

# 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

梁红勤<sup>1,2</sup>, 刘彬<sup>1,2</sup>, 陈佳<sup>3</sup>, 刘云凤<sup>1,2</sup>, 胡金凤<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>南昌航空大学无损检测与光电传感技术及应用国家地方联合工程实验室, 江西 南昌 330063;

<sup>2</sup>南昌航空大学江西省光电检测技术工程实验室, 江西 南昌 330063;

<sup>3</sup>南昌工学院机械与车辆工程学院, 江西 南昌 330108

**摘要** 提出了一种基于双芯光子晶体光纤(PCF)的高灵敏度椭圆侧芯表面等离子体共振(SPR)折射率传感模型。在各向异性的完美匹配层边界条件下利用全矢量有限元法对传感器特性进行了数值仿真。研究发现:在椭圆侧芯中涂覆金属银纳米层可以实现 SPR,共振峰对检测孔的折射率变化具有很高的传感灵敏度;与圆形结构相比,所提椭圆侧芯结构中的纤芯基模和金属表面等离子体激元(SPP)模式更易实现相位匹配;当椭圆率为 0.7 时,灵敏度在 1.45~1.50 的折射率范围内可达  $10412 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ ,且传感曲线线性度高;椭圆侧芯结构能够有效抑制高阶 SPP 模式,避免基模与多个 SPP 模式耦合形成干扰。

**关键词** 光纤光学; 表面等离子体共振; 光子晶体光纤; 传感器; 有限元法

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.090601

## High Sensitive Elliptic Side Core Surface Plasmon Resonance Refractive Index Sensing Characteristics Based on Dual-Core Photonic Crystal Fiber

Liang Hongqin<sup>1,2</sup>, Liu Bin<sup>1,2</sup>, Chen Jia<sup>3</sup>, Liu Yunfeng<sup>1,2</sup>, Hu Jinfeng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Engineering Laboratory for Non-Destructive Testing and Optoelectronic Sensing

Technology and Applications, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China;

<sup>2</sup>Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China;

<sup>3</sup>Institute of Mechanical and Vehicle Engineering, Nanchang Institute of Science & Technology, Nanchang, Jiangxi 330108, China

**Abstract** A model of refractive index sensing with high sensitivity elliptic side core surface plasmon resonance (SPR) based on dual-core photonic crystal fiber (PCF) is proposed. Properties of a sensor are analyzed by the full vector finite element method with the boundary condition of anisotropic perfectly matched layer. Results show that SPR can be realized in elliptic side core coated with silver nano-layer, and the resonance peak is highly sensitive to the changing refractive index of inspection hole. Compared with that of the circular structure, the phase matching between the fundamental mode of fiber core and the metal surface plasmon polariton (SPP) mode of the elliptic side core structure is easier to implement. When the ellipticity is 0.7, a sensitivity of  $10412 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$  in a refractive index range from 1.45 to 1.50 can be obtained, and the sensing curve has high linearity. In addition, the elliptic side core structure can effectively restrain the high-order SPP mode. The interference introduced by the coupling between

收稿日期: 2017-03-14; 收到修改稿日期: 2017-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(61665007)、江西省自然科学基金(20161BAB202039)

作者简介: 梁红勤(1990—),女,硕士研究生,主要从事微纳光子器件方面的研究。E-mail: 2549580559@qq.com

导师简介: 刘彬(1983—),男,博士,副教授,主要从事非线性光学和微纳光子器件方面的研究。

E-mail: liubin\_d@126.com(通信联系人)

fundamental mode and many SPP modes can be avoided.

