

文章编号: 1001-3806(2018)05-0713-05

单芯光子晶体光纤边孔 SPR 折射率传感特性研究

彭荣荣¹, 刘彬², 陈佳¹

(1. 南昌工学院 基础教学部, 南昌 330108; 2. 南昌航空大学 江西省光电检测技术工程实验室, 南昌 330063)

摘要: 为了实现高灵敏的表面等离子体共振 (SPR) 折射率传感, 提出一种基于大纤芯的单芯光子晶体光纤 SPR 传感结构, 采用全矢量有限元方法对其传感特性进行了数值仿真和分析。结果表明, 该结构具有比较宽的折射率传感范围 (1.36 ~ 1.55), 同时具有较高的传感灵敏度, 平均传感灵敏度达 12139 nm/RIU; 在折射率 1.36 ~ 1.42 区域, 线性传感灵敏度为 5646.4 nm/RIU, 线性度为 0.9317; 而在折射率 1.42 ~ 1.57 区域, 传感灵敏度达到 15326.8 nm/RIU, 线性度为 0.98738, 传感特性出现明显的线性分段情况。该研究结果为实现高灵敏的光子晶体光纤 SPR 传感器提供了重要的理论依据。

关键词: 光纤光学; 光子晶体光纤传感; 有限元; 表面等离子体共振

中图分类号: TN253; TP212.1⁺4 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.05.024

Study on side-hole surface plasmon resonance refractive index sensing based on single-core photonic crystal optical fiber

PENG Rongrong¹, LIU Bin², CHEN Jia¹

(1. Department of Basic Courses, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330108, China; 2. Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In order to detect the refractive index of surface plasmon resonance (SPR) with high sensitivity, a SPR sensing structure based on single core photonic crystal fiber with large core was proposed. The full vector finite element method was used to simulate and analyze its sensing characteristics. The results show that the structure has a wide range of refractive index sensing range (1.36 ~ 1.55). At the same time, the structure has high sensing sensitivity and the average sensitivity is 12139 nm/RIU. With refractive index of 1.36 ~ 1.42, the linear sensor sensitivity is 5646.4 nm/RIU and linearity is 0.9317. With refractive index of 1.42 ~ 1.57, the linear sensor sensitivity is 15326.8 nm/RIU and linearity is 0.98738. Sensing characteristics appear in obvious linear subsections. The results provide an important theoretical basis for the realization of high sensitive photonic crystal fiber SPR sensors.

Key words: fiber optics; photonic crystal fiber sensor; finite element; surface plasmon resonance

引言

表面等离激元 (surface plasmon polariton, SPP) 是指在金属表面存在的自由振动的电子与光子相互作用产生的沿金属表面传播的电子疏密波。当入射光的频率与金属或掺杂半导体表面等离子体振荡频率匹配时

就产生共振现象, 称为金属表面等离子体共振 (surface plasmon resonance, SPR) 现象^[1]。金属表面介质折射率对激发 SPR 的入射光频率非常敏感, 利用这一特性可以制作基于 SPR 的折射率传感器件。该器件具有实时和快速检测、无需标记、耗样量少等特点, 在生物和医药等领域具有广阔的应用前景, 已成为近年来光学纳米传感技术的一个重要的研究热点^[2-6]。SPR 传感器已在许多传感结构中实现, 如 Kretschmann-Raether 棱镜耦合、光学波导和光纤结构^[7-13]等。在这些结构中, 基于光纤的 SPR 传感器具有小型化、集成度高和可以实现远程传感等优点。近年来, 随着光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 的出现, 由于其具有无截止单模特性、高双折射、可控色散、高非线性、

基金项目: 江西省教育厅科技计划资助项目 (GJJ151240); 江西省自然科学基金资助项目 (20161BAB202039)

