

基于SPR的液晶填充双D型PCF双参量传感器设计

范振凯*, 孟俊皓, 褚世超

河北科技大学信息科学与工程学院, 河北 石家庄 050018

摘要 提出了一种基于表面等离子体共振(SPR)原理的液晶填充的双D型光子晶体光纤(PCF)传感器,用于温度和折射率(RI)的双重检测。选用金作为金属对PCF中的两个大开环以及第二包层的4个气孔进行镀膜以激发SPR现象,实现了外部传感与内部传感的结合,并进一步增强了SPR效应。为了实现温度与RI的双重检测,将温敏材料液晶E7填入中央大气孔形成纤芯,进而提升温度传感性能,通过上下两侧的大开环与待测分析液的接触实现折射率传感。使用全矢量有限元法,在完美匹配层条件下对传感性能进行了分析,并研究了中央液晶孔、小气孔及普通气孔的大小对传感性能的影响。仿真结果表明,所设计的传感器在温度为15~50℃、折射率为1.48~1.55的检测范围内具有良好的温度和RI传感性能。

关键词 传感器; 光子晶体光纤; 表面等离子体共振; 双重检测传感器; 双D型; 液晶

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231849

1 引言

光子晶体光纤(PCF)具有周期性排列的气孔,与传统光纤相比,具有低约束损耗、色散灵活、高非线性和高双折射等优势。由于其结构参数可调、设计灵活的特点,PCF近年来在传感器领域受到广泛关注。PCF传感器具有实时检测、抗干扰能力强的优点,通过调节PCF周期性的气孔排列可以改变光纤横截面的折射率(RI)分布,进而影响光纤的传输性能。通过填充不同的先进液体材料可以实现不同的传感功能,例如:通过填充液晶、氯仿等温敏材料可以实现温度传感;通过填充磁流体材料可以实现磁场的检测。通过在PCF内部或外部沉积金属材料,可以激发表面等离子体共振(SPR)现象,当满足相位匹配条件时,入射光子的能量会逸散到金属表面,从而在核心模式产生损耗峰。温度或分析物RI的变化会影响PCF的RI分布,进而使损耗峰产生移动,因此通过观察损耗峰的移动可以实现温度或分析物RI的检测。SPR现象显著提升了PCF的灵敏度、检测范围等传感性能。常见的用于激发SPR的金属有金、银、铝等,金以其化学性质稳定、无氧化等特点,成为一种受欢迎的涂层材料。

近年来,基于对温度和RI的双参量传感的需求,研究人员提出了许多不同原理及不同结构的光纤传感器。2021年,Zhang等^[1]基于SPR原理提出了一种双

D型PCF传感器用于海水RI和温度的测量,通过对PCF两侧抛光并涂敷金膜,并在一侧进一步涂敷聚二甲基硅氧烷(PMDS)涂层,得到0~40℃的温度检测范围内的灵敏度为1.06 nm/℃,在1.33~1.34的海水RI范围内的灵敏度为1371 nm/RIU。2022年,陈海林等^[2]基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)原理提出了一种单模-无芯-细芯-无芯-单模熔接拉锥的温度与RI传感器,得到在20~150℃的温度检测范围内的灵敏度为33.63 pm/℃,在1.339~1.355的RI检测范围内的灵敏度为-135 nm/RIU。Zhu等^[3]提出了一种将PMDS涂层MZI与倾斜光纤布拉格光栅(TFBG)相结合的温度和RI双参量传感器,将MZI用于温度传感,TFBG的截止模式用于RI传感,在20~50℃的温度检测范围内最高灵敏度可达5.15 nm/℃,在分析物RI检测范围为1.3300~1.3614时平均波长灵敏度为521.92 nm/RIU。Meng等^[4]提出了一种六角形气孔排列的RI和温度SPR-PCF传感器,通过改变光纤直径改变气孔与包层的比例,在15~35℃范围内传感器的平均温度灵敏度达到2 nm/℃,在1.3333~1.3860的线性RI范围内的平均灵敏度为3381 nm/RIU。Fan等^[5]提出了一种液晶填充的D型RI和温度SPR-PCF传感器,通过改变液晶的填充方式,在15~50℃温度范围和1.47~1.55的RI范围内分别获得了3.2 nm/℃的温度灵敏度(Ws)和2567 nm/RIU的RI灵敏度。2023年,Wang等^[6]提出了一种七芯SPR-PCF传感器,结合了多芯光纤与

收稿日期: 2023-11-28; 修回日期: 2024-02-04; 录用日期: 2024-02-14; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 河北科技大学人才引进科研启动项目(PYB2018016)、河北省自然科学基金青年项目(A2020208005)

通信作者: *zhkfan@hebust.edu.cn

SPR 的优势,得到在 20~60 °C 温度范围内的灵敏度达到 -2.59 nm/°C,在 1.34~1.37 的 RI 范围内的灵敏度达到 1644 nm/RIU。

由此可见,虽然众多不同检测原理及结构的温度及 RI 双参量传感器已被提出,但基于非多检测原理或非多部件耦合的双参量传感器仍存在检测范围过小、灵敏度不够高的问题,无法满足实际需求。本文设计了液晶 E7 填充的双 D 型 SPR-PCF,进行温度和 RI 的双参量传感,设计的双 D 型结构延续并进一步增强了 D 型结构的纤芯更接近分析物及金属界面且纤芯占比较大的特点以提高传感性能。在对液晶纤芯直径 d_0 、小气孔直径 d_1 及普通气孔直径 d_2 进行参数调整后,计算得到:在温度检测范围为 15~50 °C 时,最大温度灵敏度可达 13.79 nm/°C;在温度检测范围为 25~45 °C 时,平均波长灵敏度(描述温度传感性能)为 7.6 nm/°C。检测液的 RI 为 1.48~1.55 时,RI 波长灵敏度为 2904.7 nm/RIU。

2 结构设计和理论分析

2.1 传感器结构、理论及制备方法

图 1 显示了所提出的双 D 型 SPR-PCF 的横截面。PCF 内部气孔呈六角形排布,在中央大孔填充液晶材料 E7 以形成纤芯,对 PCF 上下两侧进行抛光,上下两侧大开环上镀的金膜可以实现 SPR 外部传感,通过对第二层气孔选择性镀金膜实现 SPR 内部传感,进一步增强了 SPR 效应,提高传感性能。六角形排列的气孔具有不同大小的孔径,液晶纤芯直径 $d_0=2.4 \mu\text{m}$,第一层小气孔直径 $d_1=0.6 \mu\text{m}$,其余普通气孔直径 $d_2=1 \mu\text{m}$,上下两侧大开环直径 $d_3=3.2 \mu\text{m}$,液晶纤芯与第一层小气孔的间距 $\Delta_0=1.8 \mu\text{m}$,第一层小气孔与第二层普通气孔的间距 $\Delta_1=1.2 \mu\text{m}$,其余普通气孔间距 $\Delta_2=1.5 \mu\text{m}$,液晶纤芯与大开环的间距 $\Delta_3=3.5 \mu\text{m}$,大开环金膜厚度 $t_{\text{Au}1}=18 \text{ nm}$,内部选择性镀金膜厚度

