

基于光子晶体光纤表面等离子体共振的温度和 磁场双参量传感器

李佳欢, 裴丽*, 王建帅, 吴良英, 宁提纲, 郑晶晶

北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 设计了一种光子晶体光纤(PCF)结构,基于新结构 PCF 和表面等离子体共振(SPR)效应实现了温度与磁场双参量传感。采用全矢量有限元方法对该传感器的理论模型进行了分析,结果表明,当温度在 20~50 °C 内时,传感器的温度灵敏度可达 -493.6 pm/°C;当磁感应强度在 20~300 Oe 内时,传感器的磁场灵敏度可达 82.69 pm/Oe。

关键词 传感器;光子晶体光纤;表面等离子体共振;磁流体;光纤传感;双参量传感

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0210002

Temperature and Magnetic Field Sensor Based on Photonic Crystal Fiber and Surface Plasmon Resonance

Li Jiahuan, Pei Li*, Wang Jianshuai, Wu Liangying, Ning Tiegang, Zheng Jingjing

Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract A novel photonic crystal fiber (PCF) structure is designed. A sensor based on the newly designed PCF and surface plasmon resonance (SPR) is proposed, which is applied to temperature and magnetic field detection. The theoretical model is analyzed by the full-vector finite element method. The results demonstrate that the temperature sensitivity is -493.6 pm/°C with temperature from 20 °C to 50 °C, and the magnetic field sensitivity is 82.69 pm/Oe with magnetic field from 20 Oe to 300 Oe.

Key words sensors; photonic crystal fiber; surface plasmon resonance; magnetic fluid; optical fiber sensing; dual parameter sensing

OCIS codes 280.4788; 240.6680; 260.5740; 240.6690

1 引言

磁流体(MF)既具有液体的流动性又具有固体磁性材料的磁性,同时具有折射率可调特性。而磁流体光学传感器因具有环境稳定性、空间分辨率高和小型化等诸多特性,而得到广泛关注^[1]。磁流体光学传感器主要有锥形光纤结构磁流体传感器^[2]、布拉格光纤光栅结构磁流体传感器^[3]、萨格纳克干涉磁流体传感器^[4]、级联结构磁流体传感器^[5]及马赫-曾德尔干涉集成化双参量传感器^[6]等,但基于以上结构的传感器具有灵敏度较低或器件尺寸较大等

缺点。光子晶体光纤(PCF)是近年来出现的一种新型光纤,具有截止波长单模传输、双折射效应及传输频带宽等特性,在光纤通信及光纤传感领域得到广泛应用与发展^[7-8]。表面等离子体共振(SPR)的吸收谱对周围电介质折射率的变化非常敏感,因可以感知周围环境属性的改变,SPR被广泛应用于传感领域^[9-11]。因此,PCF和SPR的结合在光学器件研究中发挥着重要作用。Li等^[12]提出一种基于PCF和SPR的窄带单偏振滤波器;Wang等^[13]提出一种基于PCF和SPR的温度传感器,灵敏度为1060.78 nm/RIU和4613.73 nm/RIU;童凯等^[14]提

收稿日期: 2018-10-08; 修回日期: 2018-11-07; 录用日期: 2018-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(61525501, 61827817)

* E-mail: lipei@bjtu.edu.cn

出了一种基于 TiO₂ 薄膜增强的 PCF-SPR 的生物传感器,其折射率灵敏度为 4200 nm/RIU;Ying 等^[15]提出了一种基于 SPR 原理的磁场传感器,角度灵敏度达到 0.612 °/mT,该传感器没有考虑温度干扰的问题。为了实现温度补偿,很多研究都采用具有高热光系数的乙醇作为介质材料,但是乙醇易泄露和挥发,而聚二甲基硅氧烷(PDMS)因具有高热光系数、较小的吸收损耗及较低的杨氏模量,被广泛地应用到可调器件和传感中^[16-17]。

本文提出了一种基于 PCF 和 SPR 的传感器结构,用于实现温度与磁场双参量传感测量。通过在 PCF 包层的上下第二层大孔径通道中涂覆 Au 薄膜,并分别填充 PDMS 和 MF,同时采用 Ta₂O₅ 调节 PDMS 通道的损耗谱,减小两个通道间的交叉干扰。由于两种样品折射率对温度和磁感应强度改变量的响应程度不同,在满足耦合条件时,两个通道的波峰峰值及共振波长会随温度和磁感应强度的偏移量不同而发生变化。通过敏感矩阵方法,可实现温度和磁场双参量传感测量。该传感器具有更高的磁场灵敏度,同时可有效解决磁场测量中温度的交叉敏感问题,具有较好的稳定性和较小的器件尺寸。