**Key words** fiber optics; surface plasmon resonance; photonic crystal fiber; sensors; finite element method

**OCIS codes** 060.2370; 060.5295; 240.6680

## 1 引言

表面等离子体共振(SPR)是一种物理光学现象,指金属或者掺杂半导体中表面等离子体激元(SPP)的共振现象<sup>[1]</sup>,具有对附着在金属表面电介质的折射率变化非常敏感的特性,应用于实时和快速检测时无需标记等特点,在化学、生物、环境及医药等领域具有非常广阔的应用前景,成为近年来纳米光学传感技术研究的热门领域<sup>[2-6]</sup>。由于 SPP 波矢大于介质中传输光波的波矢<sup>[7]</sup>,只有对光波波矢予以补偿,才能够达到两者波矢匹配条件,从而实现 SPR。实验中常用 Kretschmann-Raether 棱镜<sup>[8-10]</sup>、光学波导<sup>[11-13]</sup>以及光纤等结构<sup>[14-17]</sup>与金属表面结合实现 SPR。光子晶体光纤(PCF)以其优良的特性如无截止单模<sup>[18]</sup>、高双折射<sup>[19-20]</sup>、可控色散<sup>[21-22]</sup>、高非线性<sup>[23-24]</sup>和结构设计灵活可控<sup>[25-26]</sup>,为纤芯基模与 SPP 模式之间的相位匹配提供了新方法,受到了研究人员的广泛关注,在光纤传感领域展现出潜在的应用价值。

对于 PCF-SPR 而言,其传感机理类似于 1968 年 Ottot<sup>[27]</sup>提出的利用衰减全反射的倏逝波激发金属-介质表面等离子体波的方案。当倏逝波的波矢与具有相同频率和偏振态的表面等离子体波满足波矢匹配条件时,表面等离子体波被激发。纤芯基模的倏逝波与表面等离子体波发生共振时,大量的光能量会从入射光波转移到表面等离子体波,使反射光的能量急剧减小;实验中该现象则表现为入射光波被强烈吸收,反射光或透射光的能量急剧减小,且探测光谱上出现相应的共振吸收峰。共振吸收峰对介质折射率的变化非常敏感,当金属表面邻近的介质折射率发生变化时,SPR 吸收峰的位置也会随之发生移动,该现象在传感器领域中有着重要应用。关于 PCF-SPR 生物传感器方面的研究成为了一个研究热点<sup>[28-31]</sup>。Hassani 等<sup>[32-34]</sup>提出了两种不同结构的 PCF-SPR 传感器模型,并分析了该模型中金属涂覆层的设计原理以其在生物传感方面的应用,实现了  $10^{-4}$  RIU 的折射率分辨率。在 PCF-SPR 传感器设计过程中,往往存在多个 SPP 模式,纤芯基模与 SPP 模式的耦合会引起多个 SPR 共振峰。在实际传感应用中,往往需要基模在尽可能大的折射率变化范围内只有一个 SPP 模式形成 SPR 共振。所以,需要尽量抑制多个 SPR 共振峰在传感过程中的相互干扰。

本文提出一种双芯 PCF 椭圆侧芯 SPR 传感结构,在椭圆侧芯检测孔内壁涂覆金属银纳米层。纤芯基模与检测孔 SPP 模式在相位匹配条件下可实现表面等离子共振耦合,共振波长对检测孔介质折射率的变化非常敏感,利用这一特性可以很好地实现对检测孔介质的折射率传感。采用有限元法(FEM)对其折射率传感特性进行数值仿真和分析。研究发现:椭圆侧芯结构能有效过滤高阶 SPP 模式,在较大的动态折射率变化范围内进行 SPR 传感时无需进行模式分辨,且 SPR 传感具有高灵敏度和高线性传感特性。

## 2 理论模型

所设计的椭圆侧芯 SPR 折射率传感双芯 PCF 的横截面结构如图 1 所示。PCF 基底与纤芯材料为二氧化硅,折射率  $n_2 = 1.45$ ;包层由空气孔以正六边形排列而成,晶格常数  $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ ,空气孔直径  $d = 0.5\Lambda$ ,空气孔折射率  $n_1 = 1$ ;在左侧纤芯引入一个由金属银涂覆而成的椭圆形检测孔,用于放置待检测介质,椭圆检测孔孔壁的金属银层涂覆厚度  $T = 40 \text{ nm}$ 。令检测孔中待测介质的折射率为  $n_s$ ,其纵向长轴直径  $b = 0.8\Lambda$ ,通过改变短轴直径  $a$  可改变椭圆检测孔的椭圆率  $e$ ,由  $e = a/b$  可得  $a = eb$ 。

金属银相对介电常数由 Lorentz-Drude 模型方程给出<sup>[35]</sup>,即

$$\epsilon_m = \epsilon_\infty - \sum_{m=0}^5 \frac{G_m \Omega_m^2}{\omega_m^2 - \omega^2 + i\omega\Gamma_m}, \quad (1)$$