作者简介: 彭荣荣 (1987-), 男, 硕士, 讲师, 现主要从事光电检测方面的研究。

E-mail: 15294476178@163.com

收稿日期: 2017-09-25; 收到修改稿日期: 2018-01-05

结构设计灵活可控等优良特性^[14-21],为纤芯模式与 SPP 模式相位匹配提供了新方式。PCF-SPR 传感器因其尺寸小、结构设计灵活、灵敏度高等优点,被广泛应用于生物学、医学、通信、材料学以及生命科学等各个领域,已成为国际上众多科研工作者的研究热点之一^[22-23]。微孔内镀金属膜的光子晶体光纤 SPR 传感器是现阶段研究的主要方向,HASSANI 等人提出了一种大孔内壁镀膜的光子晶体光纤 SPR 传感器,传感器的分辨率可达 10^{-4} RIU^[24]。2014 年,GAO 和 GUAN 等人又提出了一种基于金和 TiO₂ 复合膜的 PCF-SPR 传感器,折射率分辨率高达 2.7×10^{-5} RIU^[25]。类似方法设计的 SPR 传感器还有光子晶体光纤选择性微孔镀膜结构和三孔光子晶体光纤结构等^[26-27]。但是,大部分 PCF-SPR 传感器常常是采用多个临近的纳米金属孔结构^[28-30]。多个金属纳米孔结构对于制备的成本和工艺要求较高,并且会降低信噪比,同时多个金属纳米孔直接很容易相互干扰,形成许多复杂的 SPP 模式。为了尽可能在比较宽的波长范围内,让纤芯基模只与单个 SPP 模式之间的耦合,提高折射率传感范围,作者提出一种在单芯光子晶体光纤纤芯内部设计旁侧椭圆分析孔的 SPR 传感结构。分析孔内壁涂覆金属纳米层(通常为金或银,其厚度为几十个纳米),通过纤芯基模与分析孔 SPP 模式耦合,在相位匹配条件下达到共振耦合,实现对分析孔内介质折射率的 SPR 传感,并通过有限元软件 COMSOL 对其传感特性进行了数值计算和系统地分析。

1 理论模型

作者所设计的单芯光子晶体光纤 SPR 折射率传感模型的横截面结构如图 1 所示。光子晶体光纤空气孔以正三角形晶格排列,晶格常数 $\Lambda = 2\mu\text{m}$,空气孔直径 $d = 0.5\Lambda = 1\mu\text{m}$,空气折射率 $n_1 = 1$,基底为二氧化硅折射率 $n_2 = 1.45$ 。在光子晶体光纤纤芯右侧引入椭圆待测孔,用以填充待分析物,设其折射率为 n_a 。外面的圆环为有限元仿真所需的完美匹配层(perfectly matched layers, PML)设置。采用椭圆孔设计是因为研究发现 SPP 高阶模式的数量会随着椭圆侧芯的椭圆率增大而受到一定的抑制^[31]。椭圆孔中短轴 $L_1 = 0.576\mu\text{m}$,长轴 $L_2 = 1.056\mu\text{m}$ 。待测孔外层涂覆了银纳米层,厚度 $t = 40\text{nm}$ 。金属银相对介电常数由 Lorentz-Drude 模型方程给出^[32]:

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

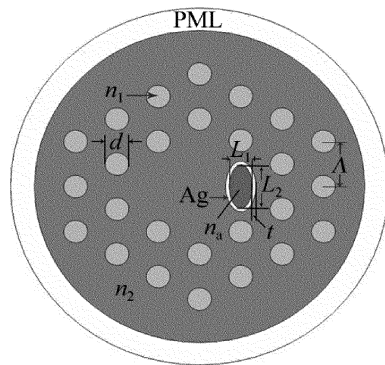


Fig. 1 Cross section diagram of SPR sensor based on single-core photonic crystal fiber

式中, $\epsilon_\infty = 1$ 为频率无穷大条件下金属的介电常数; ω 为入射光的角频率, ω_m 是共振频率, Ω_m 为等离子体频率, G_m 为振子强度, Γ_m 是阻尼因子,对应参量参照表 1。