$t_{\text{Au}2}=20 \text{ nm}$ 。基底材料为熔融石英,直径为 $14 \mu\text{m}$,高度为 $8 \mu\text{m}$ 。该传感器基底可由溶胶凝胶法制备,将硅醇盐溶于有机溶剂,形成均匀的溶胶,然后加入其他组分,将其浇筑进设计的模具中,传感器内部空气孔结构由插入的圆棒形成,溶胶在一定温度下反应形成凝胶,凝胶完成后移除圆棒,即可形成空气孔结构,最后经干燥处理和低温烧结制成预制棒。预制棒在光纤拉丝塔中拉丝,得到对应尺寸的 PCF。通过将 PCF 的两侧抛光 $3 \mu\text{m}$ 深度,形成所设计的双 D 型 PCF。

所设计的 SPR-PCF 的背景材料为熔融二氧化硅,二氧化硅具有良好的透明度和极其稳定的化学性质,可以在熔融状态下拉制为光纤,更容易实现光纤的生产,所以被用作背景材料。二氧化硅的色散可以用 Sellmeier 色散方程表示:

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{B_1^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3^2}{\lambda^2 - C_3}}, \quad (1)$$

式中: λ 为自由空间波长,单位为 μm ; B_1 、 B_2 、 B_3 、 C_1 、 C_2 、 C_3 的拟合常数可参考文献[7]。

SPR 现象是光从光密到光疏介质传输时产生的消失波与金属表面大量的可移动电子形成的表面等离子体(SPP)波满足相位匹配条件时发生的共振现象。

在 PCF 中,当光波从包层材料入射到金属膜表面时,入射角大于临界角时产生全反射现象。此时沿着临界面平行的方向会产生消失波,其波矢量^[8]可表示为

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0(\omega)} \sin \theta, \quad (2)$$

式中: ω 为入射光的角频率; c 为光速; $\epsilon_0(\omega)$ 为纤芯及包层材料的介电常数; θ 为光的入射角。沿着金属及分析液体界面传播的 SPP 波,其波矢量^[8]可表示为

$$k_{\text{sp}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}, \quad (3)$$

式中: ϵ_1 为金属膜的介电常数; ϵ_2 为外界环境介质(即分析液)的介电常数。当 k_x 与 k_{sp} 的实部相等时满足相位匹配条件,发生 SPR 现象,入射光的能量被金属表面的自由电子所吸收,反射光的强度急剧降低,在共振波长处出现一个强烈的损耗峰。SPR 产生的损耗峰对外界环境变化极为敏感,纤芯及包层材料、金属膜及分析液的变化均会造成损耗峰的移动,通过观察损耗峰的移动可以实现对 RI 及温度的检测。通常可以通过金属镀膜或在气孔中填充金属纳米线来激发 SPR。

金的化学性质稳定,不易被氧化,且表面有大量的自由电子,常被用作激发 SPR 的金属材料,使得 SPR 现象更容易产生。金的介电常数可以用 Drude^[9] 方程表示:

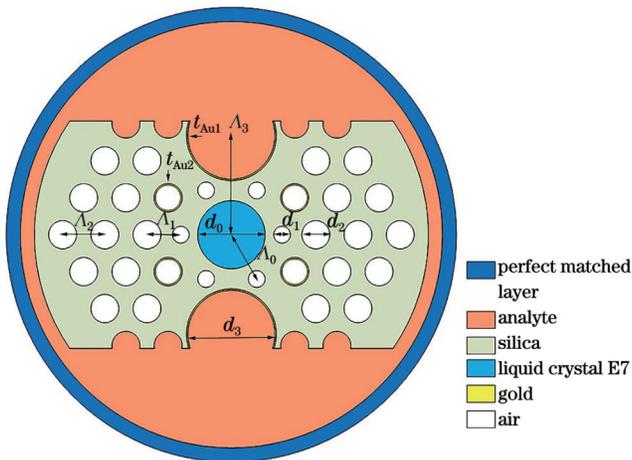


图 1 双 D 型 PCF 横截面图

Fig. 1 Cross section view of double-D-type PCF

$$\epsilon_{\text{gold}} = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\omega_{\tau})}, \quad (4)$$

式中： ϵ_{gold} 为金的介电常数； ϵ_{∞} 为高频时金的介电常数，其值为 9.75； ω_p 为金的等离子体频率，其值为 1.36×10^{16} rad/s； ω_{τ} 为金的电子散射频率，其值为 1.45×10^{14} rad/s。

金的熔点比二氧化硅低，通过溅射沉积涂层技术可以将金膜集成到 PCF 中^[10]。选择外部传感和内部传感结合的方式，在两个大开环上使得金属镀膜与 RI 分析物接触，这可以显著增加金膜的表面积，内部 4 个气孔的镀膜可以进一步增强 SPR 效应。

向列液晶(NLC) E7 具有液体流动性和晶体光学性质，比气体更容易填充 PCF 中的空气孔。定义 E7 的相对介电常数 $\epsilon_r^{(E7)}$ 为

$$\epsilon_r^{(E7)} = \begin{pmatrix} n_o^2 \sin^2 \varphi + n_e^2 \cos^2 \varphi & (n_e^2 - n_o^2) \cos \varphi \sin \varphi & 0 \\ (n_e^2 - n_o^2) \cos \varphi \sin \varphi & n_o^2 \cos^2 \varphi + n_e^2 \sin^2 \varphi & 0 \\ 0 & 0 & n_o^2 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中： φ 为 NLC 的旋转角度，NLC 分子的方向表示为 $(\cos \varphi, \sin \varphi)$ 。NLC 分子在电场作用下发生旋转，长轴方向与光传播方向的夹角 φ 发生变化。当 NLC 的旋转角 $\varphi = 90^\circ$ 时，NLC 的相对介电常数张量为

$$\epsilon_r^{(NLC)} = \begin{pmatrix} n_o^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_e^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_o^2 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

选择 NLC E7 作为填充 PCF 的材料，将 NLC 通过虹吸效应填入中心孔。寻常折射率指数 n_o 和非寻常折射率指数 n_e 可通过扩展柯西模型^[12] 计算：

$$\begin{cases} n_o = A_o + \frac{B_o}{\lambda^2} + \frac{C_o}{\lambda^4} \\ n_e = A_e + \frac{B_e}{\lambda^2} + \frac{C_e}{\lambda^4} \end{cases}, \quad (7)$$

式中： $A_o, B_o, C_o, A_e, B_e, C_e$ 为模型的温度相关系数。

2.2 实验环境的建立

提出的双 D 型 SPR-PCF 传感器的实验装置如图 2 所示。实验装置包括光源、电压源、高压放大器、电极板、玻璃腔体、单模光纤、设计的 PCF、水浴加热装置、光谱分析仪和计算机。将双 D 型 PCF 连接在两段单模光纤之间，需要保证电极板覆盖设计的双 D 型 PCF 且具有足够的宽度以避免电极板边界效应的影响，确保所设计的 PCF 中的 NLC 被施加的电场相位调制。电压源产生的电压经高压放大器调谐施加到电极板上，设置的电场方向需要与 PCF 垂直，以确保旋转角正确产生。设计的 PCF 在外加电极板后需要置于玻璃腔体内再置于水浴加热装置中，这是为了避免水浴加热装置的水不够纯净导致装置被电极板加热，造成实验误差。宽带激光通过单模光纤注入传感器，传输光谱由光谱分析仪获取，得到的光谱由计算机分析。更改水浴加热装置设定的温度或 PCF 中填充的分析液，传输光谱会改变，用上述实验装置观察光谱损耗峰的移动，实现光纤传感性能的分析。

