

基于表面等离子体共振的光子晶体光纤温度传感器

叶楚妮¹, 陈鹤鸣^{2*}

(1.南京邮电大学 电子与光学工程学院、微电子学院,南京 210023; 2.南京邮电大学 贝尔英才学院,南京 210023)

摘要:为了解决涂敷在光子晶体光纤(PCF)外表面的金属膜易氧化和传感器灵敏度较低的问题,提出了一种基于表面等离子体共振(SPR)的双层膜侧抛光 PCF 温度传感器。该 PCF 的 2 个抛光面相互垂直,光纤的抛光表面涂覆银,并在银膜外面涂覆一层厚度为 20 nm 的 SiO₂ 膜。使用 COMSOL 仿真软件对传感器的特性进行数值仿真,仿真结果表明:传感器的温度测量区间为 10~60 ℃,最高灵敏度为 20.2 nm/℃,温度分辨率可达 4.95×10^{-3} ℃。

关键词:光子晶体光纤;表面等离子体共振;温度传感器;乙醇氯仿混合液;有限元法

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2021)11-0001-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.11.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Photonic crystal fiber temperature sensor based on surface plasmon resonance

YE Chuni¹, CHEN Heming^{2*}

(1. College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to solve the problems of low sensitivity and easy oxidation of metal film in the photonic crystal fiber (PCF) temperature sensor, a double coating with side polishing PCF temperature sensor based on surface plasmon resonance (SPR) is proposed in this paper. Two polished surfaces of the PCF are perpendicular to each other, the polished surface of the fiber are coated with silver, and a layer of SiO₂ film with a thickness of 20 nm is coated outside the silver film. All numerical simulations of sensor characteristics are performed in the COMSOL software. The simulation results show that the PCF temperature sensor has a temperature measurement range of 10~60 ℃, a highest sensitivity of 20.2 nm/℃, and a temperature resolution of 4.95×10^{-3} ℃.

Key words: photonic crystal fiber; surface plasmon resonance; temperature sensor; ethanol chloroform mixture; finite element method

0 引言

光子晶体光纤(PCF)具有低损耗、低非线性等优点,已广泛应用于传感器领域,可测量温度^[1-2]、扭转^[3]、折射率^[4-5]、气体吸收^[6]和磁场^[7]等各种物理量。表面等离子体共振(SPR)传感技术具有高灵敏度、高分辨率等特征,因此,SPR 与 PCF 相结合的 PCF-SPR 传感器

受到了广泛关注^[8-9]。2012 年,PENG Y 等人^[10]设计了一种 PCF-SPR 温度传感器,该传感器灵敏度较低,仅 720 pm/℃。2014 年,LU Y 等人^[11]使用填充不同浓度分析物的 PCF 和银纳米线实现温度传感,在 10~40 ℃范围内灵敏度高达 2.7 nm/℃。2019 年,ZHAO L 等人^[12]提出了一种基于全固态 D 型 PCF 的 SPR 传感器,不仅可以测量液体折射率,还能对温度进行测量,在-3~15 ℃温度范围内的最大灵敏度可达 4.22 nm/℃。然而,以上传感器都需要将金属材料涂覆在 PCF 的某些空气孔内,并在空气孔填充温敏液体,这对微米级的 PCF 而言是十分困难的。于是,有人提出在 PCF 的外表面涂覆金属膜,如圆形 PCF-SPR 传感器^[13]和 D 形 PCF-SPR 传感器^[14],但该类传感器将金属膜镀在外表面,需要解决金属氧化问题。

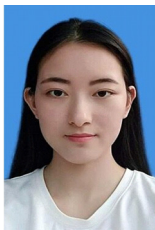
基于此,本文提出一种结构新颖的 PCF-SPR 温度

收稿日期:2021-02-03。

基金项目:国家自然科学基金项目(61571237、61077084)资助;江苏省自然科学基金项目(BK20151509)资助。

作者简介:叶楚妮(1996—),女,硕士研究生,现就读于南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院物理电子学专业,研究方向为光子学与光电技术,主要从事 PCF 传感器的研究与仿真验证工作。