式中  $\epsilon_\infty = 1$  为频率无穷大条件下的金属介电常数, $\omega$  为入射光的角频率, $\omega_m$  为共振频率, $\Omega_m$  为等离子体频率, $\Gamma_m$  为阻尼因子, $G_m$  为振子强度,对应参数如表 1 所示。当右侧纤芯基模与左侧待测孔内 SPP 模式波矢相等且达到相位匹配条件时,大量的光能量会从纤芯基模转移到检测孔 SPP 模式上。此时,传输模式损耗增大,当损耗达到最大值时,所对应的入射光波长即为共振波长,利用共振波长对待测介质折射率变化敏感这一基本理论实现对器件灵敏度的测量。

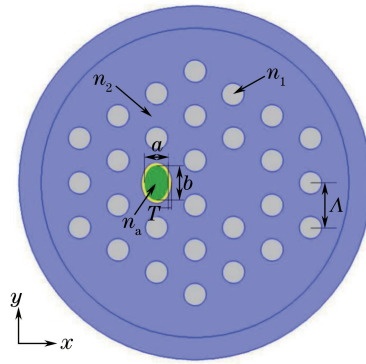


图1 双芯 PCF 横截面示意图

Fig. 1 Cross section diagram of dual-core PCF

表1 Lorentz-Drude 模型中各参数的取值

Table 1 Values of parameters in Lorentz-Drude model

rad · s<sup>-1</sup>

No.	Value			
	$G_m$	$\Omega_m/10^{16}$	$\omega_m/10^{16}$	$\Gamma_m/10^{15}$
0	0.8450	1.369	0	0.07292
1	0.0650	1.369	0.1240	5.90400
2	0.1240	1.369	0.6808	0.68670
3	0.0110	1.369	1.2440	0.09875
4	0.8400	1.369	1.3800	1.39200
5	0.5646	1.369	3.0830	3.67500

### 3 传感特性分析

所设计的双芯 PCF 具有高双折射效应,输入光在 PCF 的传输方向分为  $x$  偏振和  $y$  偏振两个正交方向。首先讨论不同偏振的传输模式与金属表面等离子体的耦合效率。取  $e=0.7$ ,  $n_a=1.45$ , 利用 FEM 数值仿真可以得到入射光波长为 900~1450 nm 时  $x$  偏振和  $y$  偏振光激发的纤芯基模和 SPP 模式的色散和损耗曲线,如图 2 所示。图中  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  为有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的虚部,根据模式传播损耗公式<sup>[36]</sup>

$$\alpha = 40\pi \frac{\text{Im}(n_{\text{eff}})}{\lambda \ln 10}, \quad (2)$$

模式传输损耗正比于有效折射率虚部,因此可以通过有效折射率虚部的变化反映入射光的传输损耗情况,损耗值越大代表 SPR 越强。前期研究发现, $x$  偏振纤芯基模能够与 SPP 模式有效耦合并激发 SPR, $y$  偏振光与 SPP 的耦合效率很低。从图 2 中纤芯基模以及 SPP 模式色散特性曲线与损耗曲线的关系可以看出, $x$  偏振纤芯基模与 SPP 模式耦合形成 SPR 的过程中产生的损耗远大于  $y$  偏振,所以  $x$  偏振纤芯基模与 SPP 模式形成的 SPR 更适用于折射率传感。这里主要对  $x$  偏振纤芯基模与 SPP 模式耦合激发的 SPR 折射率传感特性进行分析。从图 2 中损耗特性曲线可以看出,在 900~1450 nm 波段共出现了 3 个共振峰,根据 3 个共振峰对应的光场分布图,将 3 个共振峰分别定义为 SPP1、SPP2 和 SPP3 模式。图 2 中  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  为有效折射率实部,对应曲线分别为纤芯基模与 SPP 模式色散曲线,损耗峰波长位置正好对应于纤芯基模有效折射率实部曲线与 SPP 模式有效折射率实部曲线交点位置,此时纤芯基模波矢与 SPP 模式波矢相等,达到共振匹配条件。

