

激光与光电子学进展

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

王双双, 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 提出了一种新型传感器结构, 基于正十六边形光子晶体光纤(PCF)的D型表面等离子体共振(SPR)传感器, 实现了折射率(RI)和温度的同时测量, 同时实现了较大范围内折射率和温度的动态检测。可以同时实现折射率为 1.230~1.355、温度为 5~85 °C 的检测。结果显示, 折射率在 1.330~1.355 范围内时, 灵敏度为 1645.7 nm/RIU; 在整个可测范围内最大灵敏度为 1497.6 nm/RIU。温度范围在 20~60 °C 时, 灵敏度最高可达 -2.68 nm/°C; 在整个可测范围内灵敏度最高可达 -3 nm/°C。此结构的优势在于可在较大范围内独立检测 RI 和温度的同时又能保证相对较高的灵敏度。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤传感器; 表面等离子体共振; 有限元法; 共振波长; 折射率; 温度

中图分类号 TP212

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0706001

Surface Plasmon Resonance Sensor Based on Photonic Crystal Fiber in Regular Hexadecagon

Wang Shuangshuang, Huang Yonglin*, Zhan Ping

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

Abstract A novel sensor structure, D-type surface plasmon resonance (SPR) sensor based on regular hexagon photonic crystal fiber (PCF), is proposed to measure the refractive index (RI) and temperature simultaneously, and measure the refractive index and temperature dynamically in a large range. It can simultaneously detect the refractive index of 1.230—1.355 and the temperature of 5—85 °C. The results show that when RI is in the range of 1.330—1.355, the sensitivity is 1645.7 nm/RIU; the maximum sensitivity in the whole detectable range is 1497.6 nm/RIU. When the temperature range is 20—60 °C, the sensitivity can reach up to -2.68 nm/°C, and the sensitivity can reach up to -3 nm/°C in the whole measurable range. The superiority of this structure is that it is sensitive to a large dynamic detection range of RI and temperature with relatively high sensitivity.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber sensor; surface plasmon resonance; finite element method; resonance wavelength; refractive index; temperature

1 引言

等光子体激元(SPPs)由多种粒子组合而成,其

中包括离子、电子以及未电离的中性粒子^[1]。表面等离子体共振(SPR)是等离子体激元与特定频率的倏逝波在金属-电介质界面上相互作用、产生集体振

收稿日期: 2021-04-15; 修回日期: 2021-05-27; 录用日期: 2021-06-15

基金项目: 江苏省光通信工程技术研究中心项目支助(ZXF201804)

通信作者: huangyl@njupt.edu.cn

荡的一种物理现象,只有当二者波矢相同时才会发生共振^[2-5]。现在的光子晶体光纤表面等离子体共振(PCF-SPR)传感器使用的金属大多是金或银,金或银薄膜能够在可见光区域产生表面等离子体共振效应^[6]。表面等离子体共振传感器是一种基于比尔-朗伯定律的吸收型传感器^[7],当发生等离子体共振时,纤芯中的能量耦合到金属表面的等离子体中,造成纤芯能量的降低,因此表面等离子体激发的激发可以通过计算纤芯模的约束损耗来表征。同时,等离子体共振对金属表面附近环境的变化十分敏感,因此可以通过测量共振峰的偏移来计算外界环境折射率(RI)或温度等参数的变化^[8-9]。

光纤 SPR 传感器可以测量多种参数,比如 RI、温度、应力、振动、气体吸收和磁场等,并对它们进行诊断和控制。光纤 SPR 传感器同时具有体积小、抗干扰等优点,广泛应用于生物、医疗、环境监测等传感领域^[10-12]。在大部分实际应用中,测量仅限于单一的参数,如 RI 或磁场或温度。为了解决这个问题,2017 年 Yang 等提出了一种 D 形金属有机骨架表面等离子体共振(MOF-SPR)传感器,可以同时测量 RI 和温度,该模型在 RI 为 1.33~1.345 时,测量灵敏度为 2214 nm/RIU,在温度为 20~60 °C 范围内,灵敏度为 -1.81 nm/°C。本文通过改变传感器结构,在扩大 RI 和温度测量范围的同时提高了温度检测灵敏度,并且损耗峰值变大。损耗峰值越大,信噪比(SNR)越高,使得检测更加容易和精确,可用于实现多参数测量的高灵敏度实时分布式 SPR 传感器^[13]。