Table 1 Parameters in Lorentz-Drude model

m	$G_m / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Omega_m / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\omega_m / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Gamma_m / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$
0	8.45×10^{-1}	1.369×10^{16}	0	7.292×10^{13}
1	6.5×10^{-2}	1.369×10^{16}	1.24×10^{15}	5.904×10^{15}
2	1.24×10^{-1}	1.369×10^{16}	6.808×10^{15}	6.867×10^{14}
3	1.1×10^{-2}	1.369×10^{16}	1.244×10^{16}	9.875×10^{13}
4	8.4×10^{-1}	1.369×10^{16}	1.38×10^{16}	1.392×10^{15}
5	56.46	1.369×10^{16}	3.083×10^{16}	3.675×10^{15}

2 传感特性分析

作者所设计的单芯光子晶体光纤结构具有双折射效应,纤芯的传导模具有 x 偏振和 y 偏振两个正交方向。人们前期的研究发现,一般 x 偏振纤芯基模能够有效与 SPP 模式耦合激发 SPR, y 偏振纤芯基模与 SPP 耦合效率很低。首先仿真分析不同偏振的传输模式与 SPP 模式耦合的情况。设 $n_a = 1.43$,通过 COMSOL 数值仿真得到波长在 900nm ~ 1450nm 范围内, x 偏振和 y 偏振纤芯基模和 SPP 模式相互耦合过程中的传输损耗曲线,如图 2a 所示。图 2a 中纵坐标表示有效折射率虚部,根据模式传输损耗公式^[33]:

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

式中, n_{eff} 为有效折射率, λ 为入射光波长。可知,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应入射光的传输损耗情况,损耗值越大代表激发 SPR 越强。由图 2a 可以明显看到, x 偏振纤芯基模与 SPP 模耦合过程中的传输损耗及所激发的 SPR 峰值更强, y 偏振纤芯基模与 SPP 模耦合效率比较低。并且,前面研究结果也表明, y 偏振纤芯

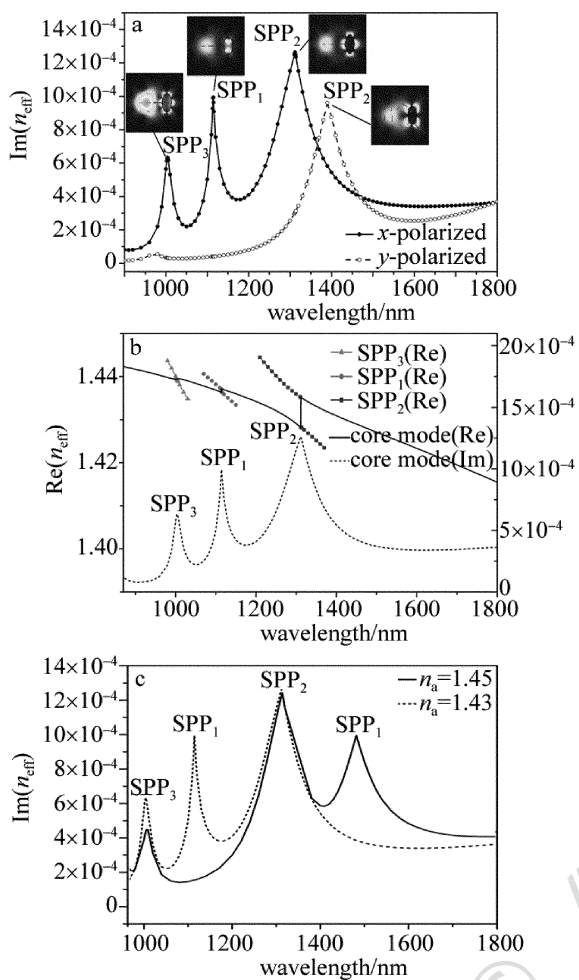


Fig. 2 a—loss curves of x-polarized and y-polarized core mode at $n_a = 1.43$ and the optical distributions of SPR with SPP₁, SPP₂, and SPP₃ modes b—dispersion (left) and loss (right) curves of x-polarized core mode and SPP modes at $n_a = 1.43$ c—loss curves of x-polarized core mode at $n_a = 1.43$ and $n_a = 1.45$