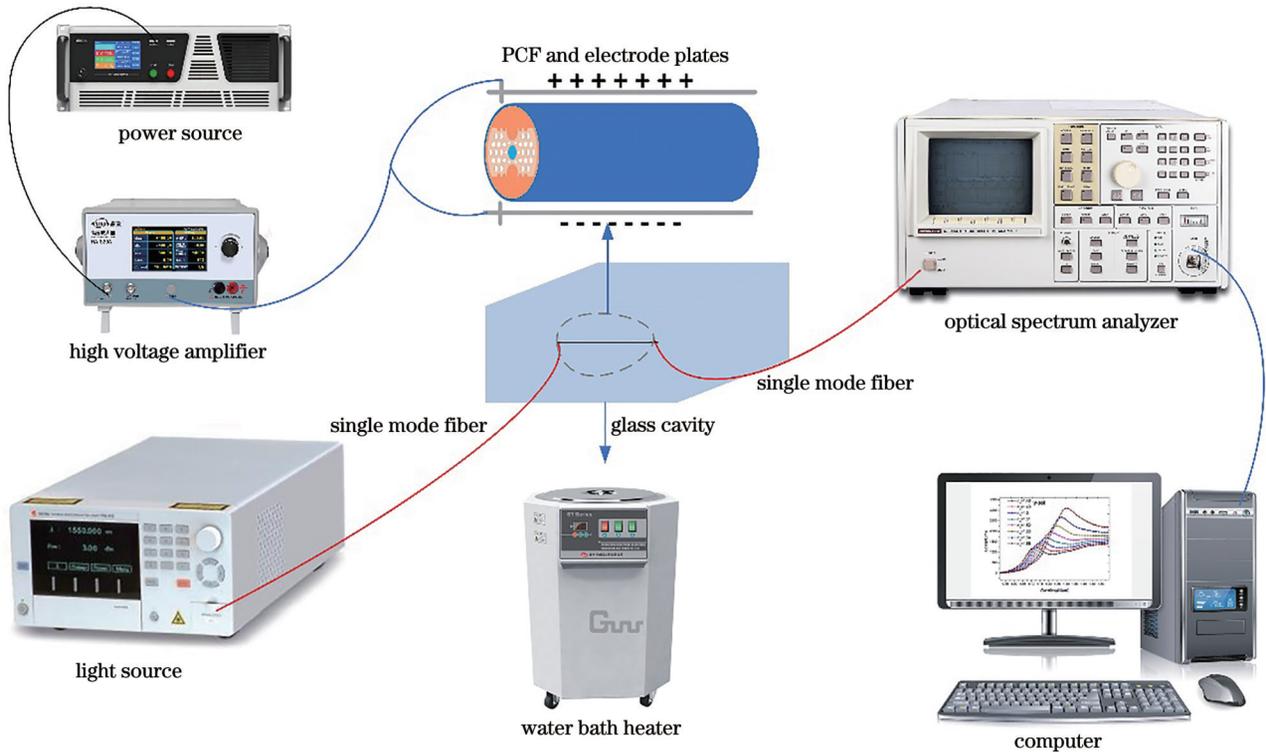


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental devices

2.3 传感性能参数

在传感器性能分析过程中,限制损耗是一个非常重要的参数指标,限制损耗的特性^[13]可以表示为

$$\alpha(x, y) = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}[n_{\text{eff}}] \times 10^6, \quad (8)$$

式中: λ 为输入波长; $\frac{2\pi}{\lambda}$ 为 λ 波长处自由空间的波数; $\text{Im}[n_{\text{eff}}]$ 为RI的虚部,它与限制损耗成正比。

传感器的灵敏度是指传感器对于被测量或监测物理量变化的响应程度。它表示了传感器输出信号相对于输入物理量变化的敏感程度。RI与温度的波长灵敏度分别表示为

$$\begin{cases} W_{S_n}(\lambda) = \frac{\Delta\lambda_{\text{peak}}}{\Delta n_a}, \\ W_{S_T}(\lambda) = \frac{\Delta\lambda_{\text{peak}}}{\Delta T_a}, \end{cases} \quad (9)$$

式中: $W_{S_n}(\lambda)$ 为RI灵敏度,单位为nm/RIU; $W_{S_T}(\lambda)$ 为温度灵敏度,单位为nm/°C; $\Delta\lambda_{\text{peak}}$ 为损耗峰共振波长(RW)的位移; Δn_a 为分析液RI的变化; ΔT_a 为环境温度的变化。

振幅灵敏度(AS)是一种简单且与波长无关的传感检测方法,其表达式^[14]为

$$\begin{cases} A_{S_n} = -\frac{1}{\alpha(\lambda, n_a)} \frac{\partial \alpha(\lambda, n_a)}{\partial n_a}, \\ A_{S_T} = -\frac{1}{\alpha(\lambda, T_a)} \frac{\partial \alpha(\lambda, T_a)}{\partial T_a}, \end{cases} \quad (10)$$

式中: A_{S_n} 和 A_{S_T} 分别为RI和温度变化对应的振幅灵敏度,单位为RIU⁻¹; $\alpha(\lambda, n_a)$ 是 n_a 处的限制损耗; $\partial \alpha(\lambda, n_a)$ 是两个 n_a 之间限制损耗的差值; $\alpha(\lambda, T_a)$ 是 T_a 处的限制损耗; $\partial \alpha(\lambda, T_a)$ 两个 T_a 之间限制损耗的差值。

分辨率(R)是指传感器能够区分和测量的最小变化量的能力。它通常以传感器输出的最小变化单位来表示。分辨率直接关系到传感器的测量精度。高分辨率的传感器能够捕捉到更小的变化,从而提供更准确的测量结果。为了确定检测程度,根据被分析物RI以及温度的变化,传感器的分辨率可以计算为

$$\begin{cases} R_n = (\Delta n_a \times \Delta \lambda_{\text{min}}) / (\Delta \lambda_{\text{peak}}) \\ R_T = (\Delta T_a \times \Delta \lambda_{\text{min}}) / (\Delta \lambda_{\text{peak}}), \end{cases} \quad (11)$$

式中: R_n 和 R_T 分别为RI和温度变化对应的传感器分辨率,单位为RIU; Δn_a 为分析物RI的变化量; ΔT_a 为温度的变化量; $\Delta \lambda_{\text{min}}$ 为最低光谱分辨率(取0.1 nm); $\Delta \lambda_{\text{peak}}$ 为损耗峰处共振波长的位移。

LOD检测限在环境监测、食品安全、药物分析等领域具有重要意义,它表示能够检测到分析物存在的最小浓度或数量。该光纤的检测限可表示为

$$L_{\text{OD}} = R / W_S, \quad (12)$$

式(10)中 L_{OD} 的单位为RIU²/nm

3 实验结果与讨论

当分析物RI值 $n_a=1.5$ 、温度 $T=25^\circ\text{C}$ 时,所设计PCF的 x 偏振与 y 偏振方向的核心模式的损耗谱如图3所示。设置分析物RI值 $n_a=1.5$ 、温度 $T=25^\circ\text{C}$ 的主要原因是:此时两种参数的值均处于检测范围的中间部分,对整体检测性能具有一定的代表性。另外,实验室内温度约为 25°C ,将温度设置在 $T=25^\circ\text{C}$ 更容易操作。