2 结构与理论基础

此 D 型光子晶体光纤表面等离子体共振传感器有两个检测通道,D 形平面涂厚度 m_1 为 40 nm 的金层作为通道 I,与 RI 分析物直接接触。在纤芯附近选择一个空气孔作为通道 II,空气孔内部覆盖厚度 m_2 为 40 nm 的金层,该气孔中心充满氯仿用以检测温度。相互独立的 RI 与温度通道和非对称结构引起的双折射使传感器能独立检测 RI 和温度的变化,从而避免了交叉敏感问题。结果表明,y 偏振光在通道 I 中的损耗峰值仅随 RI 的变化而发生偏移,不受温度浮动的影响。同样地,x 偏振光在通道 II 中的损耗峰值只受外界环境温度变化的影响,不受 RI 变化的影响。同时对比研究了金层厚度对传感器灵敏度的影响,确定了通道 I 和通道 II 金层的最佳厚度均为 40 nm。

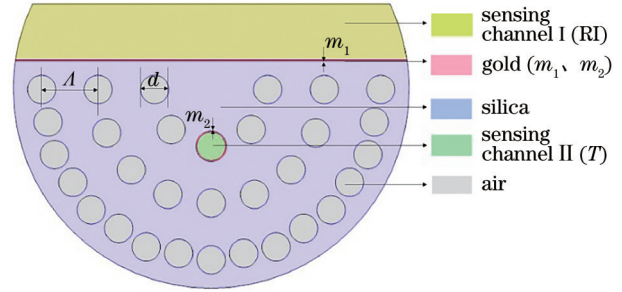


图 1 传感器结构图

Fig. 1 Structure diagram of sensor

包层由三层空气孔组成,呈正十六边形,每层空气孔之间的距离 $\Delta=2\ \mu\text{m}$ 。空气孔直径 $d=0.5\Delta$,金层厚度 $m_1=m_2=40\ \text{nm}$ 。选择用金产生 SPR,是因为金层 SPR 传感器具有较高的灵敏度并且化学性质比银更稳定。镀金气孔中填充液体氯仿,氯仿的热光系数为 $-6.328 \times 10^{-4}\ \text{K}$ 。背景材料为熔融 SiO_2 , RI 可以通过 Sellmier 方程得到^[14],

$$n^2 = A + B(1 - C/\lambda^2) + D/(1 - E/\lambda^2), \quad (1)$$

$$n_T = n_0 + dn/dT \times (T - T_0), \quad (2)$$

式中: n 为 SiO_2 的折射率,入射光不同, n 的值不同; n_T 为氯仿的折射率,随温度的变化而改变; T_0 是室温; $A=1.31552$; $B=0.788404$; $C=1.10199 \times 10^{-2}$; $D=0.91316$; $E=100$ 。

使用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 光学仿真模块中的电磁波,频域分析对模型进行模式分析,分别分析了 x 偏振与 y 偏振的模式分布,得到 SPP 模与纤芯模的分布结果如图 2 所示。

约束损耗定义为^[15-17]

$$\alpha_{\text{loss}} (\text{dB/cm}) = 8.686 \times k_0 \text{Im}(n_{\text{neff}}), \quad (3)$$

式中: $k_0 = 2\pi/\lambda$; $\text{Im}(n_{\text{neff}})$ 为折射率虚部。

当通道 I 分析物 $R_{\text{RI}}=1.33$, 环境温度为 20 °C 时, SPP 模与纤芯模的折射率、约束损耗如图 3 所示。当纤芯模折射率发生跃变时,对应波长即共振波长,此时纤芯中的能量耦合到金属表面的等离子体中,造成纤芯能量的降低,从而纤芯损耗达到最大值,出现损耗峰。共振波长处也是纤芯模折射率与 SPP 模折射率的交点处: a 点与 b 点对应, c 点与 d 点对应。