2 理论模型与工作原理

基于 PCF-SPR 的温度和磁场双参量传感器所采用的 PCF 的横截面如图 1 所示。通过在中心和包层引入不同大小的空气孔,形成空心光子晶体光纤(HC-PCF),波导模式主要集中在纤芯空气孔和包层第一层空气孔之间。PCF 采用管棒堆积方法制备,通过合理调控石墨炉的温度、送料速度和牵引速度等,可有效减小 PCF 的制作误差。其中,PCF 的中心空气孔、包层空气孔、通道 1(ch1)和通道 2(ch2)的直径及孔间距用 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 和 Λ 表示。PCF 包层的上下第二层空气孔与 y 偏振产生的 SPR 现象较左右方向三个空气孔与 y 偏振产生的 SPR 现象明显,因此在上下第二层空气孔中涂覆 Au 薄膜,并分别填充 PDMS 和 MF,填充 MF 的通道为通道 1,Au 层厚度表示为 t_{Au1} ,填充 PDMS 的通道为通道 2,Au 层厚度表示为 t_{Au2} 。同时,为了增大通道 1 与通道 2 的损耗峰间隔,避免通道 1 与通道 2 的交叉干扰,在通道 2 的 Au 薄膜外部涂敷 Ta₂O₅,Ta₂O₅ 层厚度表示为 t_{ao} 。

本研究提出的传感器结构中,光纤基底材料为 SiO₂,其热光系数和热膨胀系数分别为 $7.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 和 $5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$,折射率 n 与波长 λ 的关系

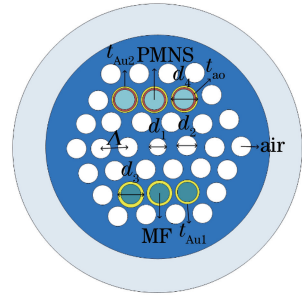


图 1 PCF 的横截面示意图

Fig. 1 Schematic of cross section of PCF

可通过 Sellmeier 色散模型定义,表达式为^[18-19]

$$n^2 = 1 + \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - (0.0684043)^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - (0.1162414)^2} + \frac{0.897479\lambda^2}{\lambda^2 - (9.896161)^2} \quad (1)$$

金属涂覆层 Au 的介电常数由 Drude 模型给出,同时考虑温度对 Au 薄膜介电常数和厚度的影响^[10]。Ta₂O₅ 作为高折射率电介质层,随着其厚度的增加,共振波长向长波长方向移动,同时损耗谱共振峰峰值增大,可以有效调节 y 偏振损耗谱^[20]。Ta₂O₅ 的热光系数为 $7.89 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ^[21],折射率的表达式^[17]为

$$n_{Ta_2O_5} = 1.88 + 178.4 \times 10^2/\lambda^2 + 52.7 \times 10^7/\lambda^4 \quad (2)$$

可以通过等离子体辅助磁控溅射沉积方法将金属涂覆层 Au 和 Ta₂O₅ 薄膜涂覆到空气孔壁。首先,使用干胶覆盖无需进行金属层涂覆的空气孔;然后,采用磁控溅射方法进行金属薄膜的涂覆,在涂覆过程中合理控制溅射时间实现均匀镀膜;最后,切除覆盖干胶的光纤尾端即可^[22]。

MF 作为一种新型的功能材料,具有许多独特的光学特性,尤其是其折射率随粒子的热能和磁场能发生改变,被广泛应用于磁场传感器中。本研究提出的传感器结构选用的 MF 材料是水基四氧化三铁样品,当 Fe₃O₄ 与水的体积比为 3% 时,MF 的热光系数是 $-2.4 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$,磁光系数是 $4.98 \times 10^{-5}/\text{Oe}$ ($1 \text{ Oe} \approx 79.578 \text{ A/m}$),初始折射率是 1.3592^[23]。通道 2 的填充材料为 PDMS (Sylgard 184),折射率由 Sellmeier 公式^[24]给出,热光系数是 $-4.5 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ ^[17]。MF 和 PDMS 可通过毛细作用填充到空气孔中,通过合理调配溶液配比和填充时间,可有效减小由敏感材料带来的误差。

SPR 是由表面等离子激元波 (SPW) 激发产生的,表面等离子激元 (SPP) 模与基模之间的耦合可以通过

耦合模理论进行分析。两模式耦合方程可表示为

$$\begin{cases} \frac{da_1(z)}{dz} = j\beta_1 a_1(z) + jK_{21} a_2(z) \\ \frac{da_2(z)}{dz} = jK_{12} a_1(z) + j\beta_2 a_2(z) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $a_i(z) = c_i(z) \exp(j\beta_i z)$, $i = (1, 2)$, 为两个模式的波动项, 包含模式的缓变包络项和迅变包络项; K_{ij} 表示耦合系数; β_i 表示传输常数。耦合系数只与模式场的横向分布有关, 而与 z 无关, 因此可以求出模式耦合方程的解, 表达式为

$$\begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \end{bmatrix} = \exp(j\beta z) \begin{bmatrix} u_1 & u_2 \\ -u_2^* & u_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(0) \\ a_2(0) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: $a_i(0)$ 表示入射光模式, 此处 $a_1(0) = a(0)$, 即由光源入射到光纤纤芯中的光模式, $a_2(0) = 0$;

$$u_1 = \cos(\gamma z) + j \frac{\Delta\beta}{2\gamma} = \sin(\gamma z), \quad u_2(z) =$$

$$j \frac{k}{z} \sin(\gamma z); \beta = \frac{1}{2}(\beta_1 + \beta_2), \Delta\beta = \frac{\beta_1 - \beta_2}{2}; \gamma =$$