基模与 SPP 模式耦合激发的 SPR 共振对于分析孔内折射率的变化不敏感。所以主要研究 x 偏振纤芯基模与 SPP 模式耦合激发 SPR 的折射率传感特性。

计算入射光波长为 900nm ~ 1450nm 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 2b 所示,发现在 900nm ~ 1800nm 波段,椭圆待测孔区域存在 3 个不同的 SPP 模式,将其定义为 SPP₁, SPP₂ 和 SPP₃ 模式。计算这 3 个 SPP 模式的折射率实部和虚部发现,3 个 SPP 模式实部曲线分别与纤芯基模的折射率实部曲线出现交叉现象,并且这个交叉点波长正好对应于纤芯基模(虚部)损耗特性曲线 3 个共振峰位置。也就是说,在这个波长位置纤芯基模波矢与 SPP 模式波矢相等,达到共振匹配条件,发生了 SPR 现象。其中 SPP₁ 和 SPP₃ 模式与纤芯基模折射率实部曲线直接相交,而 SPP₂ 模式与纤芯基模折

射率实部曲线没有直接相交,而是形成抗交叉效应^[34],并且这种抗交叉效应的耦合激发 SPR 效果优于直接交叉的情况,所以 SPP₂ 的损耗峰最强。分别计算这个 3 个 SPP 模式的模场分布,如图 2b 所示,发现 SPP₁ 模式的模场分布大部分局域在椭圆待测孔内部,这样可以有效地与待测介质接触,实现对待测介质的折射率传感。

接下来,数值计算了分析孔中介质折射率分别为 1.43 和 1.45 时纤芯基模损耗随入射波长变化情况,如图 2c 所示。可以看到,虽然与纤芯基模与 SPP₂ 耦合激发的表面等离子体共振最强(损耗峰最大),但是光场并没有分布在分析孔中,所以分析孔介质折射率变化并没有改变损耗峰的位置,不适合用于传感。同样的,纤芯基模与 SPP₃ 耦合的损耗峰最弱,而且光场没有分布在分析孔中,所以分析孔介质折射率变化也没有改变损耗峰的位置,不适合传感。而 SPP₁ 模场主要集中在分析孔中,纤芯基模与 SPP₁ 模激发的 SPR 共振峰对于分析孔介质折射率变化非常敏感,可以具有很高的折射率传感灵敏度。

下面主要讨论 SPP₁ 模式与纤芯基模耦合激发表面等离子体共振波长随分析孔中介质折射率变化的关系。通过有限元法数值计算分析孔中介质折射率 n_a 从 1.37 ~ 1.47 变化过程中 SPP₁ 模式与纤芯基模耦合激发 SPR 损耗峰的变化情况,如图 3a 所示。可以看到,随着分析孔中介质折射率的增大,所激发 SPR 的

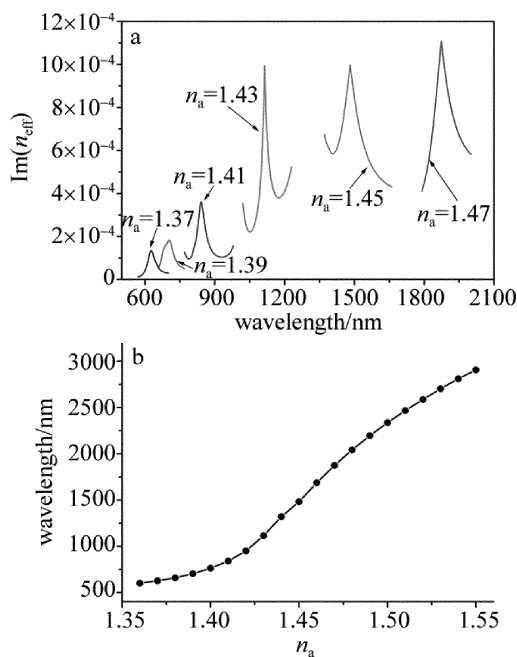


Fig. 3 a—loss curves of core mode with n_a in the range of 1.37 to 1.47 b—relationship between resonant wavelength and n_a