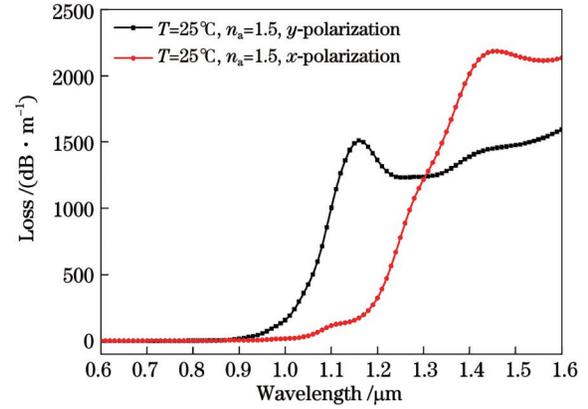


图3 x 偏振和 y 偏振方向核心模式的损耗

Fig. 3 Loss of core modes in x and y polarization directions

3.1 温度传感性能分析

由于填充了温敏材料液晶E7,PCF的温度传感特性将会大大改善。当分析物RI值 $n_a=1.5$ 时,将温度控制在 $15\sim 50^\circ\text{C}$,每次温度变化 5°C 。当温度从 15°C 升高到 50°C 时,核心模式的损耗与工作波长的关系如图4所示。可以看到,随着温度的升高,损耗峰峰值明显增加,损耗峰对应的共振波长红移。对应各温度的损耗值与共振波长的值如表1所示。

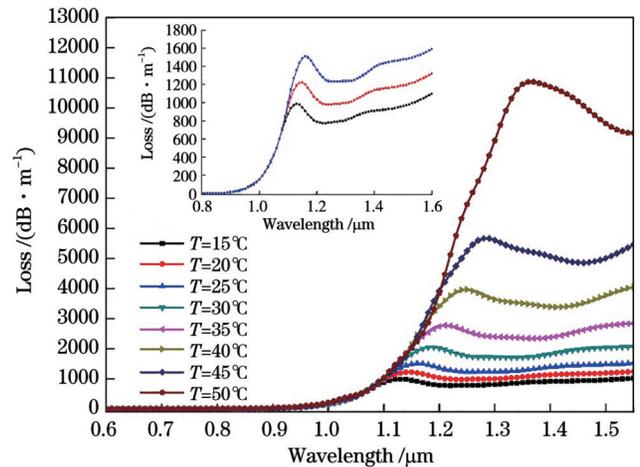


图4 不同温度下核心模式限制损耗与工作波长的关系

Fig. 4 Relationship between confinement loss of core mode and operating wavelength at different temperatures

表 1 各温度损耗值与共振波长值

Table 1 Temperature loss values and resonance wavelength values

Temperature / °C	15	20	25	30	35	40	45	50
Loss peak / (dB·m ⁻¹)	987.62	1222.70	1510.72	2049.16	2774.68	3963.81	5663.18	10865.95
Resonance wavelength / nm	1130	1150	1160	1190	1210	1250	1280	1370

由表 1 可知:温度的变化量 $\Delta T_a=5^\circ\text{C}$, $\Delta\lambda_{\text{peak}}$ 分别为 20、10、30、20、40、30、90 nm。液晶的寻常折射率指数和非寻常折射率指数由温度相关系数 (A_o 、 B_o 、 C_o 、 A_e 、 B_e 、 C_e) 决定,是一种非线性的温敏材料,在 45~50 °C 时折射率变化较大,导致共振波长有较大的移动,使温度检测灵敏度整体升高,线性度明显降低,分

段给出灵敏度有利于针对实际检测范围拟合灵敏度曲线,可以更准确地反映传感器在特定温度下的性能。利用 1.3 节中提出的公式分别针对 15~50 °C 进行二阶多项式拟合以及针对 25~45 °C 进行线性拟合,求得该 PCF 的各项温度传感性能如表 2 所示,对应的波长灵敏度及振幅灵敏度如图 5 所示。

表 2 各项温度传感性能

Table 2 Various temperature sensing performance

Temperature / °C	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50
WS / (nm·°C ⁻¹)	4	2	6	4	8	6	18
AS / (10 ⁻² RIU ⁻¹)	6.67	6.43	9.87	9.52	11.29	10.82	22.57
R / (10 ⁻² RIU)	2.500	5.000	1.670	2.500	1.250	1.670	0.556
LOD / (10 ⁻³ RIU ² ·nm ⁻¹)	6.2500	25.0000	2.7800	6.2500	1.5600	2.7800	0.3090

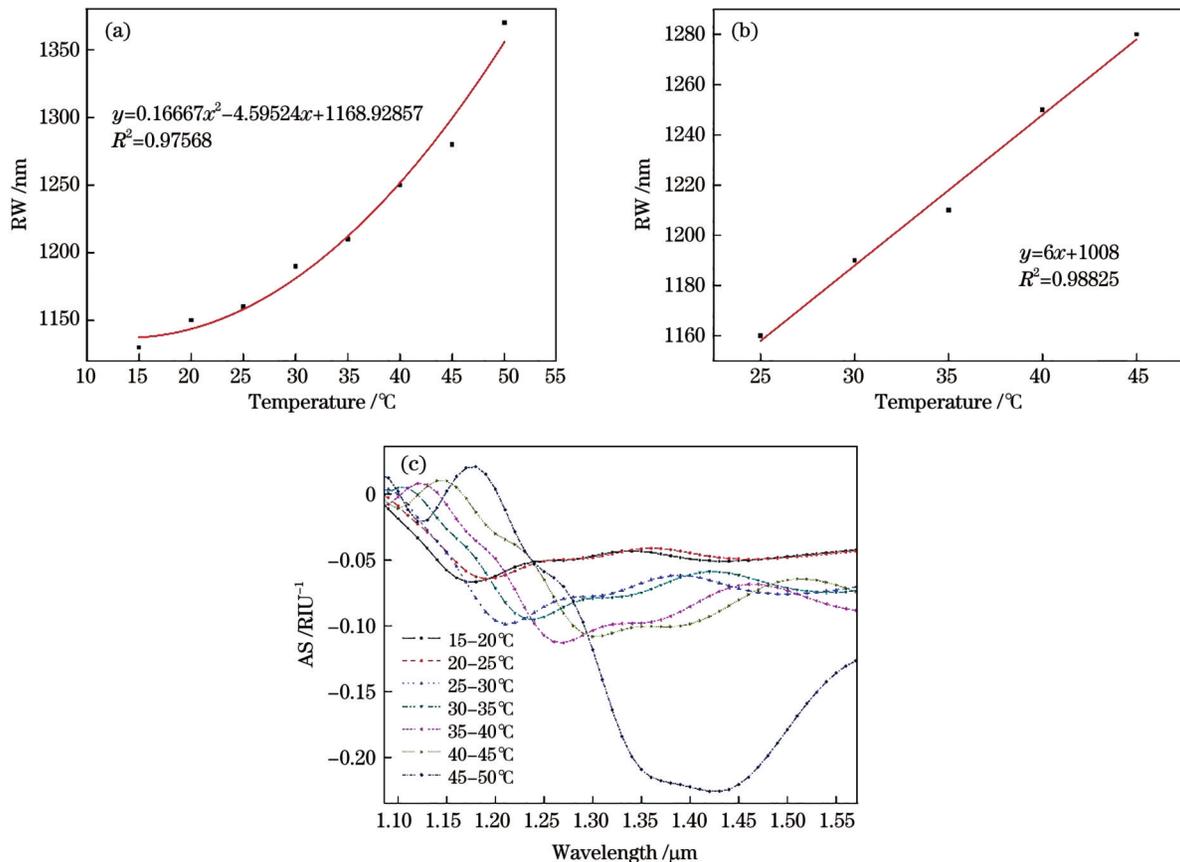


图 5 温度传感特性。(a) 15~50 °C 波长灵敏度的二阶多项式拟合;(b) 25~45 °C 范围内的波长灵敏度的线性拟合;(c) 15~50 °C 范围内的振幅灵敏度