$\sqrt{(\Delta\beta)^2 + |k|^2}$ 。通过分析可知, 当 $|\Delta\beta| \ll 1$ 时, 两个模式之间会发生耦合; 而当 $|\Delta\beta| = 0$ 时, 即 $K_{12} = K_{21} = k$, SPP 模与基模的传输常数满足匹配条件, 两种模式的有效折射率相等, 发生共振, 基模能量转移到 SPP 模式中, 表现为基模损耗曲线出现峰值。此时, 模式耦合方程的解可表示为

$$\begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \end{bmatrix} = \exp(j\beta z) \begin{bmatrix} \cos(kz) & \sin(kz) \\ \sin(kz) & \cos(kz) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(0) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

SPP 模式的有效折射率受外界电介质折射率变化的影响, 导致两模式满足波矢匹配条件时的波长发生变化, 即共振波长发生偏移。通过测量共振波长偏移量, 可以感知外界环境的改变。影响损耗大小的主要因素是限制损耗, 限制损耗与基模有效折射率虚部之间满足关系式^[18]:

$$L = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^4, \quad (6)$$

式中, L (单位: dB/cm) 为限制损耗, λ (单位: μm) 为波长, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 表示基模有效折射率虚部。传感器长度受到限制损耗的约束, 与限制损耗的平均值成反比, 即为 $1/\bar{L}$ 。

磁场和温度双参量传感测量可以通过测量两个通道共振波长的漂移量实现。在波长测量法中, 灵敏度的计算式可表示为

$$K_{\text{ch}}(T) = \Delta\lambda_{\text{ch}} / \Delta T, \quad (7)$$

$$K_{\text{ch}}(B) = \Delta\lambda_{\text{ch}} / \Delta B, \quad (8)$$

因此, 双参量传感的敏感矩阵可表示为

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\Delta\lambda_{1T}}{\Delta T} & \frac{\Delta\lambda_{1B}}{\Delta B} \\ \frac{\Delta\lambda_{2T}}{\Delta T} & \frac{\Delta\lambda_{2B}}{\Delta B} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & K_2 \\ K_3 & K_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta B \end{pmatrix}. \quad (9)$$

根据(9)式和矩阵与逆矩阵的关系, 可得到温度和磁感应强度的传感矩阵表达式:

$$\begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & K_2 \\ K_3 & K_4 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K'_1 & K'_2 \\ K'_3 & K'_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中: $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 分别表示通道 1 和通道 2 的共振波长偏移量; ΔT 和 ΔB 分别表示温度和磁感应强度的改变量; K_1 和 K_3 分别表示通道 1 和通道 2 的温度灵敏度; K_2 和 K_4 分别表示通道 1 和通道 2 的磁场灵敏度。

3 计算和分析

为获得优化的传感器性能, 首先分析 PCF 结构参数对传感器性能的影响, 优化 PCF 结构, 优化过程如图 2 所示。由图 2(a) 可知, 随着纤芯空气孔直径的增加, 损耗峰峰值增加; 由图 2(b) 和图 2(e) 可知, 随着包层空气孔直径和空气孔间距的增加损耗峰峰值减小; 图 2(c) 和图 2(d) 分别描述了通道 1 和通道 2 直径对传感器磁场灵敏度和温度灵敏度的影响。随着通道 1 直径的增加, 磁场灵敏度波动上升, 在通道 1 直径为 $1.6 \mu\text{m}$ 时, 磁场灵敏度最大为 82.69 pm/Oe ; 温度灵敏度随着通道 2 直径的增加而增大, 通道 2 直径为 $1.8 \mu\text{m}$ 时, 温度灵敏度最大为 $-493.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。通过对图 2(a)~(e) 分析可确定 PCF 的结构参数, 即 $d_1 = 0.8 \mu\text{m}$, $d_2 = 1.2 \mu\text{m}$, $d_3 = 1.6 \mu\text{m}$, $d_4 = 1.8 \mu\text{m}$ 和 $\Lambda = 2.4 \mu\text{m}$ 。在上述参数下传感器性能较优, 因此, 采用上述尺寸的 PCF 对该传感器进行传感器性能的讨论。

由于 SPW 对金属涂覆层厚度的变化敏感, 故在上述优化的 PCF 尺寸下, 分别讨论通道 1 和通道 2 金属涂覆层厚度对 y 偏振损耗谱的影响。如图 3 所示, 当通道 1 的 Au 层厚度由 30 nm 增至 50 nm 时, 相应通道的共振波长由 580 nm 增至 618 nm , 损耗峰值由 43.167 dB/cm 减少到 11.023 dB/cm 。即通道 1 的损耗峰值随着 Au 层厚度的增加而减小,