* 通信作者:陈鹤鸣(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信与光波技术领域的研究工作。



传感器,不仅能阻止金属氧化,同时还能提高传感器的灵敏度。

1 PCF-SPR 温度传感器系统结构与工作原理

本文设计的 PCF-SPR 温度传感器的系统结构如图 1 所示,包括宽带光源(BBS)、单模光纤(SMF)、PCF-SPR 温度传感器、光谱分析仪(OSA)和计算机。BBS 发射宽带频谱依次通过 SMF1、PCF-SPR 温度传感器和 SMF2,最后到达 OSA,获得的光谱由计算机检测。传感器的横截面如图 2 所示,靠近纤芯的是第一层空气小孔,其按正六边形排列,小孔直径 $d_1=0.72\text{ }\mu\text{m}$,孔间距 $\Lambda=1.5\text{ }\mu\text{m}$;第二层空气孔由 6 个直径为 d_2 的空气大孔和 2 个直径为 d_1 的空气小孔组成。空气孔多数在光纤的下半部分,抛光面附近的空气孔较少,目的是为了使纤芯能量耦合至金属界面时受到较少的限制。空气大孔直径 $d_2=1.2\text{ }\mu\text{m}$,空气大孔和第二层空气小孔到纤芯中心的距离分别为 $2\Lambda\text{ }\mu\text{m}$ 和 $\sqrt{3}\Lambda\text{ }\mu\text{m}$ 。光纤的两侧使用抛光技术^[15-16]制造,2 个抛光边与光纤直径组成圆内接等腰直角三角形,光纤直径为 $8\text{ }\mu\text{m}$,抛光平面的宽度 w 为 $4\sqrt{2}\text{ }\mu\text{m}$ 。在 2 个抛光面镀上厚度 t 为 30 nm 的金属银,然后在银的外表面覆盖厚度 t_s 为 20 nm 的 SiO_2 。作为传感介质的温敏液体由乙醇和氯仿按体积比 1:1 混合组成(选用氯仿是因为其热敏

系数大,但其折射率较高,故需要与乙醇混合来降低其折射率),其厚度为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。最外层的完美匹配层厚度为 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 。

PCF-SPR 温度传感器的工作原理如图 3 所示,根据波动理论,入射光在光纤全反射处产生消逝波,而涂覆金属的抛光面将被消逝波激发出表面等离子体波(SPW)。当消逝波与 SPW 发生相位匹配时,入射光的能量被金属表面电子大量吸收,导致反射光的能量急剧减少,产生 SPR 现象,此时入射光波长称为共振波长。SPR 能否发生取决于温敏液体折射率和入射光波长,当温度发生变化时,温敏液体的折射率会随之变化,从而导致共振波长改变。

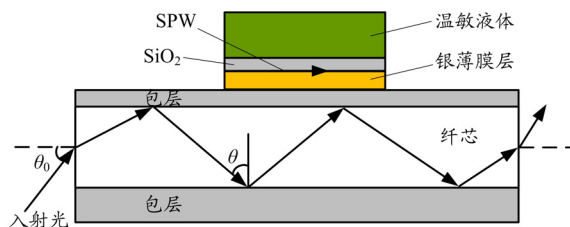


图 3 PCF-SPR 温度传感器的工作原理图

PCF-SPR 温度传感器的背景材料是熔融石英,其折射率可由 Sellmeier 方程^[17]求出:

$$n^2(\lambda, T) = 1.31552 + 6.90754 \times 10^{-6} T + \frac{(0.788404 + 23.5835 \times 10^{-6} T) \lambda^2}{\lambda^2 - (0.0110199 + 0.584758 \times 10^{-6} T)} + \frac{(0.91316 + 0.548368 \times 10^{-6} T) \lambda^2}{\lambda^2 - 100} \quad (1)$$

其中, λ 是入射光的波长,单位为 μm ; T 是温度,单位为 $^\circ\text{C}$ 。

本文在 PCF 的 2 个抛光面涂覆银膜,采用 Drude 模型来分析其介电常数。

$$\varepsilon_m(\lambda) = 1 - \frac{\lambda^2 \lambda_c^2}{\lambda_p^2 (\lambda_c + i\lambda)} \quad (2)$$