Fig. 5 Temperature sensing characteristics. (a) Second-order polynomial fitting of wavelength sensitivity at range of 15-50 °C; (b) linear fitting of wavelength sensitivity at range of 25-45 °C; (c) amplitude sensitivity at range of 15-50 °C

由图5及表2可知,二阶多项式拟合的拟合常数为0.97568,温度灵敏度为拟合表达式的一阶导数,即 $y=0.33334x-4.59524$,在50℃时取得最高温度灵敏度12.07 nm/℃。25~45℃范围内 y 偏振线性拟合常数为0.98825,对应的平均温度灵敏度为6 nm/℃。该传感器在检测范围内的温度灵敏度较高且在45~50℃范围内有极高的灵敏度,可根据实际检测范围拟合需要的曲线,具有很高的实用价值。

3.2 RI 传感性能分析

将温度设置 $T=25\text{℃}$,分析物 RI 控制在 1.48~1.55,每次分析物 RI 变化 0.01。当分析物 RI 从 1.48 变化至 1.55 时,核心模式的损耗与工作波长的关系如图6所示。可以看到,随着分析物 RI 的增大,损耗峰峰值明显增加,损耗峰对应的共振波长红移。对应各分析物 RI 的损耗值与共振波长的值如表3所示。

由表3可知分析物 RI 的变化量 $\Delta n_a=0.01$, $\Delta\lambda_{\text{peak}}$ 分别为 20、20、30、20、30、30、30、30 nm。利用式(7)~

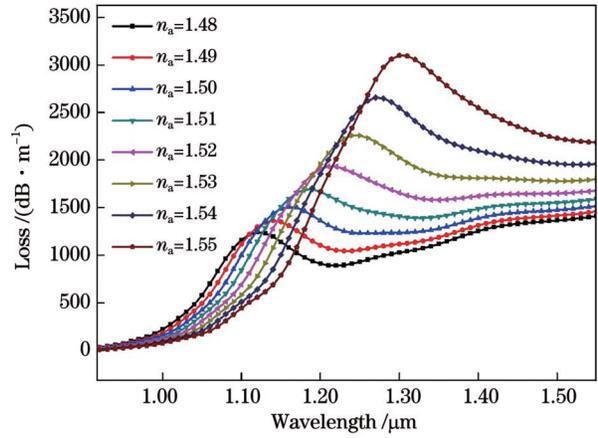


图6 不同RI时核心模式限制损耗与工作波长的关系
Fig.6 Relationship between core mode limiting loss and operating wavelength at different RI

(10)可求得该PCF的各项RI传感性能如表4所示,对应的平均波长灵敏度及振幅灵敏度如图7所示。

表3 各分析物RI损耗值与共振波长值

Table 3 RI loss value and resonance wavelength value of each analyte

RI	1.48	1.49	1.50	1.51	1.52	1.53	1.54	1.55
Loss peak/(dB·m ⁻¹)	1242.32	1364.72	1510.72	1691.69	1934.15	2258.10	2656.96	3099.03
RW /nm	1120	1140	1160	1190	1210	1240	1270	1300

表4 各项分析物RI传感性能

Table 4 Various RI sensing performance

RI	1.48-1.49	1.49-1.50	1.50-1.51	1.51-1.52	1.52-1.53	1.53-1.54	1.54-1.55
WS / (nm·℃ ⁻¹)	2000	2000	3000	2000	3000	3000	3000
AS / RIU ⁻¹	-22.85	-23.43	-23.85	-24.13	-24.54	-25.88	-27.91
R / (10 ⁻⁵ RIU)	5.00	5000.00	3.33	5000.00	3.33	3.33	3.33
LOD / (10 ⁻⁸ RIU ² ·nm ⁻¹)	2.50	2.50	1.11	2.50	1.11	1.11	1.11

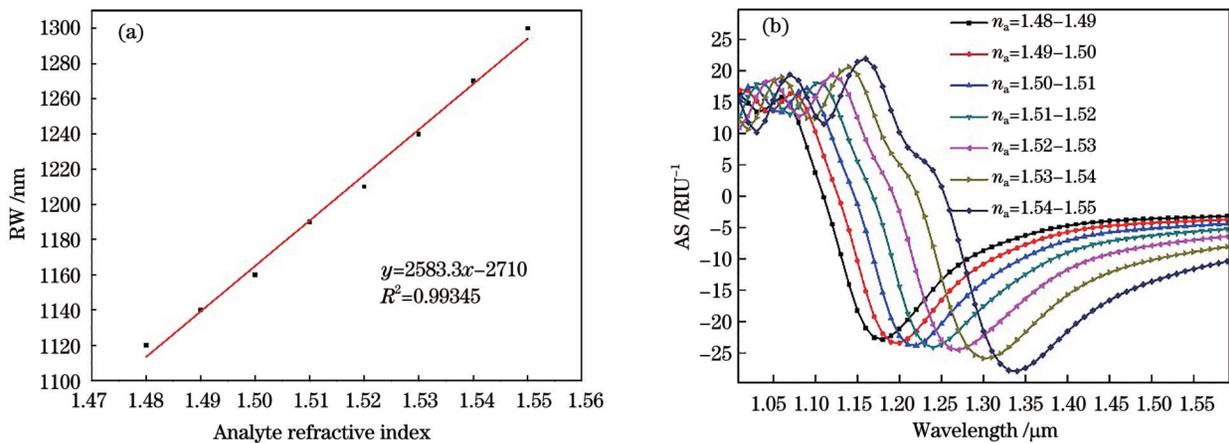


图7 RI在1.48~1.55范围内的波长灵敏度及振幅灵敏度。(a)波长灵敏度;(b)振幅灵敏度

Fig.7 Wavelength sensitivity and amplitude sensitivity within RI's range of 1.48-1.55. (a) Wavelength sensitivity; (b) amplitude sensitivity

由图 7 及表 4 可知, y 偏振的线性拟合常数为 0.99345, 对应的平均 RI 灵敏度为 2583.3 nm/RIU, 且在多个点位都具有 3000 nm/RIU 的最大 RI 灵敏度。该传感器在检测范围内呈高线性度, 表明该传感器的检测精度高, 在不同条件下能够提供可靠的测量结果, 并且更容易进行数据分析和校准。对于需要精确折射率测量的应用, 高线性度使得测量更容易实现, 便于实际应用。