图 3 为检测孔中介质折射率为 1.45 和 1.47 时纤芯基模损耗随入射波长的变化情况。3 个 SPP 模式的光场分布如图 3 中插图所示,光场图中的偏振方向为  $x$  偏振, $x$  偏振基模与检测孔右侧纤芯模式耦合形成 SPR。虽然 SPP2 激发的 SPR 最强,但是光场并没有分布在检测孔中,所以损耗峰随检测孔介质折射率变化不明显,传感灵敏度较低。同理,SPP3 模式激发的 SPR 较弱,而且随波长变化不明显。而 SPP1 模式激发的金属 SPR 较强,并且光场主要集中在检测孔中,所以 SPP1 模式对应的 SPR 随检测孔中介质折射率的变化也比较明显。这里主要讨论 SPP1 模式与纤芯基模耦合激发 SPR 的波长随检测孔中介质折射率的变化。

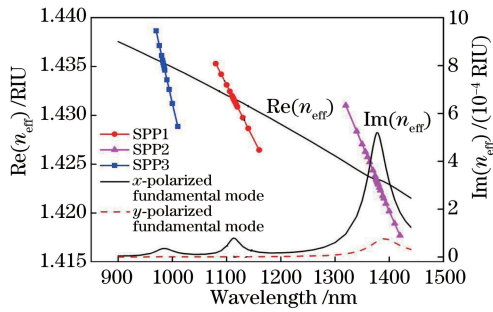


图2  $n_a=1.42$  时纤芯基模与 SPP 模式的色散曲线和损耗曲线

Fig. 2 Dispersion and loss curves of fiber core fundamental mode and SPP modes when  $n_a=1.42$

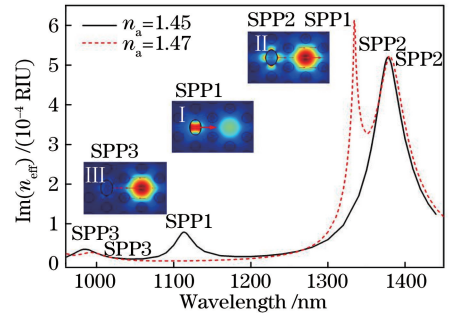


图3  $n_a$  为 1.45 和 1.47 时  $x$  偏振基模损耗曲线(插图 I~III 分别为 SPP1、SPP2、SPP3 模式下 SPR 峰对应的光场分布图)

Fig. 3 Loss curves of  $x$ -polarized fundamental mode when  $n_a=1.45, 1.47$  (inserts I-III are optical field distributions of SPR peaks with SPP1, SPP2 and SPP3 modes respectively)

通过 FEM 数值仿真可得到检测孔中不同介质折射率下的纤芯基模与 SPP1 模式共振波长点附近的色散曲线,如图 4(a)所示。 $n_a$  在 1.45~1.47 内时,纤芯之间不完全耦合,在纤芯基模局部的能量部分转移到了左侧检测孔壁的金属银层中,SPP 模式损耗最低点与纤芯基模损耗峰值之间差值较大。随着检测孔中介质折射率的增加,两纤芯之间的耦合越来越强,在  $n_a$  达到 1.47 时能够实现完全耦合。根据图 4(a)中的共振波长点,可得到共振波长随检测孔介质折射率的变化曲线[4(b)],且其变化趋势呈良好的线性趋势。折射率传感灵敏度公式为

$$S_\lambda = \Delta\lambda_{rw}(n_a) / \Delta n_a, \quad (3)$$

式中  $\Delta\lambda_{rw}$  为共振峰波长的变化。由(3)式可得折射率传感灵敏度为  $10412 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。

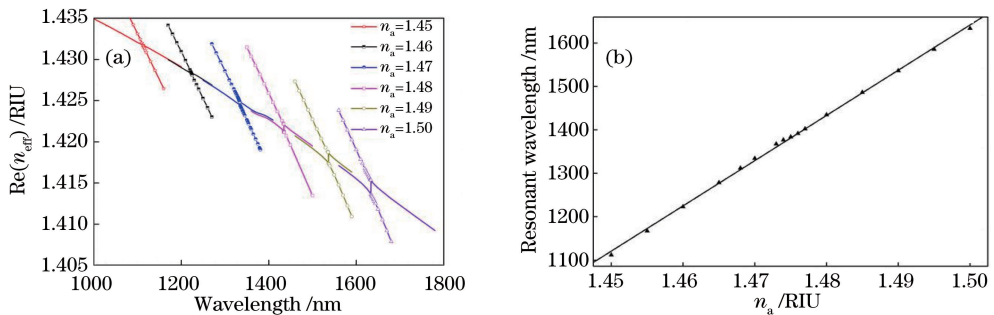


图4 (a)  $n_a$  在 1.45~1.50 范围内时纤芯基模与 SPP1 模式色散曲线;(b)共振波长随  $n_a$  的变化

Fig. 4 (a) Dispersion curves of fiber core fundamental mode and SPP1 mode when  $n_a$  is in range of 1.45-1.50; (b) variation in resonant wavelength with  $n_a$