3 结果与讨论

采用控制变量法研究传感器的灵敏度,通过共振峰的偏移量计算灵敏度的大小,计算式^[18]为

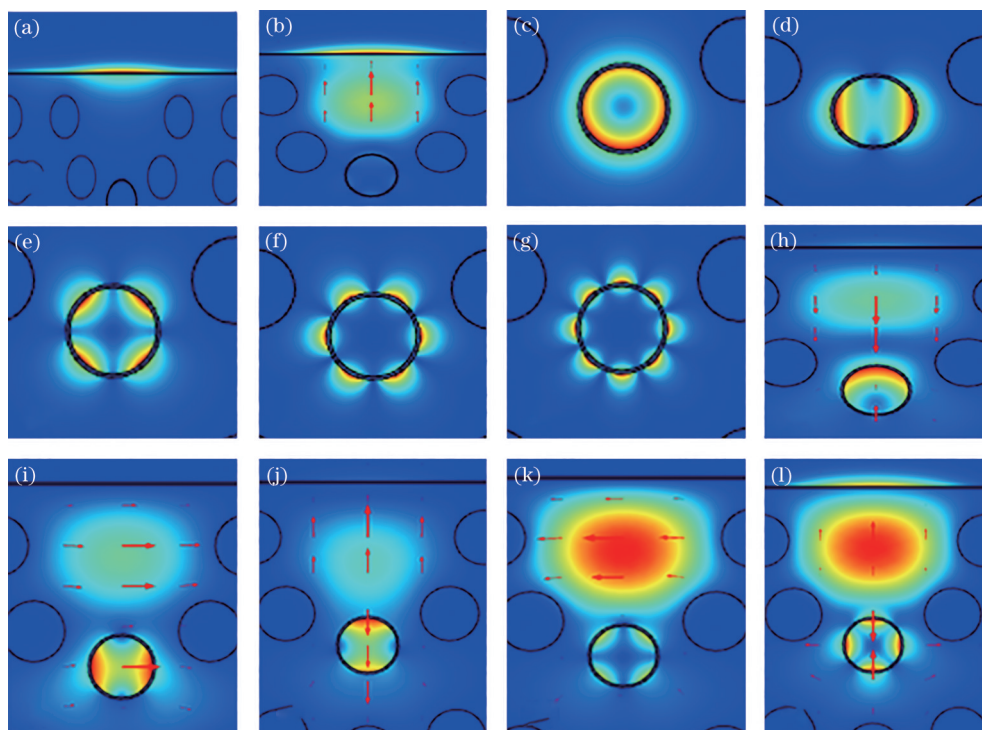


图2 SPP模式与纤芯模式仿真结果。感测区I的(a) SPP模和(b) y 偏振的纤芯模;感测区II的(c)零阶、(d)一阶、(e)二阶、(f)三阶、(g)四阶SPP模;(h)零阶 y 偏振纤芯模;(i)一阶 x 偏振纤芯模;(j)一阶 y 偏振纤芯模;(k)二阶 x 偏振纤芯模;(l)二阶 y 偏振纤芯模

Fig. 2 Simulation results of SPP mode and core mode. (a) SPP mode and (b) y -polarization core mode of sensing region I; (c) zero-order, (d) first-order, (e) second-order, (f) third-order, and (g) fourth-order SPP mode of sensing region II; (h) zero-order y -polarization core mode; (i) first-order x -polarization core mode; (j) first-order y -polarization core mode; (k) second order x -polarization core mode; (l) second order y -polarization core mode