其中, λ_p 和 λ_c 分别为银的等子体共振波长和碰撞波长, $\lambda_p = 1.4541 \times 10^{-7}\text{ m}$, $\lambda_c = 1.7614 \times 10^{-5}\text{ m}$ 。由于温敏液体比金属对温度更敏感,因此金属的温度特性被忽略^[18]。

温敏液体的折射率^[17]可定义为:

$$n_m = x\% \times \left[n_{\text{ethanol}} \Big|_{T=20\text{ }^\circ\text{C}} + \frac{dn_{\text{ethanol}}}{dT} \times (T - 20) \right] + (100 - x)\% \times \left[n_{\text{chloroform}} \Big|_{T=20\text{ }^\circ\text{C}} + \frac{dn_{\text{chloroform}}}{dT} \times (T - 20) \right] \quad (3)$$

其中, $x\%$ 、 $(100 - x)\%$ 分别代表乙醇和氯仿的比例; dn_{ethanol}/dT 和 $dn_{\text{chloroform}}/dT$ 分别表示乙醇和氯仿的热光系数,数值依次为 $-3.94 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 和 $-6.328 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 。忽略

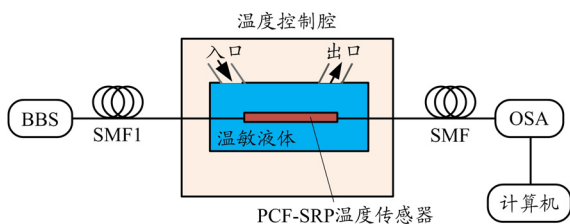


图 1 温度传感器系统结构图

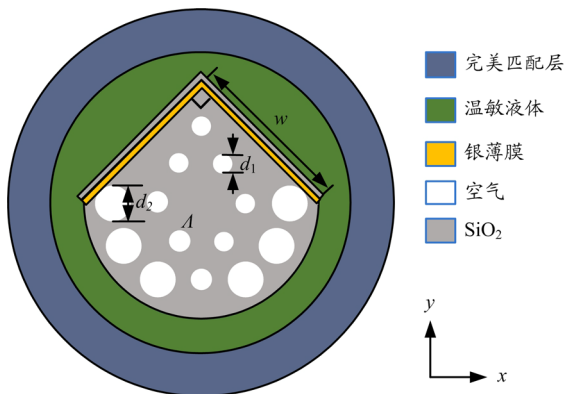


图 2 PCF-SPR 温度传感器横截面示意图

温敏液体的物质分散,并假设乙醇和氯仿的折射率在 20 ℃时分别为 1.36048 和 1.43136^[15-16]。另外,本文设乙醇和氯仿的比例为 1:1,由于乙醇的沸点是 78.4 ℃,氯仿的沸点是 61.3 ℃,因此 2 种物质混合的温敏液体能测量的温度上限为 60 ℃。

2 数值分析与参数优化

本文使用基于全矢量有限元法的 COMSOL 仿真软件对传感器的特性进行数值仿真,设温度 T 为 30 ℃,得到 PCF-SPR 温度传感器纤芯基模的损耗谱、纤芯基模和 SPP 模式的色散关系如图 4 所示。在 0.776 μm 的共振波长下,蓝色实线和黑色实线相交,此时从纤芯模式转移到 SPP 模式的能量最大,并出现损耗峰,损耗峰值为 170.57 dB/cm。纤芯基模的损耗值 α 可通过式(4)求出^[19]。

$$\alpha = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} \times \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^4 \quad (4)$$

其中, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为纤芯基模的有效折射率虚部。

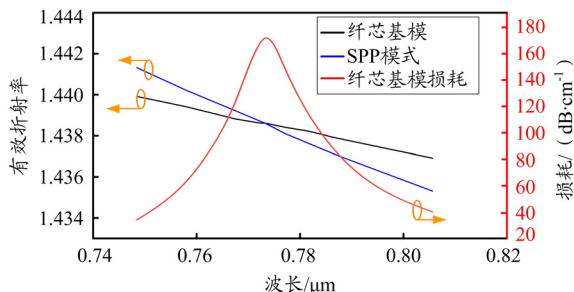


图 4 PCF-SPR 温度传感器传输模式的损耗谱和色散曲线

温度变化会改变乙醇氯仿混合液的折射率,而混合液的折射率变化会影响 SPP 模式的有效折射率,继而相位匹配条件被改变,最后共振波长和损耗峰都会发生改变。不同温度下的损耗曲线如图 5 所示,当温度从 60 ℃变化到 10 ℃时,共振波长红移且损耗值增加。当温度为 60 ℃、50 ℃、40 ℃、30 ℃、20 ℃和 10 ℃