从图 4(a)中可以看出, $n_a$  达到 1.47 后,纤芯基模与 SPP1 模式的色散曲线不再相交,而表现为一种抗交叉效应,下面对抗交叉效应进行分析。图 5(a)为  $n_a=1.49$  时抗交叉点附近纤芯基模与 SPP1 模式的色散曲线。可以看出,随着入射光波长的增加,共振波长附近会同时出现两种不同的模式(高阶模和低阶模),且两种模式同时存在。由插图中对应的光场分布图可知,纤芯基模在共振波长点前后表现为不同的 SPP 模式,并在该点处阶跃,选取阶跃位置的中点作为共振波长点,因为该点处纤芯基模与检测孔 SPP1 模式达到完全耦合状态,纤芯基模损耗达到最大值,如图 5(b)所示。当  $n_a < 1.47$  时,共振波长处光纤纤芯基模与检测孔 SPP1 模式未发生完全耦合,抗交叉点效应不存在,因此能够更方便、直观地找出 SPR 点。

进一步研究椭圆检测孔的椭圆率  $e$  变化对折射率传感特性的影响。令检测孔长轴直径  $b$  不变。当  $e$  分别为 0.64, 0.70, 0.76, 1.00 时,分析其传感特性,如图 6 所示。图 6(a)为 4 种不同椭圆率下的传感特性曲线,可以看出椭圆率的变化对折射率传感灵敏度的影响不大,并且都具有很高的线性度。通过计算传感灵敏度可得,当  $e$  分别为 0.64, 0.70, 0.76, 1.00 时,所对应的传感灵敏度分别为  $10240, 10412, 10548, 10963 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。



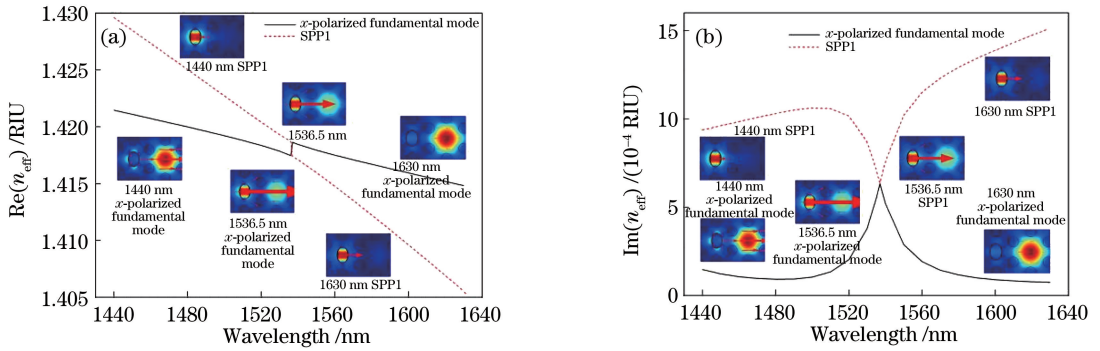


图 5  $n_a = 1.49$  时  $x$  偏振基模与检测孔 SPP1 模式的 (a) 色散曲线与 (b) 损耗曲线

Fig. 5 (a) Dispersion curves and (b) loss curves of  $x$ -polarized fundamental mode and SPP1 mode when  $n_a = 1.49$