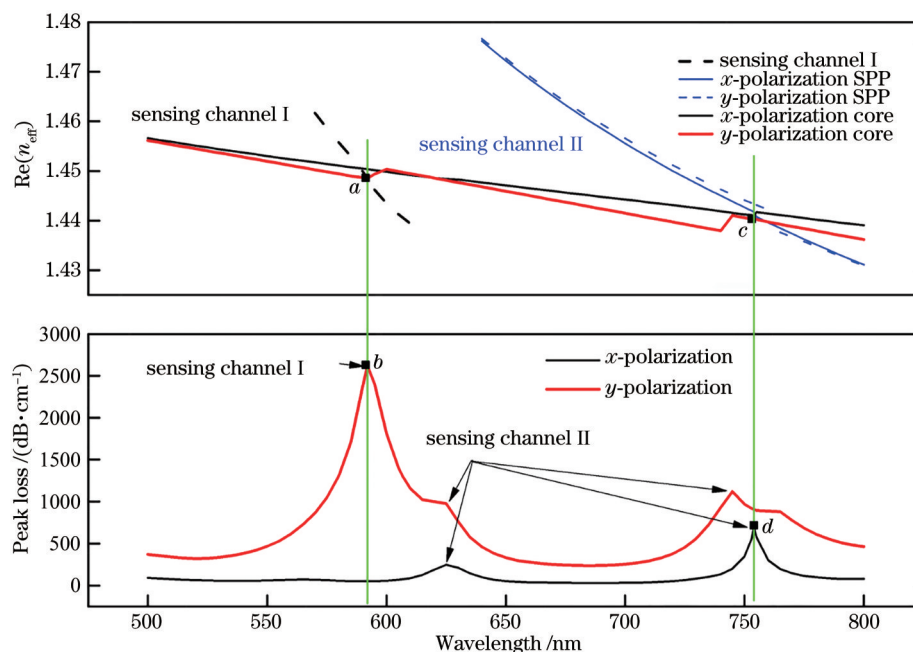


图3 SPP模、纤芯模的RI与 x 偏振和 y 偏振的约束损耗

Fig. 3 RI of SPP modes and core modes, and confinement losses of x -polarization and y -polarization

$$\begin{cases} S_n = \Delta\lambda / \Delta n \\ S_T = \Delta\lambda / \Delta T \end{cases} \quad (4)$$

式中： S_n 为折射率灵敏度； S_T 为温度灵敏度。

分别改变 RI 和温度， x 、 y 偏振共振峰偏移情况如图 4 所示。当温度不变，RI 由 1.33 变为 1.34 时， x 偏振共振波长不变， y 偏振共振波长偏移了 15 nm，说明

在通道 I 中只有 y 偏振的共振波长随 RI 变化而发生偏移，灵敏度为 1500 nm/RIU。当 RI 不变，温度从 20 °C 变为 30 °C 时， x 偏振共振波长偏移了 -25 nm， y 偏振共振波长不变，说明在通道 II 中只有 x 偏振的共振波长随温度的变化，灵敏度为 -2.5 nm/°C。

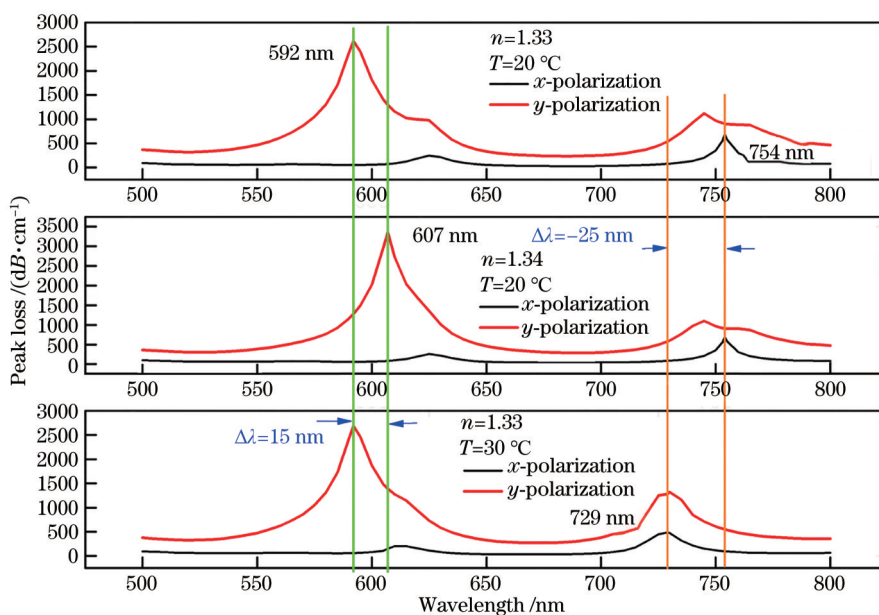


图 4 共振峰随 RI 和温度的变化图

Fig. 4 Plots of resonance peaks changing with RI and temperature

扩大 RI 和温度的研究范围，得到 x 偏振、 y 偏振共振波长与 RI 的变化关系如图 5 所示。由图 5(a) 得到了 RI 的可检测范围为 1.230~1.355，1.355 之后继续增大共振波长无明显变化。对共振波长随 RI 变化的散点图进行二次拟合，对二次拟合函数求一阶导数得到灵敏度的表达式为 $y = -13561.25885 + 11113.55312x$ 。所以在折射率为