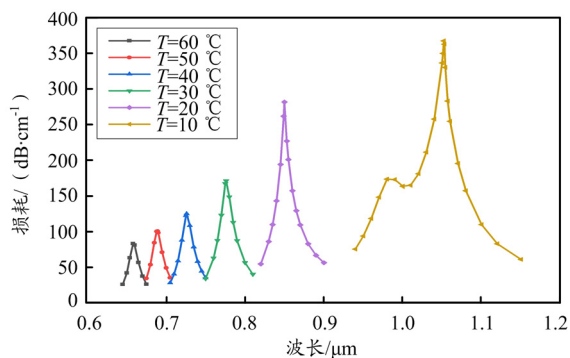


图 5 温度变化时,共振损耗谱

时,乙醇氯仿混合液的折射率对应为 1.3754、1.3805、1.3857、1.3908、1.3957 和 1.4011。由此可知,随着温度降低,温敏液体的折射率增加,该折射率更加接近纤芯基模的有效折射率,较多的纤芯能量传递到 SPW,导致耦合效率增强^[20]。当温度为 10 ℃时,共振波长为 1.052 μm ,纤芯基模的损耗峰值为 366.94 dB/cm,该温度下损耗曲线还会出现共振次峰,但跟主峰相比,次峰的存在并不影响检测。

基于上述讨论,本文研究了 PCF-SPR 温度传感器在 10~60 ℃之间的灵敏度,传感器的温度灵敏度可由式(5)^[21]计算。

$$S_\lambda = \Delta\lambda_{\text{peak}} / \Delta T \quad (5)$$

其中, $\Delta\lambda_{\text{peak}}$ 是共振波长的偏移量, ΔT 是温度的变化量。共振波长随温度变化曲线如图 6 所示,当温度从 60 ℃变化到 10 ℃时,每减少 10 ℃,损耗峰的偏移量依次为 31 nm、37 nm、50 nm、70 nm 和 202 nm,根据式(5)可得波长灵敏度分别为 3.1 nm/℃、3.7 nm/℃、5 nm/℃、7 nm/℃和 20.2 nm/℃。假设 OSA 最小分辨率 $\Delta\lambda_{\text{min}} = 0.1 \text{ nm}$,由分辨率计算公式^[20]可得:

$$R = \Delta T \times \Delta\lambda_{\text{min}} / \Delta\lambda_{\text{peak}} \quad (6)$$

根据式(6)计算得到温度传感器的最高分辨率 $R = 4.95 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ 。

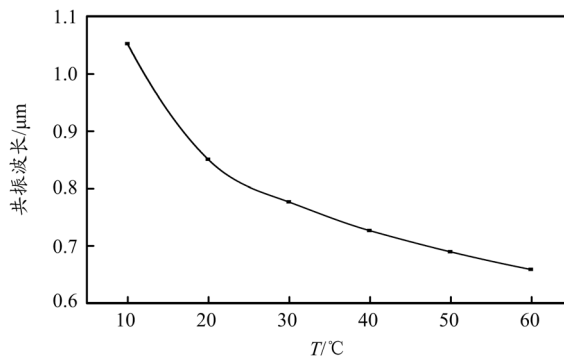


图 6 共振波长随温度变化曲线

2.1 空气孔直径 d_2 对损耗谱的影响

PCF-SPR 温度传感器的其它结构参数不变,本文只改变空气孔直径 d_2 ,研究 d_2 的变化对损耗谱的影响,结果如图 7 所示。可以看出,随着 d_2 从 1.15 μm 增加到 1.2 μm 再增加到 1.25 μm ,损耗峰值分别为 180.73 dB/cm、170.57 dB/cm 和 162 dB/cm,共振峰峰值随着 d_2 的增加而降低,这是因为 d_2 增大将导致包层的等效折射率减小,更多的能量被限制在纤芯区域,使得纤芯基模的损耗减少。此外,损耗峰的共振波长分别为 0.778 μm 、0.776 μm 和 0.775 μm , d_2 增大时共振波长出现微小蓝移,说明 d_2 的变化对共振波长的