损耗峰呈现明显的红移现象。同时计算 SPR 损耗峰的波长随分析孔介质折射率在 1.36 ~ 1.55 范围内的变化曲线,如图 3b 所示。折射率传感灵敏度公式为:

$$S_{\lambda} [\text{nm}/\text{RIU}] = \Delta\lambda_{\text{RW}}(n_a) / \Delta n_a \quad (3)$$

式中, $\Delta\lambda_{\text{RW}}$ 为共振波峰波长变化,计算出折射率在 1.36 ~ 1.55 范围总的传感灵敏度为 12139nm/RIU。参考 D 型光纤 SPR 传感器实验方面的研究,通过侧面抛光单模光纤 5mm 的 SPR 传感头实现了 4365.5nm/RIU 的传感灵敏度^[35]。可以估计所设计传感器结构大约只需要光子晶体光纤传感头长度 5mm ~ 10mm 就可以实现理论仿真计算的折射率传感灵敏度。

从图 3b 中可以看到,传感曲线出现明显的线性分段情况,不同分段曲线的灵敏度差异很大。在折射率 1.36 ~ 1.42 区域的传感曲线比较平缓,图 4a 中对其传感曲线进行了线性拟合,计算出该区域的线性传感灵敏度为 5646.4nm/RIU,线性度为 0.9317。而折射率 1.42 ~ 1.57 区域的传感曲线明显比较陡峭,图 4b 中对其传感曲线进行了线性拟合,计算出该区域的传感灵敏度为 15326.8nm/RIU,线性度为 0.98738。可以看到,折射率 1.42 ~ 1.57 区域的传感灵敏度和线性度都要明显优于 1.36 ~ 1.42 区域。

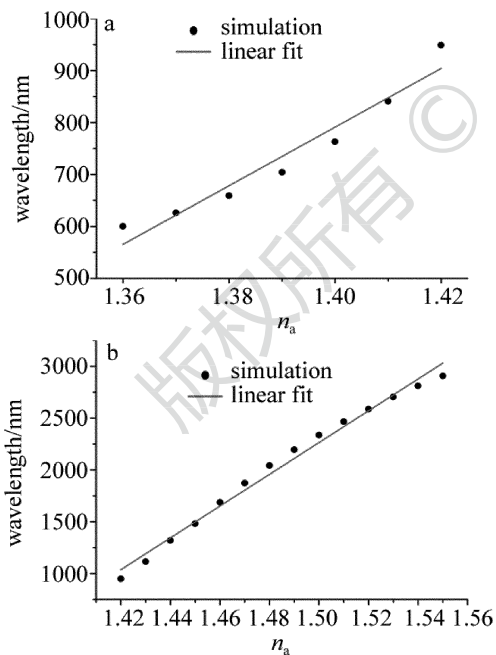


Fig. 4 Linear fit curve of resonant wavelength
a—with n_a in the range of 1.36 to 1.42 b—with n_a in the range of 1.42 to 1.57

另外还数值计算了 SPR 峰损耗随分析孔内折射率的变化曲线,如图 5 所示。可以看到,大部分区间里,SPR 峰的损耗也随着分析孔介质折射率的增大而增大。只有在折射率 1.42 ~ 1.45 的范围内,SPR 峰的