1.230~1.355 的范围内，灵敏度最高可达 1497.6 nm/RIU，相关系数为 0.99542。RI 从 1.330 增大到 1.355 的过程中，共振波长的变化如图 5(b) 所示，对二次拟合函数求一阶导数得到灵敏度表达式为 $y = 1645.71429 - 11.2057e^{-8}x$ ，此折射率范围内最高灵敏度可达 1645.7 nm/RIU，相关系数为 0.99567。

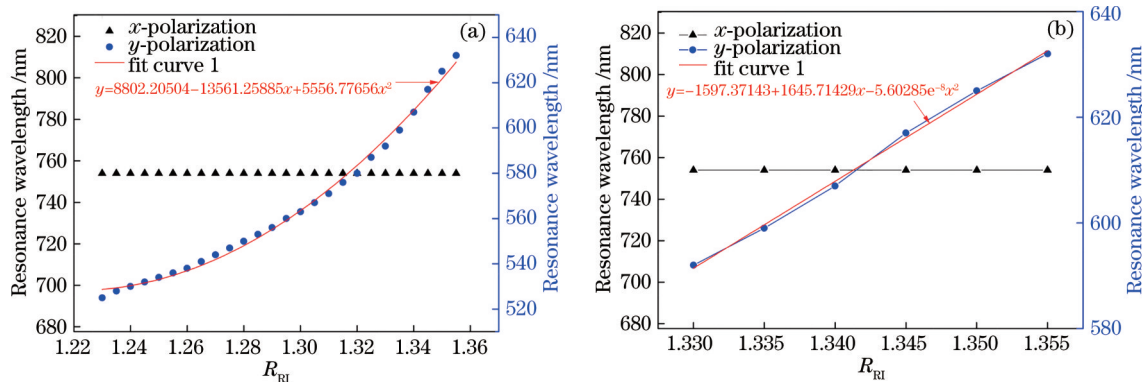


图 5 共振波长随 RI 的变化图。(a) 1.225~1.355；(b) 1.330~1.355

Fig. 5 Plots of resonance wavelength changing with RI. (a) 1.225—1.355; (b) 1.330—1.355

由图 6 (a) 得到了温度的可检测范围为 5~85 °C, 因为当温度为 90 °C 时主次峰峰值已经十分接近, 所以最大检测温度为 85 °C。对温度可检测范围内的二次拟合函数求导得到灵敏度表达式为 $y = -3.11662 + 0.02356x$, 所以可检测范围内的灵

敏度最高可达 $-3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 相关系数为 0.99996。温度在 20~60 °C 范围内时, 共振波长的变化如图 6 (b) 所示, 对二次拟合函数求一阶导数得到灵敏度表达式为 $y = -3.18446 + 0.0252x$, 所以此范围内灵敏度最高可达到 $-2.68 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 相关系数为 0.99988。

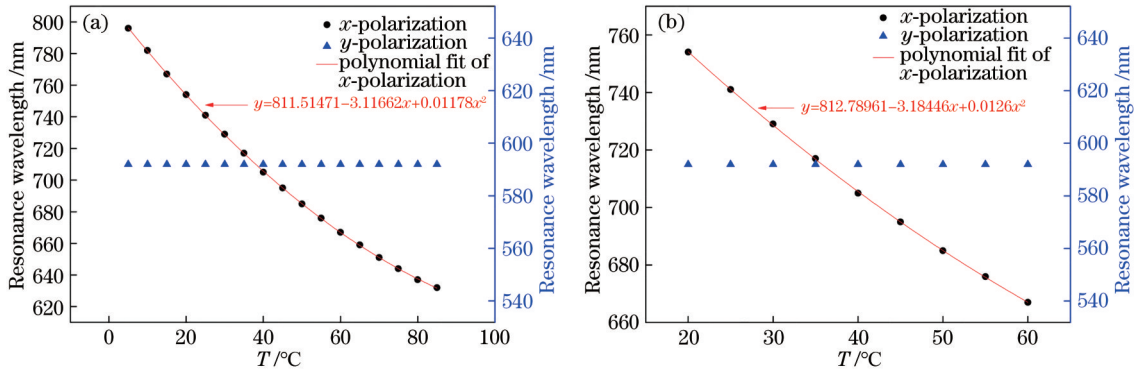


图 6 共振波长随温度的变化。(a) 5~85 °C; (b) 20~60 °C

Fig. 6 Variation of resonance wavelength with temperature. (a) 5—85 °C; (b) 20—60 °C