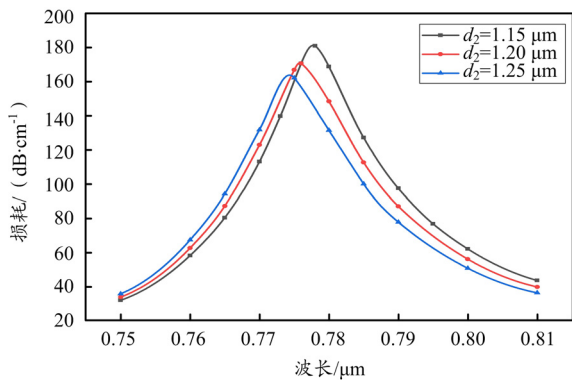


图7 d_2 变化对损耗谱的影响

影响较小,因此降低了对制作精度的要求。

2.2 空气孔直径 d_1 对损耗谱的影响

PCF-SPR 温度传感器的其它结构参数不变,本文只改变空气孔直径 d_1 , 研究 d_1 的变化对损耗谱的影响,结果如图 8 所示。可以看出,当 d_1 从 $0.70 \mu\text{m}$ 增大到 $0.74 \mu\text{m}$ 时, 损耗峰值从 210.23 dB/cm 下降到 144.09 dB/cm ,半峰全宽增加,这是因为 d_1 的增大将加强对纤芯能量的限制,减少其泄露,从而减少纤芯基模的损耗。此外,当 d_1 分别为 $0.70 \mu\text{m}$ 、 $0.72 \mu\text{m}$ 和 $0.74 \mu\text{m}$ 时, 共振波长依次为 $0.771 \mu\text{m}$ 、 $0.776 \mu\text{m}$ 和 $0.783 \mu\text{m}$,由此可知,随着 d_1 增大共振波长红移。当 $d_1=0.74 \mu\text{m}$ 时,损耗谱较为平缓,难以准确判断其损耗峰的位置;而当 $d_1=0.70 \mu\text{m}$ 时,损耗峰过大,不利于 OSA 检测共振波长。综合考虑,本文选取 $d_1=0.72 \mu\text{m}$ 。

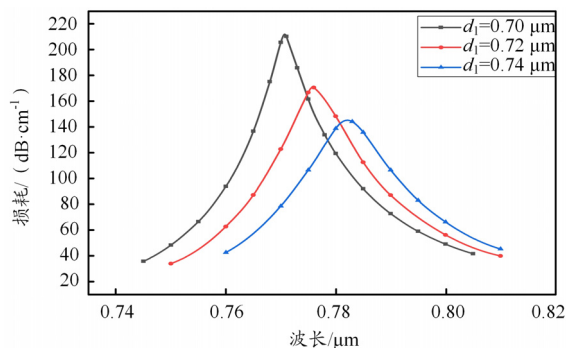


图8 不同 d_1 下的损耗谱曲线

2.3 银膜厚度对损耗谱的影响

PCF-SPR 温度传感器的其它结构参数不变,温度为 30°C 时,银膜厚度的变化对损耗谱的影响如图 9 所示。当银膜层厚度由 30 nm 、 40 nm 、 50 nm 依次增大时,纤芯基模的损耗从 170.57 dB/cm 急剧减小,共振峰的半峰全宽大幅增加,共振波长发生红移;当银膜厚度为 40 nm 和 50 nm 时,共振峰难以识别,无法判断共振波长的位置,这是由于银膜较厚,倏逝波很难

