*, 2020, 41(1): 35-38, 43.  
Wei F H, Zhang X J, Tang S F. Design and analysis of photonic crystal fiber refractive index sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2020, 41(1): 35-38, 43.
- [9] 房黎明, 陈鹤鸣. 栅状膜双芯 D 型 PCF 折射率传感器[J]. *光通信技术*, 2020, 44(5): 33-37.  
Fang L M, Chen H M. Grating membrane dual core D-type PCF refractive index sensor[J]. *Optical Communication Technology*, 2020, 44(5): 33-37.
- [10] Cao J, Tu M H, Sun T, et al. Wavelength-based localized surface plasmon resonance optical fiber biosensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 181: 611-619.
- [11] 施伟华, 吴静. 基于表面等离子体共振和定向耦合的光子晶体光纤传感器[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0206002.  
Shi W H, Wu J. Photonic crystal fiber sensor based on surface plasmonic and directional resonance coupling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0206002.
- [12] 魏方皓, 张祥军, 唐守锋. 基于表面等离子体共振的光子晶体光纤甲烷气体传感器[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2020, 34(6): 636-640.  
Wei F H, Zhang X J, Tang S F. Methane gas sensor based on surface plasmon resonance and photonic crystal fiber[J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2020, 34(6): 636-640.
- [13] Gasior K, Martynkien T, Wojcik G, et al. D-shape polymer optical fibres for surface plasmon resonance sensing[J]. *Opto-Electronics Review*, 2017, 25(1): 1-5.
- [14] 魏方皓, 张祥军. 基于表面等离子体共振的双通道光子晶体光纤温度传感器[J]. *传感器与微系统*, 2021, 40(4): 77-79.  
Wei F H, Zhang X J. Two-channel photonic crystal fiber temperature sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2021, 40(4): 77-79.
- [15] Jiao S X, Gu S F, Fang H R, et al. Analysis of dual-core photonic crystal fiber based on surface plasmon resonance sensor with segmented silver film[J]. *Plasmonics*, 2019, 14(3): 685-693.
- [16] 魏方皓. 基于表面等离子体共振的光子晶体光纤传感器的设计[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.  
Wei F H. Design of photonic crystal fiber sensor based on surface plasmon resonance[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.