传感器灵敏度的影响因素之一是金层的厚度, 因此需要对比研究, 从而确定传感器结构的最佳金层厚度, 图 7 是通道 I 金层厚度 m_1 对约束损耗的影响。随着 m_1 增大, 共振峰值逐渐减小, 共振波长偏移量先增大后减小, 在 $m_1 = 40 \text{ nm}$ 处达到最大值 15 nm。因此, 虽然当 $m_1 = 30 \text{ nm}$ 时, 共振峰峰值大于 $m_1 = 40 \text{ nm}$ 时, 但仍选择将 m_1 固定在 40 nm, 因为当 $m_1 = 40 \text{ nm}$ 时共振波长偏移量最大, 此时传感器的灵敏度最高。

表 1 不同 m_1 对应的共振波长偏移量

Table 1 Resonance wavelength offset corresponding to different m_1

m_1	R_{RI}	y-polarization	$\Delta\lambda$
20	1.33	558	14
	1.34	572	
30	1.33	558	14
	1.34	572	
40	1.33	592	15
	1.34	607	

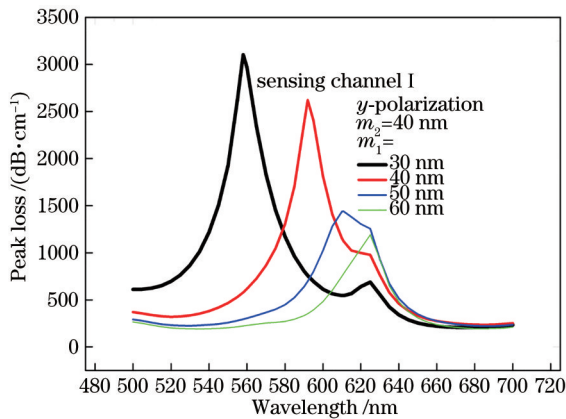


图 7 m_1 从 30 nm 到 60 nm, 约束损耗的变化

Fig. 7 Variation of confinement losses when m_1 is in range of 30—60 nm

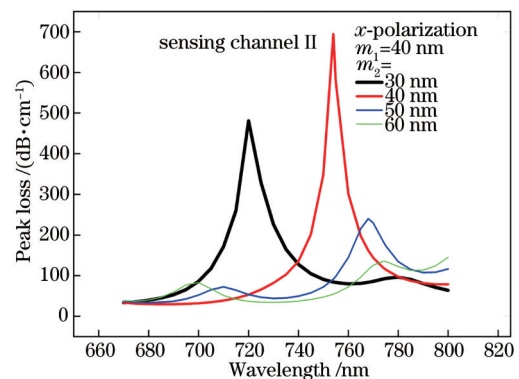


图 8 m_2 从 30 nm 到 60 nm, 约束损耗的变化

Fig. 8 Variation of confinement losses when m_2 is in range of 30—60 nm

图 8 是通道 II 金层厚度 m_2 对约束损耗的影响。随着 m_2 的逐渐增大, 损耗峰值先增大后减小, 在 $m_2 = 40 \text{ nm}$ 处达到最大值。损耗峰值越大, SNR 越高, 使得检测更加容易和精确。因此, 通道 II 金层

的最佳厚度为 $m_2 = 40 \text{ nm}$ 。

4 结 论

本文提出了一种新型传感器结构, 并通过有限

元模拟仿真软件 COMSOL Multiphysics 对该传感器的传感性能进行了分析。相比其他结构具有以下优点:1) 实现了 RI 和温度的同时测量,避免了交叉敏感。RI 发生变化时,只有 y 偏振共振波长发生偏移;温度改变时,只有 x 偏振共振波长发生偏移。2) 实现了较大范围内折射率和温度的动态监测。可以同时实现折射率为 1.230~1.355、温度为 5~85 °C 的检测。3) 温度灵敏度有了较大提高。温度处于 20~60 °C 时,灵敏度为 $-2.68 \text{ nm}/^\circ\text{C}$;在整个可测范围内灵敏度为 $-3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。4) 增大了共振时的损耗峰值,RI 为 1.34、温度为 20 °C 时,损耗峰值达到 3359.15 dB/cm,使检测更加精确。此结构的优势在于能在较大范围内独立检测的同时又能保证相对较高的灵敏度。