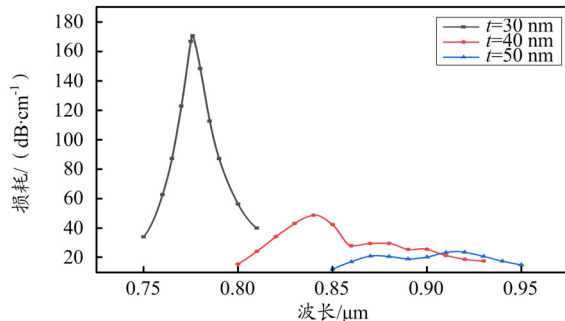
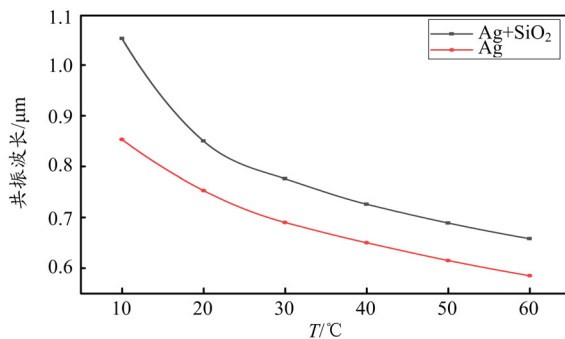


图9 不同银膜厚度下的损耗谱曲线

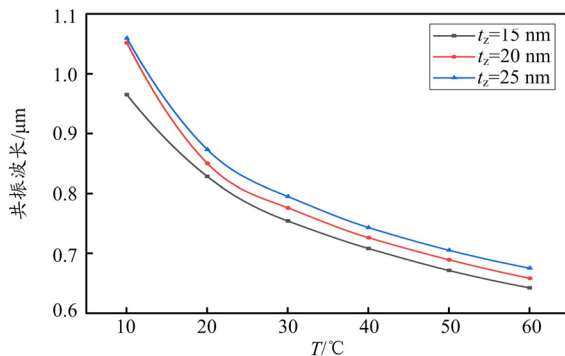
透过,导致 SPR 减弱^[2],因此本文选择银膜厚度为 30 nm 。

2.4 SiO_2 膜对传感器性能的影响

银外表面的 SiO_2 膜也是影响传感器性能的重要因素, SiO_2 膜一方面可以防止银氧化,另一方面能提高温度传感器的灵敏度。同样保持传感器的其它结构参数不变,当温度为 30°C 时,添加 SiO_2 膜前后共振波长随温度变化的曲线如图 10(a)所示。可以看出,黑色曲线的斜率大于红色曲线的斜率,即添加 SiO_2 薄膜的银膜灵敏度更高。将图 10(a)的数据代入式(5),计算得到温度从 60°C 变化到 10°C ,每减少 10°C 时,未添加 SiO_2 膜的传感器灵敏度依次为 $3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 、 $3.5 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 、



(a) 有无添加 SiO_2 情况下共振波长随温度变化曲线



(b) 不同 SiO_2 厚度下共振波长随温度变化曲线

图10 SiO_2 膜对温度传感器的影响

4 nm/℃、6.3 nm/℃和 10.2 nm/℃,而添加 SiO₂ 膜后,传感器灵敏度依次为 3.1 nm/℃、3.7 nm/℃、5 nm/℃、7 nm/℃和 20.2 nm/℃。传感器的灵敏度在各个温度范围均有所提升,尤其在 20~10 ℃的区间内,灵敏度增加一倍以上。图 10(b)为 SiO₂ 膜厚度 t_z 分别为 15 nm、20 nm 和 25 nm 时,共振波长随温度变化的曲线图。可以看出,当 $t_z=20$ nm 时,曲线的斜率最大,尤其在 20~10 ℃区间,说明 SiO₂ 膜厚度为 20 nm 时传感器灵敏度最高,因此本文选择 SiO₂ 膜的厚度为 20 nm。

3 结束语

本文提出了一种基于 SPR 效应的新型 PCF-SPR 温度传感器,PCF 的 2 个抛光面均采用银膜和 SiO₂ 膜双层膜涂覆。分析仿真结果可知:当 $d_1=0.72 \mu\text{m}$ 、 $d_2=1.2 \mu\text{m}$ 、银膜厚度 $t=30$ nm 和 SiO₂ 膜厚度 $t_z=20$ nm 时,传感器性能最佳,在 10~60 ℃的温度范围内,灵敏度最高可达 20.2 nm/℃(折射率约 40400 nm/RIU),温度分辨率为 4.95×10^{-3} ℃。与需要孔内镀膜并填充温敏液体的温度传感器相比,本文设计的 PCF-SPR 温度传感器易于制备、性能优异,可广泛应用于温度传感领域。