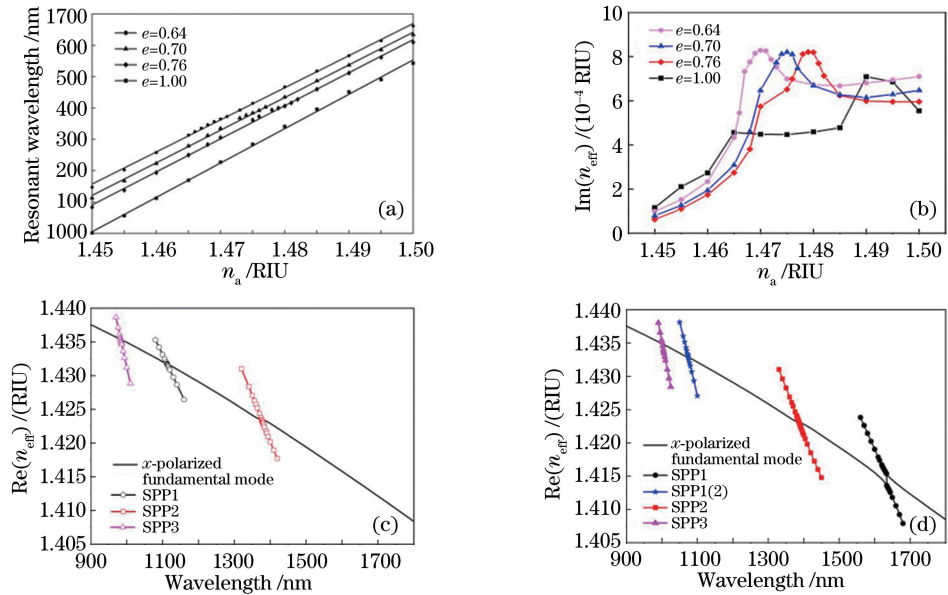


图 6  $e = 0.64, 0.70, 0.76, 1.00$  时 (a) 传感特性曲线和 (b) 共振波长损耗曲线;

SPP1、SPP2、SPP3 模式和  $x$  偏振基模在 (c)  $n_a = 1.45$  和 (d)  $n_a = 1.50$  时的色散曲线

Fig. 6 (a) Sensing characteristic curves and (b) loss curves at resonant wavelength when  $e = 0.64, 0.70, 0.76, 1.00$ ;  
dispersion curves of  $x$ -polarized fundamental mode and SPP1, SPP2 and SPP3 modes when (c)  $n_a = 1.45$  and (d)  $n_a = 1.50$

图 6(b) 显示了不同椭圆率时检测孔结构的 SPP1 模式对应的 SPR 峰的损耗随待测孔中介质折射率的变化情况。当待测孔为椭圆形时, SPR 的损耗随待测介质折射率的增大呈先增加后减小的趋势, 之后趋于平稳, 并且共振峰随着椭圆率的增加向低折射率方向移动。图 6(c)、(d) 分别为入射光在 900~1800 nm 波段内且检测孔椭圆率  $e = 0.7$ 、介质折射率  $n_a$  在 1.45 和 1.50 时所有存在的 SPP 模式与纤芯基模的色散曲线。从图中可知, 在  $n_a$  从 1.45 到 1.50 的变化过程中, 总共出现 4 种模式, 其中 SPP1 模式的变化范围最大(模式最大的变化范围  $\Delta\lambda = 521$  nm), 在 SPP1 模式变化范围内仅存在 SPP2 模式, 因此在图 6(b) 中的峰值附近 SPP2 模式对 SPP1 模式的干扰大大增加了光的传输损耗。随着介质折射率的增加, 上述两种模式逐渐分离。但是, 随着共振波长的增加, 模式间出现抗交叉现象, 基模和表面等离子模式近乎达到完全耦合。由于输入光强不变, 耦合损耗变化趋于稳定。当检测孔形状为圆形时, 由图 6(b) 可知, 由于干扰模式的增加, 共振波长损耗随检测孔中介质折射率的变化不明显。综上所述, 待测孔形状为椭圆形时可以有效地抑制高阶 SPP 模式。

所设计的基于双芯 PCF 椭圆侧芯 SPR 折射率传感结构可有效过滤掉在待测介质折射率为 1.45~1.50 范围内除 SPP1 和 SPP2 模式之外的其他模式。当共振波长在 1376.35~1387.40 nm 波段内受到 SPP2 模式的干扰时, 其余波段只存在 SPP1 模式, 此时去除受 SPP2 模式干扰的波段就可以实现无模式辨别, 即可直接对介质折射率进行传感。根据传感特性曲线拟合公式, 待测介质折射率为 1.450~1.472 和 1.474~1.500 时不需要进行

