

高灵敏双参量光子晶体光纤传感器的实现方法*

叶 婷¹, 罗浩翔¹, 张克非^{2**}, 刘维光²

(1. 西南科技大学 理学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学 计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010)

摘 要:提出了一种D型光子晶体光纤磁流体双芯填充的磁场和温度双参量测量传感器结构。通过缩小第1层空气孔的中心两个孔,增强共振效果,提升灵敏度。引入磁流体填充双芯的磁感通道和乙醇填充的温敏通道,实现高灵敏度传感与双参量传感。结果表明,传感器温度在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,透射峰温敏度为 $1.239\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,线性度达0.995 7,损耗峰温度光谱灵敏度为 $2.514\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,线性度达0.997 17。外界磁场在 $10\text{ mT}\sim 30\text{ mT}$,透射峰磁场灵敏度为 $-3.799\text{ nm}/\text{mT}$,线性度达0.997 27,且温度的测量误差为1.135%,磁场的测量偏差为6.67%,具有灵敏度高、测量准确、结构紧凑及工艺简单等特点。该研究可进一步优化D型PCF-SPR(photonic crystal fiber based on surface plasmon resonance,基于表面等离子体共振的光子晶体光纤)双参量解调传感的设计。

关键词: 光纤光学;基于表面等离子体共振的光子晶体光纤传感器;双参量传感;Sagnac干涉;表面等离子体共振

中图分类号: TN253 文献标志码: A 文章编号: 1005-488X(2023)03-0248-07

Implementation of a Highly Sensitive Dual Parametric Photonic Crystal Fiber Optic Sensor

YE Ting, LUO Haoxiang, ZHANG Kefei, LIU Weiguang

(1. School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, CHN; 2. School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, CHN)

Abstract: A D-type photonic crystal fiber magnetic fluid double core filled magnetic field and temperature dual parameter measurement sensor structure was proposed. The resonance effect was enhanced and sensitivity was improved by narrowing the two holes in the center of the air hole in the first layer, the magnetic fluid-filled dual-core magnetic sensing channel and the ethanol-filled temperature-sensitive channel, which were introduced to achieve high-sensitivity sensing and dual-parameter sensing. The results showed that the sensor temperature was $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, the transmission peak temperature sensitivity was $1.239\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, and the linearity reached 0.995 7, while the loss peak tempera-

收稿日期: 2023-04-03

* 基金项目: 四川省高等教育人才培养质量和教学改革项目(JG2021-882)

作者简介: 叶 婷(2000—),女,主要从事光子晶体光纤及其传感器的研究;(E-mail:2291529337@qq.com)

罗浩翔(1998—),男,主要从事计算机优化算法的研究;(E-mail:1049702576@qq.com)

张克非(1970—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光通信及光子晶体光纤的研究。(E-mail:zhangkefeijike@163.com)

** 通讯作者

ture spectral sensitivity was 2.514 nm/°C, and the linearity reached 0.997 17. The external magnetic field was 10 mT~30 mT, the transmission peak magnetic field sensitivity was -3.799 nm/mT, the linearity was up to 0.997 27, and the temperature measurement error was 1.135%, the magnetic field measurement deviation was 6.67%, with high sensitivity, accurate measurement, compact structure and other features. This study could further optimize the design of D-type PCF-SPR dual-parameter demodulation sensor.

Key words: fiber optics; PCF-SPR sensor; dual-parameter sensing; Sagnac interference; surface plasmon resonance

引 言

光子晶体光纤(Photonic crystal fibers, PCF)是一种新型光纤,通过在纯石英材料上沿轴向方向周期性排列二维的孔洞或者掺杂物质构成。表面等离子体共振(Surface plasmon resonance, SPR)是指在一定的入射波长或入射角下,倏逝波与表面等离子体波会发生共振,从而在探测光谱上产生相应的共振吸收峰的一种现象。传统的SPR传感器一般体积庞大、结构复杂,无法进行远程检测。为了解决这一问题,许多光纤SPR传感器被陆续提出。其中,基于表面等离子体共振的光子晶体光纤(photonic crystal fiber based on surface plasmon resonance, PCF-SPR)传感器传输损耗小^[1-3],在SPR检测区间能保证电磁场的利用效率,检测装置简单,易于实现远距离、分布式实时检测等优点^[4-5],在SPR传感中得到了广泛研究与应用。

2015年,SHI等人^[6]设计出了一种可同时进行折射率和温度传感检测的D形光子晶体光纤传感器,该传感器具有较高的灵敏度。DASH^[7]提出了一种把氧化铟锡(indium tin oxide, ITO)涂附在抛光表面的高灵敏度侧面抛光双折射光子晶体光纤传感器。当氧化铟锡的最佳厚度为110 nm时,具有17 000 nm/RIU(refractive index unit)的最大波长灵敏度,分辨率为 5.8×10^{-6} RIU。2017年,SU^[8]提出了一种新型非对称PCF-SPR传感器,但该结构的折射率检测范围还有待进一步提升。同年,SANTOS^[9]提出了一种高灵敏度PCF-SPR传感器,其具有氮化钛涂层,在折射率为1.385~1.40的范围内,获得了10 000 nm/RIU高波长灵敏度。2018年,DASH^[10]提出了一种光子晶体光纤的表面等离子体共振磁场传感器,该传感器是基于侧面抛光的光子晶体光纤,该器件在弱磁场下的磁场灵敏度为564 pm/Oe。同年,WANG^[11]等人设计出了一种双谐振温度传感器,该传感器的温度灵敏度为