3.3 实验参数调整

通过调节 PCF 周期性的气孔排列可以改变光纤横截面的折射率分布, 进而影响光纤的传输性能。本节分别研究了更改中央液晶孔直径 d_0 、小气孔直径 d_1 以及普通气孔直径 d_2 对光纤限制损耗谱和共振波长的影响, 以确定最佳的参数。

中央液晶孔直径 d_0 的大小影响着液晶纤芯与金属膜的距离, 改变 d_0 可能会在一定程度上造成较大的光传输损耗, 造成损耗谱的变形。图 8 显示了不同 d_0 大小对光纤限制损耗谱的影响。

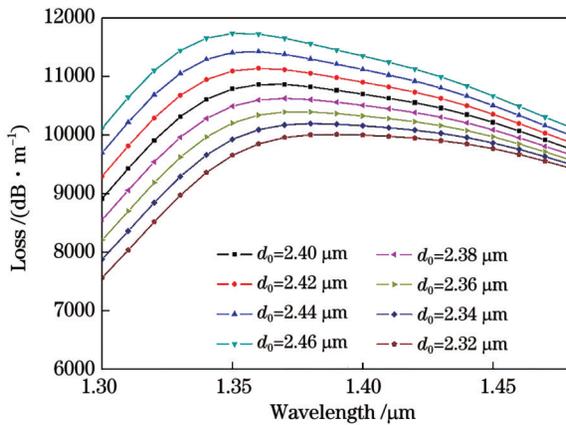


图 8 不同 d_0 大小对限制损耗的影响

Fig. 8 Influence of different d_0 on limiting loss

分别将中央液晶孔直径 d_0 的大小设置为 2.32~2.40 μm , 仿真结果表明, 随着 d_0 的增大, 共振峰蓝移, 共振峰值(损耗)增加。这表明更大的 d_0 有助于能量从光纤芯传递到金属上, 进而增强了 SPR 效应。减小 d_0 , 共振峰出现红移, 这有利于灵敏度的提高, 但随着 d_0 的减小, 损耗峰趋于平缓。过小的 d_0 值不利于检测结果的观测, 可能会导致在损耗峰的附近, 传感器的检测结果对外界变化不够敏感。微小的变化无法被有效地测量或分辨, 造成数据失真。故不再减小 d_0 的大小, 将 d_0 的大小设置为 2.32 μm 。

在 $d_0=2.32 \mu\text{m}$ 时进一步修改 d_2 以及 d_1 的大小。图 9 显示了不同 d_2 对光纤限制损耗的影响。通过调节 d_2 改变光纤的占空比, 进而影响光纤的损耗和色散。分别将 d_2 设置为 0.8~1.2 μm , 由图 9 观察到改变 d_2 的大小对损耗的影响较小, 且共振波长未产生移动(无灵敏度变化), 这是由于 SPR 现象产生的损耗峰主要取

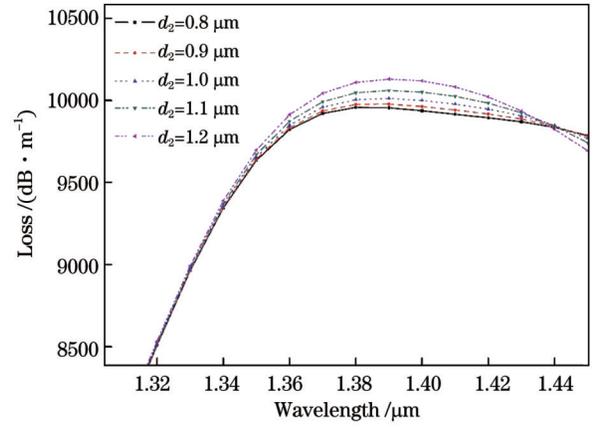


图 9 不同 d_2 对限制损耗的影响

Fig. 9 Influence of different d_2 on limiting loss

决于金属薄膜周围的介质, 普通气孔分布在光纤两侧, 这对损耗峰的影响较小。为了便于观测结果, 选择 $d_2=1.2 \mu\text{m}$ 。在 $d_0=2.32 \mu\text{m}$ 、 $d_2=1.2 \mu\text{m}$ 时继续修改 d_1 的大小。图 10 显示了不同 d_1 大小对光纤限制损耗的影响。

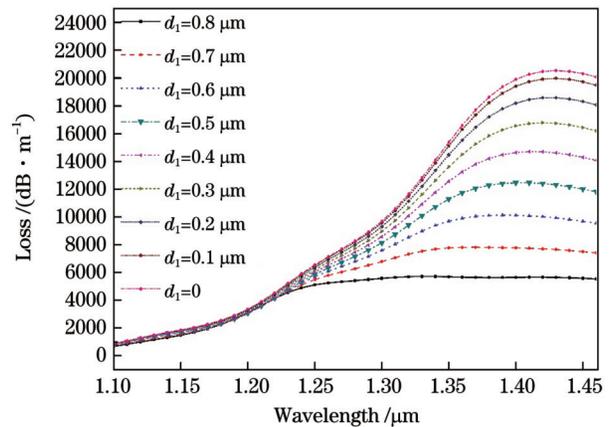


图 10 不同 d_1 对限制损耗的影响

Fig. 10 Influence of different d_1 on limiting loss

d_1 的大小影响着纤芯附近材料的占空比变化, 较低的占空比可能引入更多的散射和吸收, 从而增加传输损耗。相反, 较高的占空比可能导致更低的传输损耗。由图 10 可知 d_1 对于损耗影响较大, 且随着 d_1 的减小出现了损耗峰的红移。取最大损耗峰对应的 $d_1=0$, 即将小气孔完全去掉。计算了此时的温度及 RI 的波长灵敏度如图 11 所示。

由图 11 可知, 参数调整后的二阶多项式拟合的拟合常数为 0.99066, 温度灵敏度为 $y=0.35714x-4.05962$, 在 50 $^{\circ}\text{C}$ 时取得最高温度灵敏度 13.79 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。25~45 $^{\circ}\text{C}$ 范围内 y 偏振的线性拟合常数为 0.98539, 对应的平均温度灵敏度为 7.6 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。1.48~1.55 范围内 y 偏振的线性拟合常数为 0.98179, 对应的平均 RI 灵敏度为 2904.76 nm/RIU。在参数调整后该传感器的灵敏度得到进一步提高, 且具有良好的线