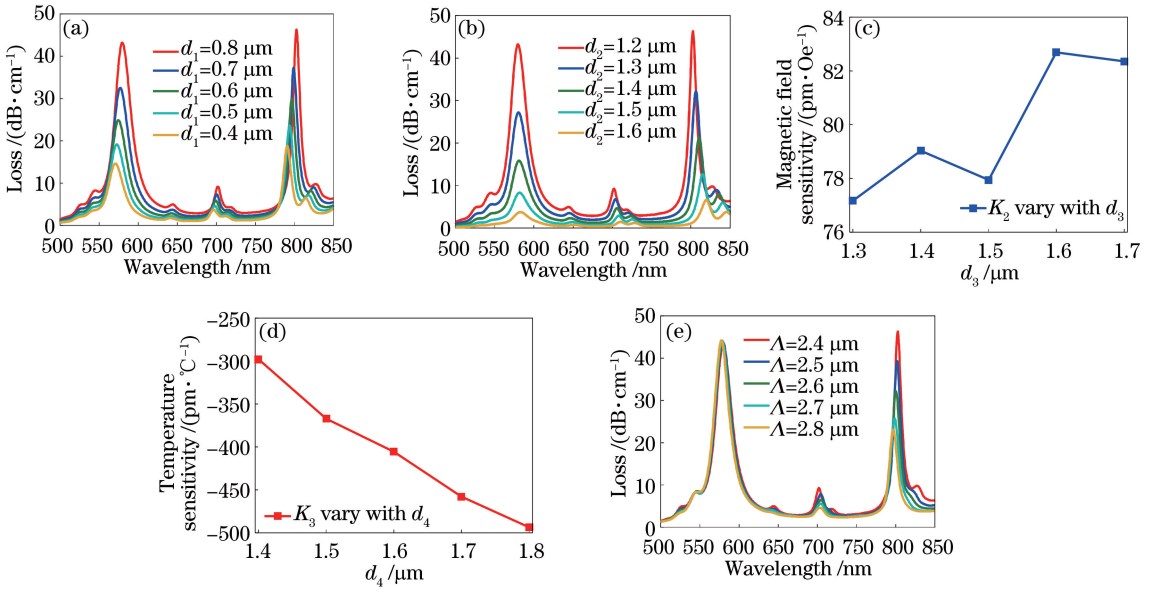


图2 传感器结构参数对其性能的影响。(a)纤芯空气孔直径 d_1 对损耗谱的影响;(b)包层空气孔直径 d_2 对损耗谱的影响;(c)通道1直径 d_3 对磁场灵敏度的影响;(d)通道2直径 d_4 对温度灵敏度的影响;(e)空气孔间距对损耗谱的影响
 Fig. 2 Influence of sensor structure parameters on its performance. (a) Influence of diameter of central hole d_1 on loss spectra; (b) influence of diameter of air hole d_2 in cladding on loss spectra; (c) influence of diameter of chl d_3 on magnetic field sensitivity; (d) influence of diameter of ch2 d_4 on temperature sensitivity; (e) influence of distance of air hole Δ on loss spectra

同时共振波长向长波长方向移动,而通道2的损耗峰值和共振波长基本不受通道1的Au层厚度影响。由于 $t_{Au1} = 30$ nm时损耗峰值最大且两个传感通道波长间距最大,所以通道1的Au层优化厚度为30 nm。

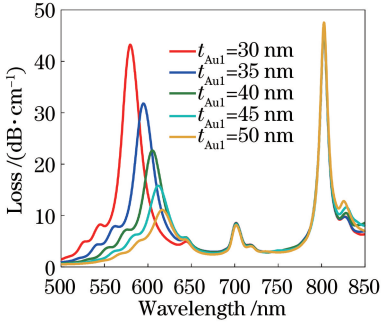


图3 通道1金属层厚度 t_{Au1} 对y偏振损耗曲线的影响
 Fig. 3 Influence of chl metal layer thickness t_{Au1} on y-polarized loss curve

如图4所示,当通道2的Au层厚度由30 nm增至50 nm时,相应通道的共振波长由777 nm增至853 nm,损耗峰值由61.7 dB/cm减小到24.68 dB/cm,即通道2损耗峰值随着Au层厚度的增加而减小,共振波长向长波长方向移动,而通道1损耗峰值和共振波长基本不受通道2的Au层厚度影响。通过对通道1和通道2的Au层厚度讨论,

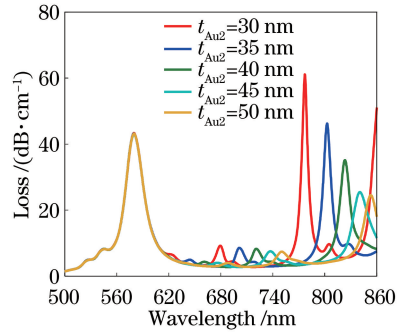


图4 通道2金属层厚度 t_{Au2} 对y偏振损耗曲线的影响
 Fig. 4 Influence of ch2 metal layer thickness t_{Au2} on y-polarized loss curve