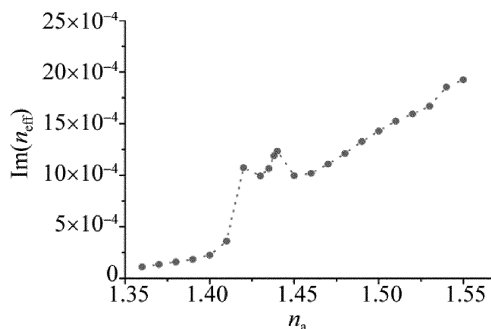


Fig. 5 Loss curves of SPR wavelength with n_a in the range of 1.37 to 1.47 损耗才发生了突变的情况。重新观察图 2b 和图 2c,发现其原因是纤芯基模与 SPP_1 模耦合激发的 SPR,其共振波长随折射率从 1.43 变化到 1.45 的过程中经过 SPP_2 模式,而纤芯基模与 SPP_2 模所激发的 SPR 共振峰的损耗是比较大的,所以形成了对用于传感的 SPR 共振峰损耗的干扰。在远离 SPP_2 模式的折射率范围 1.45 ~ 1.55 内,SPR 共振峰损耗随着分析孔折射率呈现线性变化。

3 结 论

通过有限元方法数值计算和分析了基于大纤芯的单芯光子晶体光纤椭圆边孔 SPR 折射率传感结构。该结构中纤芯模式与 SPP 模式同处于光子晶体光纤的纤芯位置,可以有效增强 SPP 模式与纤芯模式相互耦合的重叠区域。并且椭圆结构分析孔设计避免了多个 SPP 模式间的相互干扰。因此,在比较宽的折射率范围内(1.36 ~ 1.55)可以实现对分析孔分析物折射率的 SPR 传感,平均传感灵敏度达 12139nm/RIU。另外,对其传感曲线线性分段情况进行分析:在折射率 1.36 ~ 1.42 区域,线性传感灵敏度为 5646.4nm/RIU,线性度为 0.9317;而在折射率 1.42 ~ 1.57 区域传感灵敏度达到 15326.8nm/RIU,线性度为 0.98738。研究结果对于提高光子晶体光纤 SPR 传感器的传感性能具有一定的应用价值。

参 考 文 献

[1] XIA Y N. Shape-controlled synthesis and surface plasmonic properties of metallic nanostructures[J]. Materials Research Society Bulletin, 2005, 30(5): 338-348.
[2] SHI W H, YOU Ch 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 (in Chinese).
[3] 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 (in Chinese).
[4] LUO Y H, MAO P L, CHEN Ch Y, et al. Side-polished fiber cou-