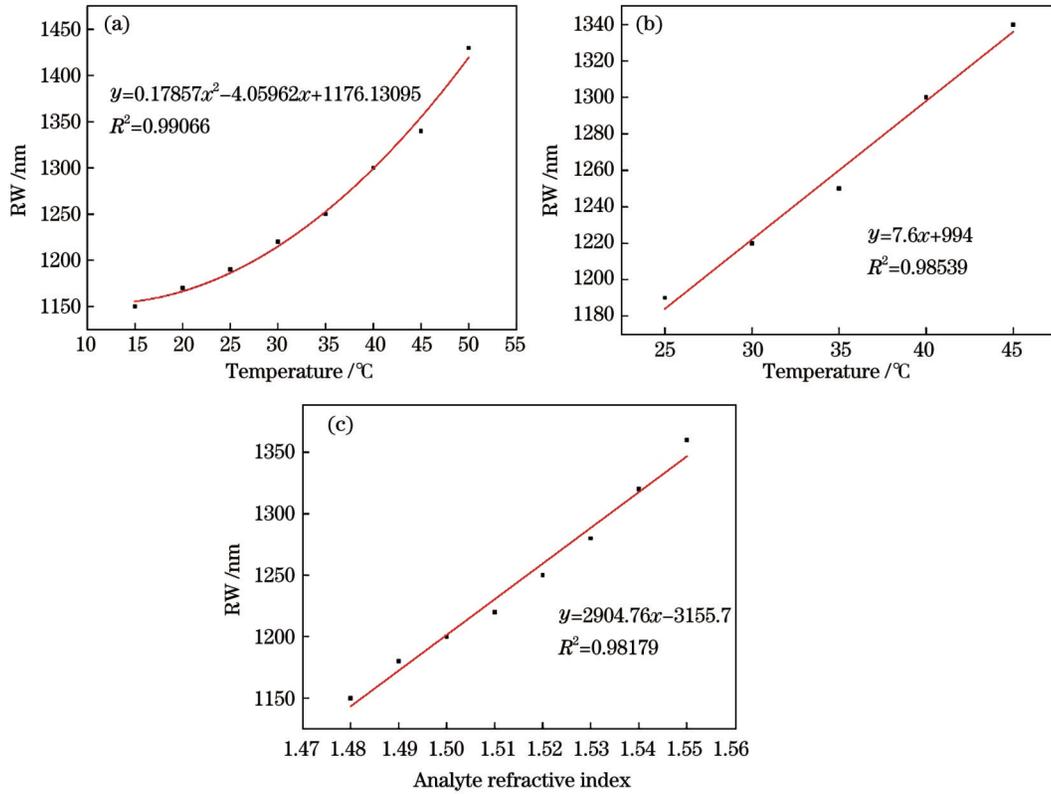


图 11 参数调整后的灵敏度特性。(a) 15~50 °C 波长灵敏度的二阶多项式拟合；(b) 25~45 °C 温度范围内波长灵敏度的线性拟合；(c) 1.48~1.55 RI 范围内波长灵敏度

Fig. 11 Sensitivity characteristics after parameter adjustment. (a) Second-order polynomial fitting of wavelength sensitivity within range of 15–50 °C; (b) linear fitting of wavelength sensitivity within range of 25–45 °C; (c) wavelength sensitivities within range of 1.48–1.55 of RI

性度。

3.4 结构及性能对比

将设计的 PCF 传感器与先前报道的温度及 RI 双参量光纤传感器在检测原理、设计结构、检测范围、波长灵敏度方面进行了比较,如表 5 所示。对比结果表

明所提出的双 D 型 SPR-PCF 传感器不仅能在非多检测原理及非多部件耦合的条件下实现温度和折射率的双参量传感,且比之前的研究具有更高的灵敏度,相对于不同部件耦合的双参量传感器具有更小的体积,便于实现光器件的集成。

表 5 与先前研究的温度及 RI 双参量传感器的性能对比

Table 5 Performance comparison of temperature and RI dual parameter sensors compared with previous studies

Detection principle and structure	Temperature detection range / °C	WS of temperature / (nm/°C)	RI detection range	WS of RI / (nm/RIU)	Reference
SPR, double-D-type	0–40	1.06	1.33–1.34	1371	[1]
MZI, thin core cone-shape	20–150	0.03363	1.339–1.355	–135	[2]
MZI-TFBG, D type	20–50	5.15	1.3300–1.3614	521.92	[3]
SPR	15–35	2	1.3333–1.3860	3381	[4]
SPR, D type	15–50	3.2	1.47–1.55	2567	[5]
SPR, multicore	20–60	–2.59	1.34–1.37	1644	[6]
SPR	30–50	5	1.33–1.34	3900	[15]
SPR, double-D-type	15–50	13.79 (max)			
	25–45	7.6	1.48–1.55	2904.7	This work

4 结 论

提出了一种可对温度和 RI 进行双参量检测的双

D 型液晶填充的 SPR-PCF 传感器,通过在中央大气孔中填充温敏材料液晶 E7 及两侧大开环接触的 RI 分析液,分别测量温度和 RI。改变环境温度及分析物 RI,

采用有限元法系统地研究了光纤的传输特性,并研究了中央液孔直径 d_0 、小气孔直径 d_1 及普通气孔直径 d_2 的大小对传感性能的影响。经过参数调整后,当检测温度在15~50℃范围内,最高温度灵敏度为13.79 nm/℃,对应的线性拟合常数为0.99066。所提传感器在25~45℃检测温度范围内具有良好的线性度,其平均温度灵敏度为7.6 nm/℃,对应的线性拟合常数为0.98539。当分析物RI为1.48~1.55时,平均RI灵敏度为2904.7 nm/RIU,对应的线性拟合常数为0.98179。

所设计的双D型SPR-PCF传感器在D型PCF的基础上进一步优化了检测性能,拥有较高的灵敏度,可实现环境温度和RI的分析物双参量检测,广泛应用于环境检测、医疗、生物化学等领域。

参 考 文 献

- [1] Zhang Y Y, Chen H L, Wang M Y, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature of seawater based on surface plasmon resonance in a dual D-type photonic crystal fiber[J]. *Materials Research Express*, 2021, 8(8): 085201.
- [2] 陈海林, 江超, 郭小珊, 等. 同时测量温度与折射率的细芯锥形光纤传感器[J]. *电子器件*, 2022, 45(1): 112-116.
Chen H L, Jiang C, Guo X S, et al. Thin-code tapering optical fiber sensor capable of simultaneously measuring temperature and refractive index[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2022, 45(1): 112-116.
- [3] Zhu F T, Hao X W, Zhang Y J, et al. D-shaped optic fiber temperature and refractive index sensor assisted by tilted fiber Bragg grating and PDMS film[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 346: 113870.
- [4] Meng X J, Zhao Y Y, Li J S, et al. High-performance plasmonic sensor based on photonic crystal fiber for refractive index and temperature sensing[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 122: 104036.
- [5] Fan Z K, Chu S C, Zhang X Q, et al. Two kinds of liquid crystal filled PCFs temperature and RI sensors based on SPR[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(6): 5766-5772.
- [6] Wang H R, Wu M Y, Zheng S C, et al. Surface plasmon resonance sensor based on seven-core photonic crystal fiber for refractive index and temperature measurement[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 164: 109511.
- [7] Yang X C, Lu Y, Liu B L, et al. Design of a tunable single-polarization photonic crystal fiber filter with silver-coated and liquid-filled air holes[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(4): 7105108.
- [8] 全锐杰, 王煜, 邢斌, 等. 基于表面等离子体共振的光纤海水温盐传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(11): 1106026.
Tong R J, Wang Y, Xing B, et al. Optical fiber seawater temperature and salinity sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(11): 1106026.
- [9] Azab M Y, Hameed M F O, Obayya S S A. Multi-functional optical sensor based on plasmonic photonic liquid crystal fibers [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, 49(2): 49.
- [10] Dominik M, Koba M, Bogdanowicz R, et al. Plasma-based deposition and processing techniques for optical fiber sensing [M]//Matias I R, Ikezawa S, Corres J. *Fiber optic sensors. Smart sensors, measurement and instrumentation*. Cham: Springer, 2017, 21: 95-114.
- [11] Velázquez-González J S, Monzón-Hernández D, Martínez-Piñón F, et al. Surface plasmon resonance-based optical fiber embedded in PDMS for temperature sensing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(2): 4601306.
- [12] Sun B, Huang Y J, Luo D, et al. Broadband thermo-optic switching effect based on liquid crystal infiltrated photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(4): 6802207.
- [13] Li J, Wu S T, Brugioni S, et al. Infrared refractive indices of liquid crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(7): 073501.
- [14] Liu C, Su W Q, Liu Q, et al. Symmetrical dual D-shape photonic crystal fibers for surface plasmon resonance sensing[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 9039-9049.
- [15] Luan N N, Wang R, Lü W H, et al. Surface plasmon resonance temperature sensor based on photonic crystal fibers randomly filled with silver nanowires[J]. *Sensors*, 2014, 14(9): 16035-16045.