再次印证了两个通道之间基本不存在交叉干扰。虽然 $t_{Au2} = 30$ nm时通道2损耗峰值达到最大,但是在500~850 nm之间即将出现下一个损耗峰,所以通道2的Au层优化厚度为35 nm。

由以上分析可知,电磁波在金属中以指数衰减规律传播,金属层越厚,电磁波在金属中传播能量衰减越大,到达金属与填充物界面的能量越小,激发的SPP模式减弱,SPP模式与基模的共振效应减弱,导致共振峰值减小。同时,激发的SPP模式与金属层厚度有关,随着金属层厚度的增加,SPP模式有效折射率发生改变,导致SPP模式与基模共振波长向长波长方向移动。

通道 2 中 Ta_2O_5 层厚度对 y 偏振损耗谱的影响如图 5 所示,当 Ta_2O_5 层厚度由 20 nm 增至 40 nm 时,通道 2 的共振波长由 724 nm 增至 803 nm,损耗峰值由 24.341 dB/cm 增加到 46.176 dB/cm,即损耗峰值随着 Ta_2O_5 层厚度的增加而增加,同时共振波长向长波长方向移动,而通道 1 的损耗峰值和共振波长基本不受影响。这主要由 Ta_2O_5 具有较高介电常数,随着 Ta_2O_5 厚度的增加,通道 2 的等效折射率增加引起。由于 $t_{ao} = 40$ nm 时,通道 2 的损耗峰值最大,同时远离通道 1 的损耗峰,所以 Ta_2O_5 膜层的优化厚度为 40 nm。

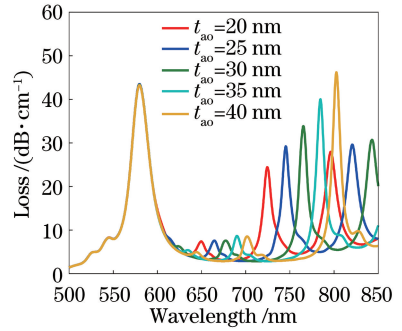


图 5 涂覆层 Ta_2O_5 厚度 t_{ao} 对 y 偏振损耗谱的影响
Fig. 5 Influence of Ta_2O_5 thickness t_{ao} on y -polarized loss curve

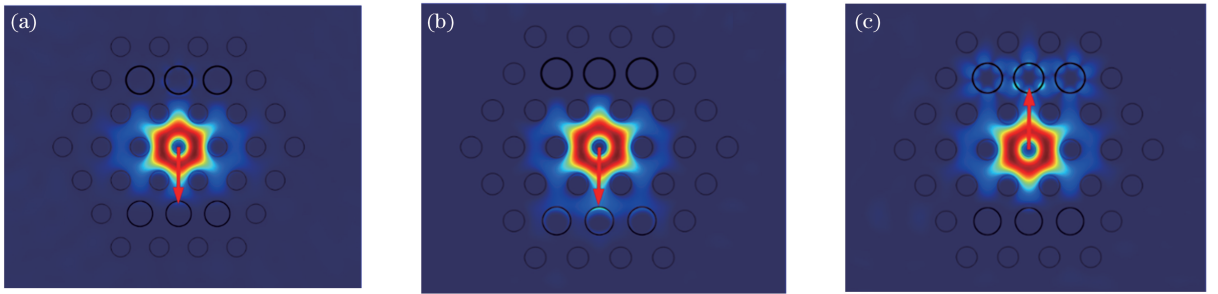


图 6 不同波长处 y 偏振模式的电场分布。(a) $\lambda = 735$ nm; (b) $\lambda = 580$ nm; (c) $\lambda = 803$ nm

Fig. 6 Electric field distributions of y polarization under different wavelengths.

(a) $\lambda = 735$ nm; (b) $\lambda = 580$ nm; (c) $\lambda = 803$ nm

在优化的传感器结构参数下,由器件长度与限制损耗的关系可知,传感器器件长度约为 5 mm,具有较小的器件尺寸。同时,在温度 $T = 20$ °C,磁感应强度 $B = 20$ Oe 的条件下, y 偏振模式的电场分布如图 6 所示。图 6(a)为波长 $\lambda = 735$ nm 时 y 偏振模式的电场分布。图 6(b)为 $\lambda = 580$ nm 时 y 偏振模式的电场分布,在该波长附近,基模与通道 1 激发的 SPP 模式发生耦合。图 6(c)为 $\lambda = 803$ nm 时 y 偏振模式的电场分布,在该波长附近,基模与通道 2 激发的 SPP 模式发生耦合。通过对比图 6 发现,图 6(a)中模场能量主要限制在纤芯,而图 6(b)和图 6(c)中模场能量除限制在纤芯外,还有少部分能量耦合到金属薄膜表面,即发生 SPR 效应。

y 偏振模式有效折射率实部 $Re(n_{eff})$,通道 1 和通道 2 激发的 SPP 模式有效折射率实部 $Re(n_{SPP-ch1})$ 和 $Re(n_{SPP-ch2})$ 以及通道 2 涂覆与不涂覆 Ta_2O_5 时 y 偏振损耗随波长的变化曲线如图 7 所示。通过对比通道 2 中涂覆 Ta_2O_5 与不涂覆 Ta_2O_5 两种情况下基模的损耗谱可知:当通道 2 没有涂覆 Ta_2O_5 时,在较小的波长范围内,有多个损耗峰,进行传感参量测量时,容易发生通道间的交叉干扰,影响测量结果;当涂覆 Ta_2O_5 时,损耗谱波形