参考文献

- [1] 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.
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.
- [2] Li G M, Li Z Y, Li Z R, et al. High-sensitivity optical-fiber microfluidic chip based on surface plasmon resonance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0106002.
李钢敏, 李致远, 李正冉, 等. 基于表面等离子体共振的高灵敏度光纤微流控芯片[J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0106002.
- [3] Lü Q, Huang D X, Yuan X H, et al. Sensitivity of surface plasmon resonance sensor for different wavelengths[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(7): 972-976.
吕强, 黄德修, 元秀华, 等. 不同波长下表面等离子体共振传感器的灵敏度[J]. *中国激光*, 2007, 34(7): 972-976.
- [4] Li Z Q, Meng X Y, Piao R Q, et al. Humidity detection based on surface plasmon resonance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(6): 0624001.
李志全, 孟晓云, 朴瑞琦, 等. 用表面等离子体共振原理检测湿度环境[J]. *光子学报*, 2015, 44(6): 0624001.
- [5] Xiao G L, Zhang K F, Yang H Y, et al. Refractive index sensor with double resonance peaks for D-type symmetric two-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 40(12): 1206001.
肖功利, 张开富, 杨宏艳, 等. D型对称双芯光子晶体光纤双谐振峰折射率传感器[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1206001.
- [6] Li Y P, Liu J X, Yuan Y F. Aluminum-graphene structure based on phase modulation employed for biosensing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(7): 0724002.
李勇萍, 刘军贤, 袁玉峰. 用于生物传感的相位调制的铝膜-石墨烯结构[J]. *光子学报*, 2020, 49(7): 0724002.
- [7] 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.
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.
- [8] Hao D, Wang J S, Xie Y H, et al. Surface plasmon resonance sensor based on dual-core photonic crystal fiber for low refractive index detection in mid-infrared spectrum[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(6): 0628001.
郝丹, 王建帅, 解宇恒, 等. 基于双芯光子晶体光纤的中红外表面等离子体共振低折射率传感器[J]. *光子学报*, 2020, 49(6): 0628001.
- [9] Zhao X J, Chen H W, Song D Q, et al. Surface plasmon resonance sensor, part I: fundamentals[J]. *Analytical Instrumentation*, 2000(4): 1-8.
赵晓君, 陈焕文, 宋大千, 等. 表面等离子体共振传感器 I: 基本原理[J]. *分析仪器*, 2000(4): 1-8.
- [10] 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.
刘海, 白冰冰, 张砚曾, 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.
- [11] Feng L H, Zeng J, Liang D K, et al. Development of fiber-optic surface plasmon resonance sensor based on tapered structure probe[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(12): 124207.
冯李航, 曾捷, 梁大开, 等. 楔形结构光纤表面等离子体共振传感器研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(12): 124207.
- [12] Chen Q H, Han W Y, Kong X Y, et al. Detection of solution refractive index variation based on optical fiber surface plasmon resonance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0804003.

- 陈强华, 韩文远, 孔祥悦, 等. 基于光纤表面等离子体共振检测溶液折射率变化[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0804003.
- [13] Yang X, Lu Y, Liu B, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on SPR in D-shaped MOF[J]. Applied Optics, 2017, 56(15): 4369-4374.
- [14] Ghosh G, Endo M, Iwasaki T. Temperature-dependent Sellmeier coefficients and chromatic dispersions for some optical fiber glasses[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(8): 1338-1342.
- [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] Zhu S H, Tan C, Wang Y, et al. Photonic crystal fiber high sensitivity magnetic field and temperature sensor based on surface plasma resonance effect and defect coupling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0310001.
- 朱晟昇, 谭策, 王琰, 等. 基于 SPR 效应和缺陷耦合的光子晶体光纤高灵敏度磁场与温度传感器[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0310001.
- [17] Bai Y K, Ma Y, Wei R X. A dual-core photonic crystal fiber temperature sensor based on surface plasmon resonance characteristics of TiN[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(8): 0806001.
- 白育堃, 马颖, 魏仁霄. 基于氮化钛薄膜表面等离子体共振特性的双芯光子晶体光纤温度传感器[J]. 光子学报, 2016, 45(8): 0806001.
- [18] 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.
- 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.