- pled plasmon resonance based on triangle nano-rod array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(4): 0406004(in Chinese).
- [5] CHEN Q H, LIU J H, LUO H F, *et al.* Refractive index measurement system of liquid based on surface plasmon resonance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0512002(in Chinese).
- [6] CHENG H, HUANG Zh F. Advances in the application of SPR biosensors[J]. *China Biotechnology*, 2003, 23(5): 46-49(in Chinese).
- [7] 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*, 2003, A20(8): 1644-1650.
- [8] SCHMIDT M A, SEMPERE L N P, TYAGI H K, *et al.* Waveguiding and plasmon resonances in two-dimensional photonic lattices of gold and silver nanowires[J]. *Physical Review*, 2008, B77(3): 033417.
- [9] SKOROBOGATIY M, KABASHIN A. Photon crystal waveguide-based surface plasmon resonance biosensor[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(14): 143518.
- [10] SKOROBOGATIY M A, KABASHIN A. Plasmon excitation by the Gaussian-like core mode of a photonic crystal waveguide[J]. *Optics Express*, 2006, 14(18): 8419-8424.
- [11] MONZÓN-HERNÁNDEZ D, VILLATORO J, TALAVERA D, *et al.* Optical-fiber surface-plasmon resonance sensor with multiple resonance peaks[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(6): 1216-1220.
- [12] MONZÓN-HERNÁNDEZ D, VILLATORO J. High-resolution refractive index sensing by means of a multiple-peak surface plasmon resonance optical fiber sensor[J]. *Sens Actuators*, 2006, B115(1): 227-231.
- [13] GUPTA B D, SHARMA A K. Sensitivity evaluation of a multi-layered surface plasmon resonance-based fiber optic sensor: a theoretical study[J]. *Sens Actuators*, 2005, B107(1): 40-46.
- [14] CAO Y, LI R M, TONG Zh R. Investigation of a new kind of high birefringence photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(8): 084215(in Chinese).
- [15] WANG E L, JIANG H M, XIE K, *et al.* Photonic crystal fibers with high nonlinearity, large birefringence and multiple zero dispersion-wavelength[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(13): 134210(in Chinese).
- [16] 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.
- [17] LEI J L, LI X X, WANG D B, *et al.* Design and study on characteristics of double-clad photonic crystal fibers with flattened dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s1): s106002(in Chinese).
- [18] JIANG L H, ZHENG Y, ZHENG K, *et al.* Investigation of a liquid-core photonic crystal fiber with high birefringence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(9): 0906003(in Chinese).
- [19] JIANG L H, HOU L T, ZOU J H, *et al.* Design of photonic crystal fiber with flat dispersion and low confinement loss[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(1): 61-64(in Chinese).
- [20] LI A P, WANG A Q, JI Y J. Soliton-effect compression due to cross-phase modulation in photonic crystal fibers[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(6): 781-784(in Chinese).
- [21] JIAN D, LIU M, HE D D, *et al.* Research of photonic crystal fiber with high nonlinear flattened dispersion property[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 187-190(in Chinese).
- [22] ZHOU C. Theoretical analysis of double-microfluidic-channels photonic crystal fiber sensor based on silver nanowires[J]. *Optics Communications*, 2013, 288(1): 42-46.
- [23] XU K, LÜ Sh Y, YANG Y. Research of CO₂ gas sensors based on photonic crystal fiber[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(5): 693-696(in Chinese).
- [24] 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.
- [25] GAO D, GUAN C Y, WEN Y W, *et al.* Multi-hole fiber based surface plasmon resonance sensor operated at near-infrared wavelengths[J]. *Optics Communications*, 2014, 313(4): 94-98.
- [26] YU X, ZHANG Y, PAN S S, *et al.* A selectively coated photonic crystal fiber based surface plasmon resonance sensor[J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(1): 015005.
- [27] 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.
- [28] ZHOU C, ZHANG Y T, XIA L, *et al.* Photonic crystal fiber sensor based on hybrid mechanisms: Plasmonic and directional resonance coupling[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(9): 2466-2471.
- [29] AN G W, LI Sh G, YAN X, *et al.* Extra-broad photonic crystal fiber refractive index sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Applied Optics*, 2017, 12(2): 465-471.
- [30] YANG X, LU Y, LIU B, *et al.* Analysis of graphene-based photonic crystal fiber sensor using birefringence and surface plasmon resonance[J]. *Plasmonics*, 2016, 12(2): 1-8.
- [31] LIANG H Q, LIU B, CHEN J, *et al.* The study on elliptic side core high sensitive SPR refractive index sensing based on dual core photonic crystal fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 090601(in Chinese).
- [32] RAKIC A D, DJURISIC 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.
- [33] MARKUS H, MAIJA M, HANNE L. Surface-plasmon-resonance sensor based on three-hole microstructured optical fiber[J]. *Optics Express*, 2008, 16(12): 8427-8432.
- [34] HAN Y, XIA L, LIU D M. Highly sensitive fiber refractive index sensor based on side-core holey structure[J]. *Chinese Physics*, 2014, B23(10): 225-229.
- [35] ZHAO J, CAO S, LIAO C, *et al.* Surface plasmon resonance refractive sensor based on silver-coated side-polished fiber[J]. *Sensors and Actuators*, 2016, B230: 206-211.