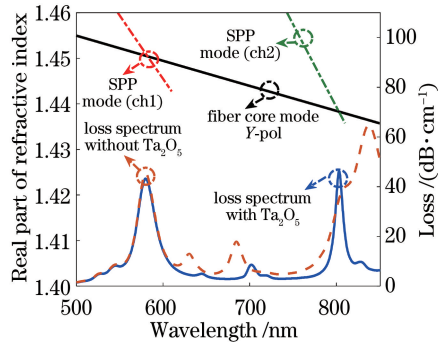


图 7 y 偏振模式和 SPP 模式的有效折射率实部随波长的变化及不同条件下的 y 偏振损耗谱

Fig. 7 Real part of effective refractive index of y -polarized mode and SPP mode, and y -polarized loss spectra under different conditions

得到调节,较为平滑,两个损耗峰距离较远,利于外界参量的测量。这主要是由于 Ta_2O_5 具有较高的介电常数,能有效地使通道 2 共振波长向长波长方向移动,同时增大共振峰值。当通道 2 中涂覆 Ta_2O_5 时,在 580 nm 附近 $Re(n_{SPP-ch1})$ 与 $Re(n_{eff})$ 相等,损耗达到极大值,出现第一个共振峰,在 803 nm 附近 $Re(n_{SPP-ch2})$ 与 $Re(n_{eff})$ 相等,损耗达到极大值,出现第二个共振峰。

当外界环境温度改变时,PDMS 和 MF 的折射率也会发生变化,因此,PCF-SPR 器件的损耗谱会随之改变,共振波长发生漂移。图 8(a)为不同温度下器件的损耗谱。由图 8(a)可知,通道 1 和通道 2 的共振峰值都随温度的增加而减小,同时共振波长向短波长方向移动。通道 1 和通道 2 的共

振波长偏移量随温度的变化如图 8(b)所示。通道 1 的线性拟合表达式为 $\Delta\lambda_1 = -0.3171T + 6.329$, 温度灵敏度为 $-317.1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 线性度达到 0.9996。通道 2 的线性拟合表达式为 $\Delta\lambda_2 = -0.4936T + 9.832$, 温度灵敏度为 $-493.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 线性度接近 1。

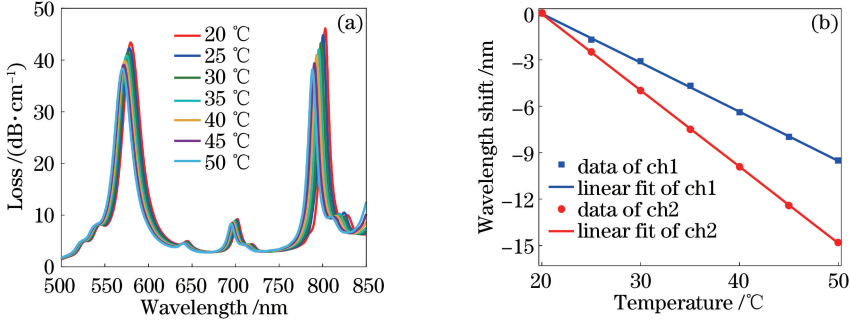


图 8 PCF-SPR 器件性能随温度的变化。(a)损耗谱;(b)共振波长偏移量

Fig. 8 Performance of PCF-SPR device as a function of temperature. (a) Loss spectra; (b) resonant wavelength shift

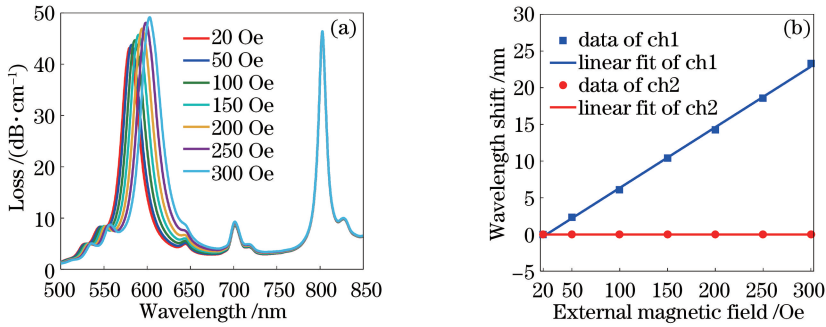


图 9 PCF-SPR 器件性能随磁感应强度的变化。(a)损耗谱;(b)共振波长偏移量

Fig. 9 Performance of PCF-SPR device as a function of magnetic induction intensity.