参考文献:

- [1] YU Y, LI X, HONG X, et al. Some features of the photonic crystal fiber temperature sensor with liquid ethanol filling [J]. Optics Express, 2010, 18 (15): 15383–15388.
- [2] LIU Q, LI S, CHEN H, et al. Photonic crystal fiber temperature sensor based on coupling between liquid-core mode and defect mode [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(2): 1–9.
- [3] ZU P, CHAN CC, JIN Y, et al. A temperature-insensitive twist sensor by using low-birefringence photonic-crystal-fiber-based sagnac interferometer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(13): 920–922.
- [4] DASH J N, JHA R. Graphene-based birefringent photonic crystal fiber sensor using surface plasmon resonance [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(11): 1092–1095.
- [5] DASH J N, JHA R. Highly sensitive side-polished birefringent PCF-based SPR sensor in near IR [J]. Plasmonics, 2016, 11(6): 1505–1509.
- [6] ZHANG H, LU Y, DUAN L, et al. Intracavity absorption multiplexed sensor network based on dense wavelength division multiplexing filter [J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24545–24550.
- [7] CHEN H, LI S, LI J, et al. Magnetic field sensor based on magnetic fluid selectively infilling photonic crystal fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(7): 717–720.
- [8] 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.
- [9] SRIVASTAVA S K, GUPTA B D. Simulation of a localized surface-plasmon-resonance-based fiber optic temperature sensor [J]. Journal of the Optical Society of America, 2010, 27(7): 1743–1749.
- [10] PENG Y, HOU J, HUANG Z, et al. Temperature sensor based on surface plasmon resonance within selectively coated photonic crystal fiber [J]. Applied Optics, 2012, 51(26): 6361–6367.
- [11] LU Y, WANG M T, HAO C J, et al. Temperature sensing using photonic crystal fiber filled with silver nano-wires and liquid [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(3): 1–7.
- [12] ZHAO L, HAN H, LIAN Y, et al. Theoretical analysis of all-solid D-type photonic crystal fiber based plasmonic sensor for refractive index and temperature sensing [J]. Optical fiber technology, 2019, 50 (7): 165–171.
- [13] LI X, LI S, YAN X, et al. High sensitivity photonic crystal fiber refractive index sensor with gold coated externally based on surface plasmon resonance [J]. Micromachines (Basel), 2018, 9(12): 640–1–640–9.
- [14] 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.
- [15] SHI M, LI S, CHEN H. A high-sensitivity temperature sensor based on Sagnac interferometer employing photonic crystal fiber fully filled with ethanol [J]. Applied Physics B, 2018, 124(6): 94–1–94–7.
- [16] SAMOC A. Dispersion of refractive properties of solvents: Chloroform, toluene, benzene, and carbon disulfide in ultraviolet, visible, and near-infrared [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(9): 6167–6174.
- [17] 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.
- [18] SHARMA A K, GUPTA B D. Theoretical model of a fiber optic remote sensor based on surface plasmon resonance for temperature detection [J]. Optical Fiber Technology, 2006, 12(1): 87–100.
- [19] VILLATORO J, ANTONIO-LOPEZ E, ZUBIA J, et al. Interferometer based on strongly coupled multi-core optical fiber for accurate vibration sensing [J]. Optics Express, 2017, 25(21): 25734–25740.
- [20] YU X, ZHANG Y, PAN S, et al. A selectively coated photonic crystal fiber based surface plasmon resonance sensor [J]. Journal of Optics, 2009, 12(1): 015005-1–015005-4.
- [21] WANG X, LI S, CHEN H, et al. Compatibility of temperature sensor and polarization filter based on Au film and glycerin selectively infilling photonic crystal fibers [J]. Plasmonics, 2016, 11(5): 1265–1271.
- [22] LIU C, YANG L, LU X, et al. Mid-infrared surface plasmon resonance sensor based on photonic crystal fibers [J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14227–14237.