模式辨别,大大简化了所设计器件的传感过程。由图 6(b)还可以看出,随着椭圆率的增加,受 SPP2 模式干扰的折射率段向高折射率方向移动。

## 4 结 论

通过 FEM 数值模拟了基于双芯 PCF 的椭圆侧芯 SPR 折射率传感结构。当椭圆率为 0.7 时,SPR 折射率传感灵敏度可达到  $10412 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ ,并且在 1.45~1.50 折射率范围内传感曲线呈线性。研究发现 SPP 高阶模式的数量会随着椭圆侧芯椭圆率的增大而减少。但侧芯椭圆率的变化对于 SPR 传感灵敏度的影响较小。因此,利用椭圆侧芯结构代替圆形侧芯结构能够有效过滤掉多个 SPP 高阶模式对 SPP1 模式的干扰,从而实现在较大折射率范围内光纤基模与单个 SPP 模式的相互耦合。该研究为研究基于 PCF-SPR 折射率传感器的传感特性提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] Xia Y N, Halas N J. Shape-controlled synthesis and surface plasmonic properties of metallic nanostructures[J]. MRS Bulletin, 2005, 30(5): 338-348.
- [2] Shi Weihua, You Chengjie, Wu Jing. 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.  
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.
- [3] Shi Weihua, Wu Jing. Photonic crystal fiber sensor based on surface plasmonic and directional resonance coupling[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0206002.  
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.
- [4] Luo Yunhan, Mao Peiling, Chen Chaoying, *et al.* Side-polished fiber coupled plasmon resonance based on triangle nano-rod array[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(4): 0406004.  
罗云瀚, 毛培玲, 陈超英, 等. 光纤耦合三角形金柱阵列的等离子体共振[J]. 光子学报, 2015, 44(4): 0406004.
- [5] Chen Qianghua, Liu Jinghai, Luo Huifu, *et al.* Refractive index measurement system of liquid based on surface plasmon resonance[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0512002.  
陈强华, 刘景海, 罗会甫, 等. 一种基于表面等离子体共振的液体折射率测量系统[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0512002.
- [6] Cheng Hui, Huang Zhaofeng, Duan Ziyuan. Advances in the application of SPR biosensors[J]. China Biotechnology, 2003, 23(5): 46-49.  
程 慧, 黄朝峰, 段子渊. SPR 生物传感器及其应用进展[J]. 中国生物工程杂志, 2003, 23(5): 46-49.
- [7] Homola J. Electromagnetic theory of surface plasmons[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2006: 3-44.
- [8] Zhang Qianyun, Zeng Jie, Li Jifeng, *et al.* Study of prism surface plasmon resonance effect based on dielectric-aided layer[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(3): 034207.  
张倩昀, 曾 捷, 李继峰, 等. 基于辅助电介质层的棱镜表面等离子体共振效应研究[J]. 物理学报, 2014, 63(3): 034207.
- [9] Patskovsky S, Kabashin A V, Meunier M, *et al.* Properties and sensing characteristics of surface-plasmon resonance in infrared light[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2003, 20(8): 1644-1650.
- [10] Kasunic K J. Comparison of Kretschmann-Raether angular regimes for measuring changes in bulk refractive index[J]. Applied Optics, 2000, 39(1): 61-64.
- [11] Zhu J H, Huang X G, Tao J, *et al.* Nanometric plasmonic refractive index sensor[J]. Optics Communications, 2012, 285(13/14): 3242-3245.
- [12] Du W, Zhao F. Surface plasmon resonance based silicon carbide optical waveguide sensor[J]. Materials Letters, 2014, 115(15): 92-95.
- [13] Tang T T. Refractive index detection based on a prism-waveguide coupling system with double-negative material[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(20): 4526-4528.
- [14] Mishra A K, Mishra S K, Gupta B D. SPR based fiber optic sensor for refractive index sensing with enhanced detection accuracy and figure of merit in visible region[J]. Optics Communications, 2015, 344: 86-91.
- [15] Shuai B B, Xia L, Zhang Y T, *et al.* A multi-core holey fiber based plasmonic sensor with large detection range and high