(a) Loss spectra; (b) resonant wavelength shift

当外界温度保持 20°C 不变时,器件的损耗随磁感应强度变化的曲线如图 9(a)所示。通道 1 的共振峰值随磁感应强度的增加而增加,同时共振波长向长波长方向移动,而通道 2 的共振峰不受磁感应强度的影响。磁感应强度与共振波长偏移量的线性拟合如图 9(b)所示,通道 1 的线性拟合表达式为 $\Delta\lambda_1 = 0.08269B - 1.926$, 磁场灵敏度为 $82.69 \text{ pm}/\text{Oe}$, 线性度达到 0.9990。通道 2 的共振波长与磁感应强度无关。

由以上分析可知,通过检测通道 1 和通道 2 的共振波长偏移量可以实现温度和磁感应强度的同时测量,通道 1 的温度灵敏度是 $-317.1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 磁场灵敏度是 $82.69 \text{ pm}/\text{Oe}$, 通道 2 的温度灵敏度是 $-493.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

将仿真分析所得灵敏度系数 K_1, K_2, K_3, K_4 带入(10)式,可得到温度和磁感应强度改变量与共振波长偏移量的关系矩阵:

将本研究提出的传感器性能与其他类型传感器性能比较,结果如表 1 所示,由此可知,提出的传感器不仅同时具有磁场和温度传感特性,更具有较高的磁场灵敏度和温度灵敏度,而且该传感器结构的器件尺寸更小,有利于光器件的集成。

另外,还分析了传感器的制作容差,由于通道 1 主要用于磁场传感,通道 2 主要用于温度补偿,因此,主要分析在制作容差下通道 1 的磁场灵敏度和通道 2 的温度灵敏度。设参数的容差为 $\Delta_i (i=1, 2, \dots, 8)$, 对应参数如表 2 所示,当传感器的制作容差 $\Delta_i = \pm 1.5\%$ 时,传感器仍可实现 $470 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 以上

$$\begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.3171 & 0.08269 \\ -0.4936 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -2.026 \\ 12.093 & -7.769 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

的温度灵敏度和 80 pm/Oe 以上的磁场灵敏度。由此可知,本研究提出的传感器具有较好的制作容差。

表 1 各类光纤传感器的性能比较

Table 1 Performance comparison of various optical fiber sensors

Sensor type	Magnetic field	Temperature	Length /cm
	sensitivity / (pm·Oe ⁻¹)	sensitivity / (pm·°C ⁻¹)	
Tapered optical fiber ^[2]	-7.17		1.0-1.5
MZI and FBG ^[3]	11	401.5	2.4
Sagnac loop ^[4]	8.23		78
SMS ^[5]	-16.86		1.2
MZI ^[6]	30.114	518.86	2.7
Proposed sensor	82.69	-493.6	0.5

表 2 传感器制作容差 $\Delta_i = \pm 1.5\%$ 时的灵敏度误差

Table 2 Sensitivity error of sensor with tolerance $\Delta_i = \pm 1.5\%$

Parameter	Δ_i	Difference of	Difference of
		temperature sensitivity of	magnetic field sensitivity of
		ch2 /	ch1 /
		(pm·°C ⁻¹)	(pm·Oe ⁻¹)
t_{Au1}	$\pm 1.5\%$		0.3/-0.11
t_{Au2}	$\pm 1.5\%$	0.4/-0.6	
t_{ao}	$\pm 1.5\%$	2.6/-17.4	
d_1	$\pm 1.5\%$	2.6/-2.4	0.63/-0.11
d_2	$\pm 1.5\%$	-2.4/2.6	0.63/-0.13
d_3	$\pm 1.5\%$		0.63/-0.13
d_4	$\pm 1.5\%$	-13.4/10.6	
Λ	$\pm 1.5\%$	0.6/15.6	0.26/3.16

4 结 论

提出了一种基于 PCF-SPR 的温度与磁场双参量传感器。采用耦合模理论和全矢量有限元方法对该理论模型进行分析。当无外加磁场、温度在 20~50 °C 范围内时,通道 1 和通道 2 的温度灵敏度分别是 -317.1 pm/°C 和 -493.6 pm/°C;当环境温度为 20 °C、磁感应强度在 20~300 Oe 范围内时,通道 1 和通道 2 的磁场灵敏度分别是 82.69 pm/Oe 和 0 pm/Oe。所设计的传感器结构原理简单,且有效地解决了磁感应强度测量中温度交叉敏感的问题。此外,该传感器不仅具有较高的磁场灵敏度,较小的器件尺寸(器件长度约为 5 mm),而且具有较好的制作容差,可以有效地应用于光器件集成和双参量传感领域。

参 考 文 献

[1] Zu P, Chan C C, Lew W S, *et al.* Temperature-

insensitive magnetic field sensor based on nanoparticle magnetic fluid and photonic crystal fiber [J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(2): 491-498.