Liquid Crystal-Filled Double-D-Type PCF Dual-Parameter Sensor Based on SPR

Fan Zhenkai*, Meng Junhao, Chu Shichao

School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China

Abstract

Objective The dual-parameter detection of temperature and refractive index (RI) plays a crucial role in various fields, which provides comprehensive information for facilitating real-time monitoring and control of diverse processes, thereby enhancing efficiency, quality, and reliability, particularly in such areas as medical diagnosis, industrial manufacturing, and food safety. Researchers have explored the implementation of dual-parameter sensing for temperature and RI based on the Mach-Zehnder interferometer (MZI) principle, where multiple optical fibers are fused. Some have proposed the integration

of MZI with tilted fiber Bragg gratings (TFBGs) for temperature and RI dual-parameter sensing. However, the relatively complex manufacturing and detection processes involved in these sensors pose challenges to practical production applications. Photonic crystal fiber (PCF) sensors feature real-time detection and strong interference resistance. By adjusting the periodic arrangement of air holes in the PCF, the RI distribution across the fiber's cross-section can be modified to influence the fiber's transmission characteristics. Different sensing functionalities can be achieved by filling the PCF with various advanced liquid materials. The surface plasmon resonance (SPR) phenomenon significantly enhances the sensitivity and detection range of PCF, among other sensing performances. We design a double-D-type SPR-PCF filled with liquid crystal E7 to enable dual-parameter sensing for temperature and RI. The double-D-type structure is designed to extend and further enhance the characteristics of the D-type structure, with a larger proportion of the fiber core close to the external environment for improving sensing performance.

Methods The internal air holes of the PCF are arranged in a hexagonal pattern. The central large hole is filled with the temperature sensitive material liquid crystal E7 to form the fiber core. The upper and lower sides of the PCF are polished, and gold films deposited on the large open loops on both sides enable SPR external sensing. Selective deposition of gold films on the second layer of air holes achieves SPR internal sensing, further enhancing the SPR effect and sensing performance. In the PCF, when the optical wave enters the metal film surface and forms the cladding material, total internal reflection occurs if the incident angle is greater than the critical angle. Along the direction parallel to the critical interface, evanescent waves are generated. When the real part of the surface plasmon polariton (SPP) wave propagating along the interface of the metal and analyte matches the phase-matching condition, the SPR phenomenon occurs. The energy of the incident light is absorbed by the free electrons on the metal surface, leading to a sharp intensity decrease in the reflected light, and a pronounced loss peak appears at the resonance wavelength. The loss peak generated by SPR is highly sensitive to changes in the external environment. Variations in the fiber core and cladding materials, metal film, and analyte can all cause the loss peak to shift. The shift detection in the loss peak allows for the RI and temperature measurement.

Results and Discussions When the RI of the analyte is set to 1.5, and the temperature increases from 15 °C to 50 °C, the relationship between the core mode loss and operating wavelength is calculated (Fig. 4). With the temperature elevation, the loss peak significantly increases, corresponding to a red shift in the resonance wavelength of the loss peak. The ordinary and extraordinary refractive indexes of the liquid crystal are determined by the temperature coefficients, making the crystal a nonlinear thermosensitive material. At temperatures of 45–50 °C, the refractive index undergoes substantial changes, leading to significant movement of the resonance wavelength. This overall increase in temperature detection sensitivity comes at the cost of reduced linearity. Sensitivity segmentation facilitates fitting sensitivity curves to the actual detection range, allowing for a more accurate reflection of the sensor's performance at specific temperatures. Second-order polynomial fitting from 15–50 °C and linear fitting from 25–45 °C are separately performed to obtain corresponding wavelength sensitivity and amplitude sensitivity (Fig. 5). The sensor exhibits higher temperature sensitivity within the detection range and exceptionally high sensitivity between 45 °C and 50 °C, thus providing practical significance by enabling the fitting of required curves within the actual detection range. By setting the temperature to $T=25$ °C, the relationship between core mode loss and operating wavelength is calculated when the RI of the analyte varies from 1.48 to 1.55 (Fig. 6) to obtain corresponding wavelength sensitivity and amplitude sensitivity (Fig. 7). By adjusting the periodic arrangement of air holes in the photonic crystal fiber (PCF), the RI distribution of the fiber cross-section can be altered, thereby affecting the fiber's transmission performance. The effects of varying the central liquid crystal hole diameter d_0 , small air hole diameter d_1 , and regular air hole diameter d_2 on the fiber's loss spectrum and resonance wavelength are studied separately (Figs. 8–10) to determine the optimal parameters. The sensor's sensitivity is further enhanced after parameter adjustment, with good linearity (Fig. 11). Following parameter adjustments, the sensor demonstrates a maximum temperature sensitivity of 13.79 nm/°C within the temperature range of 15–50 °C, with a corresponding linear fitting constant of 0.99066. In the temperature range of 25–45 °C, the sensor exhibits good linearity, with an average temperature sensitivity of 7.6 nm/°C and a corresponding linear fitting constant of 0.98539. For analyte RI in the range of 1.48–1.55, the average RI sensitivity is 2904.76 nm/RIU, with a corresponding linear fitting constant of 0.98179.

Conclusions We present a novel double-D-type liquid crystal filled SPR-PCF sensor enabling simultaneous detection of temperature and RI. The temperature and RI are measured by filling the temperature sensitive material liquid crystal E7 in the central large air hole and the RI analysis solution with large open loops contact on both sides. By varying the environmental temperature and analyte RI, the transmission characteristics of the optical fiber are systematically investigated by adopting the finite element method. The effects of the central liquid crystal hole diameter d_0 , small air hole diameter d_1 , and regular air hole diameter d_2 on sensor performance are studied. Following parameter adjustments, the sensor demonstrates a maximum temperature sensitivity of 13.79 nm/°C within the temperature range of 15–50 °C, with a

corresponding linear fitting constant of 0.99066. In the temperature range of 25–45 °C, the sensor exhibits good linearity, with an average temperature sensitivity of 7.6 nm/°C and a corresponding linear fitting constant of 0.98539. For analyte RI in the range of 1.48–1.55, the average RI sensitivity is 2904.7 nm/RIU, with a corresponding linear fitting constant of 0.98179. The designed double-D-type SPR-PCF sensor optimizes beyond the traditional D-type PCF and possesses enhanced sensitivity. Meanwhile, its capability for dual-parameter detection of environmental temperature and RI analyte brings the applicability to various fields such as environmental monitoring, healthcare, and biochemistry.

Key words sensors; photonic crystal fiber; surface plasmon resonance; dual-detection sensor; double-D-type; liquid crystal