- linearity[J]. *Optics Express*, 2012, 20(6): 5974-5986.
- [16] Zhao Y, Deng Z Q, Li J. Photonic crystal fiber based surface plasmon resonance chemical sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 202: 557-567.
- [17] Luan N N, Wang R, Lü W H, *et al.* Surface plasmon resonance sensor based on D-shaped microstructured optical fiber with hollow core[J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8576-8582.
- [18] Birks T A, Knight J C, Russell P S. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(13): 961-963.
- [19] Kim B Y, Blake J N, Huang S Y, *et al.* Use of highly elliptical core fibers for two-mode fiber devices[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(9): 729-731.
- [20] Cao Ye, Li Rongmin, Tong Zhengrong. Investigation of a new kind of high birefringence photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(8): 084215.  
曹 晔, 李荣敏, 童峥嵘. 一种新型高双折射光子晶体光纤特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(8): 084215.
- [21] Liu Xiaodong, Li Shuguang, Hou Lantian. The study of waveguide mode and dispersion property in photonic crystal fibres[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(11): 2811-2817.  
刘晓东, 李曙光, 侯蓝田. 光子晶体光纤的导波模式与色散特性[J]. *物理学报*, 2003, 52(11): 2811-2817.
- [22] Wang Erlei, Jiang Haiming, Xie Kang, *et al.* Photonic crystal fibers with high nonlinearity, large birefringence and multiple zero dispersion-wavelength[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(13): 134210.  
王二垒, 姜海明, 谢 康, 等. 一种高双折射高非线性多零色散波长光子晶体光纤[J]. *物理学报*, 2014, 63(13): 134210.
- [23] Husakou A V, Herrmann J. Supercontinuum generation of higher-order solitons by fission in photonic crystal fibers[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(20): 203901.
- [24] Liu Jie, Yang Changxi, Claire Gu, *et al.* A novel photonic crystal fiber with high nonlinearity and flattened dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(10): 1569-1574.  
刘 洁, 杨昌喜, Claire Gu, 等. 一种新型高非线性色散平坦光子晶体光纤结构[J]. *光学学报*, 2006, 26(10): 1569-1574.
- [25] Lei Jingli, Li Xiaoxiao, Wang Daobin, *et al.* Design and study on characteristics of double-clad photonic crystal fibers with flattened dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s1): s106002.  
雷景丽, 李晓晓, 王道斌, 等. 双包层平坦色散光子晶体光纤的设计与性能研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(s1): s106002.
- [26] Jiang Linghong, Zheng Yi, Zheng Kai, *et al.* Investigation of a liquid-core photonic crystal fiber with high birefringence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(9): 0906003.  
姜凌红, 郑 义, 郑 凯, 等. 液芯高双折射率光子晶体光纤的特性研究[J]. *光子学报*, 2014, 43(9): 0906003.
- [27] Otto A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection[J]. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, 1968, 216(4): 398-410.
- [28] Dash J N, Jha R. On the performance of graphene-based D shaped photonic crystal fibre biosensor using surface plasmon resonance[J]. *Plasmonics*, 2015, 10(5): 1123-1131.
- [29] Bing P B, Li Z Y, Yao J Q, *et al.* Effects of heterogeneity on the surface plasmon resonance biosensor based on three-hole photonic crystal fiber[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(5): 054401.
- [30] Akowuah E K, Gorman T, Ademgil H, *et al.* Numerical analysis of a photonic crystal fiber for biosensing applications[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(11): 1403-1410.
- [31] Bing P B, Li Z Y, Yuan S, *et al.* Surface plasmon resonance biosensor based on large size square-lattice photonic crystal fiber [J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, 63(8): 793-797.
- [32] Hassani A, Skorobogatiy M. Design of the microstructured optical fiber-based surface plasmon resonance sensors with enhanced microfluidics[J]. *Optics Express*, 2006, 14(24): 11616-11621.
- [33] Hassani A, Skorobogatiy M. Design criteria for microstructured-optical-fiber based surface-plasmon-resonance sensors [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(6): 1423-1429.
- [34] Hassani A, Skorobogatiy M. Photonic crystal fiber-based plasmonic sensors for the detection of bilayer thickness[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(8): 1550-1557.
- [35] Rakić A D, Djurišić A B, Elazar J M, *et al.* Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(22): 5271-5283.
- [36] Hautakorpi M, Mattinen M, Ludvigsen H. Surface-plasmon-resonance sensor based on three-hole microstructured optical fiber [J]. *Optics Express*, 2008, 16(12): 8427-8432.