[2] Layeghi A, Latifi H, Frazao O. Magnetic field sensor based on nonadiabatic tapered optical fiber with magnetic fluid[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(19): 1904-1907.

[3] Zhao Y, Cao Y, Tong Z R, *et al.* Simultaneous measurement of dual-parameter based on optical fiber magnetic field sensor [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(12): 1206004.

赵月, 曹晔, 童峥嵘, 等. 可双参量同时测量的光纤磁场传感器[J]. 光子学报, 2016, 45(12): 1206004.

[4] Lei X Q, Chen J J, Shi F Q, *et al.* Magnetic field fiber sensor based on the magneto-birefringence effect of magnetic fluid[J]. Optics Communications, 2016, 374: 76-79.

[5] Wang H T, Pu S L, Wang N, *et al.* Magnetic field sensing based on singlemode-multimode-singlemode fiber structures using magnetic fluids as cladding[J]. Optics Letters, 2013, 38(19): 3765-3768.

[6] Shen T, Sun B C, Feng Y. Mach-Zehnder interference all-fiber sensor for measurement of magnetic field and temperature [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(6): 1338-1345.

沈涛, 孙滨超, 冯月. 马赫-曾德尔干涉集成化的全光纤磁场与温度传感器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1338-1345.

[7] Du C, Wang Q, Zhao Y, *et al.* Highly sensitive temperature sensor based on an isopropanol-filled photonic crystal fiber long period grating[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 34: 12-15.

[8] Hu D J J, Ho H P. Recent advances in plasmonic photonic crystal fibers: design, fabrication and applications[J]. Advances in Optics and Photonics, 2017, 9(2): 257-314.

[9] Wei Y, Su Y D, Liu C L, *et al.* Micro-displacement optical fiber sensor based on surface plasmon resonance [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 040606.

魏勇, 苏于东, 刘春兰, 等. 基于表面等离子体共振的微粒移光纤传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 040606.

[10] Peng Y, Hou J, Huang Z H, *et al.* Temperature sensor based on surface plasmon resonance within selectively coated photonic crystal fiber[J]. Applied Optics, 2012, 51(26): 6361-6367.

[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] Li M Q, Peng L, Zhou G Y, *et al.* Design of photonic crystal fiber filter with narrow width and single-polarization based on surface plasmon resonance[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1-8.
- [13] Wang Y, Huang Q, Zhu W J, *et al.* Novel optical fiber SPR temperature sensor based on MMF-PCF-MMF structure and gold-PDMS film [J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1910-1917.
- [14] Tong K, Dang P, Wang M T, *et al.* Enhancement of sensitivity of photonic crystal fiber surface plasmon resonance biosensor using TiO₂ film [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0610002.
童凯, 党鹏, 汪梅婷, 等. 采用 TiO₂ 薄膜增强光子晶体光纤表面等离子体共振生物传感器灵敏度的建模分析[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0610002.
- [15] Ying Y, Zhao Y, Lv R Q, *et al.* Magnetic field measurement using surface plasmon resonance sensing technology combined with magnetic fluid photonic crystal [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(1): 170-176.
- [16] Hernández-Romano I, Monzón-Hernández D, Moreno-Hernández C, *et al.* Highly sensitive temperature sensor based on a polymer-coated microfiber interferometer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(24): 2591-2594.
- [17] Markos C, Vlachos K, Kakarantzas G. Bending loss and thermo-optic effect of a hybrid PDMS/silica photonic crystal fiber[J]. Optics Express, 2010, 18(23): 24344-24351.
- [18] Otupiri R, Akowuah E K, Haxha S. Multi-channel SPR biosensor based on PCF for multi-analyte sensing applications [J]. Optics Express, 2015, 23(12): 15716-15727.
- [19] Wang Q, Du C, Zhang J M, *et al.* Sensitivity-enhanced temperature sensor based on PDMS-coated long period fiber grating [J]. Optics Communications, 2016, 377: 89-93.
- [20] Takagi K, Watanabe K. Near infrared characterization of hetero-core optical fiber SPR sensors coated with Ta₂O₅ film and their applications [J]. Sensors, 2012, 12(2): 2208-2218.
- [21] Cheng W H, Chi S F, Chu A K. Effect of thermal stresses on temperature dependence of refractive index for Ta₂O₅ dielectric films [J]. Thin Solid Films, 1999, 347(1/2): 233-237.
- [22] Li B Y, Sheng Z C, Wu M, *et al.* Sensitive real-time monitoring of refractive indices and components using a microstructure optical fiber microfluidic sensor[J]. Optics Letters, 2018, 43(20): 5070-5073.
- [23] Zhao Y, Zhang Y Y, Wu D, *et al.* Magnetic field and temperature measurements with a magnetic fluid-filled photonic crystal fiber Bragg grating [J]. Instrumentation Science & Technology, 2013, 41(5): 463-472.
- [24] Schneider F, Draheim J, Kamberger R, *et al.* Process and material properties of polydimethylsiloxane (PDMS) for Optical MEMS [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 151(2): 95-99.