11.40 nm/°C。2019年,LI^[12]等人成功设计出了一种双参量传感光子晶体光纤结构,可实现温度与磁场双参量的测量。但仅在20~50 °C温度范围内时,传感器的温度灵敏度为-493.6 pm/°C;当磁感应强度在0~300 Oe内时,传感器的磁场灵敏度可达82.69 pm/Oe,其温度测量范围还有待进一步提升。2020年,LIU^[13]等人使用双面金结构为SPR激发提供了一种新的机制,使其传感特性显著增强,与单面金结构相比,平均灵敏度提高了50倍以上;Veerpal Kaur^[14]将氧化钛和氧化锌侧涂在PCF传感器上,以获得最大灵敏度;2020年,CHEN^[15]设计了一种可以同时实现双参量测量的PCF气体传感器,其温度灵敏度-0.115 nm/°C,磁场的灵敏度0.751 nm/mT,还有待进一步提高。

综上所述,当出现两种参量模式耦合时,上述PCF-SPR传感器难以消除两种参量交叉敏感性,无法满足实际生产。文中提出了一种D型磁流体双芯填充的光子晶体光纤传感器。在D型光子晶体光纤中引入3个大孔径孔,破坏光纤结构的对称性,使干涉效果增强;同时引入磁场传感通道和温度传感通道,最终实现高传感特性和双维参量检测的新PCF-SPR传感器的设计。

1 模型和理论分析

图1为PCF结构图。空气孔呈六边形排布,用 l 表示,在第2层空气孔和第4层空气孔的中间分别引入等大的两个大孔径空气孔和一个大孔径空气孔,用 c 表示。Sagnac光纤干涉是一种干涉现象,将光源发出的同一束光一分为二,让两束光在同一个环路内运动,但它们分别沿着完全相反的方向传输,在运动一周后会合,最后在屏幕上发生干涉^[16]。PCF纤芯基模的两个偏振方向(x 偏振、 y 偏振)可以作为Sagnac干涉的两束相干光源,故引入3个大孔径孔的目的就是使得纤芯不再对称,最终使纤芯 x

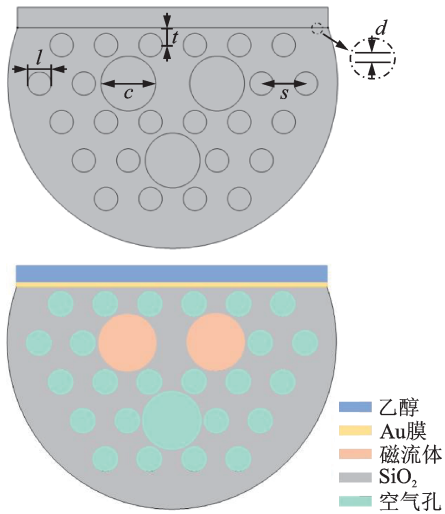


图1 D型 PCF-SPR 的温度和磁场双参量传感器模型

Fig.1 Temperature and magnetic field dual-parameter sensor model of D-type PCF-SPR

偏振与 y 偏振的有效折射率差增大,从而增强 Sagnac 干涉效果。通过改变外界环境物理量可引起两偏振模式的有效折射率之差发生相应的改变^[17],引起透射谱发生变化,通过透射峰的解析最终得到外界参量的变化。

在第2层的大空气孔中填充水基质量分数为 0.018 的 Fe_3O_4 磁流体。磁流体折射率受温度和磁场影响,磁流体折射率与温度和磁场的数量关系可以通过郎之万函数^[18]得到:

$$n(H, T) = (n_s - n_0) \left[\cosh\left(a \frac{H - H_c}{T}\right) - \frac{T}{H - H_c} \right] + n_0, H > H_c \quad (1)$$

式中, T 代表温度, H 代表磁流体的磁通量, n_0 代表临界磁场强度 H_c 下磁流体的折射率, n_s 代表磁流体折射率的饱和值, a 代表拟合参数。磁流体折射率随温度和磁场的改变而改变,同时会使纤芯基模两个偏振方向的有效折射率之差发生改变,最终纤芯两偏振模干涉所形成的透射峰也随之改变。而这种改变量 $\Delta\rho$ 可通过透射谱解析得到,表达式^[19]为:

$$H = \frac{1 - \cos(2\pi\Delta\rho L/\lambda)}{2} \quad (2)$$

其中, L 表示本模型中填充有磁流体的光纤长度, λ 是入射光的波长, $\Delta\rho = n_x - n_y$ 是模式相位差, n_x 和 n_y 分别表示纤芯 x 偏振方向和 y 偏振方向基模传播常数的实部。当 $\Delta\rho$ 满足式(3):

$$\frac{2\pi\Delta\rho L}{\lambda} = 2m\pi (m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots) \quad (3)$$

就会出现透射峰。

文中通过磁流体通道测量磁场和温度,再通过乙醇通道测量温度,最后通过双参量解调矩阵公式分别计算出磁场和温度,便可实现双参量传感。

先在 D 型光子晶体光纤上镀上金膜之后,再引入温敏材料组成温度传感通道,通道内用高热光系数的乙醇,乙醇折射率和温度的关系^[20]为:

$$n(\lambda) = 1.3605 - \beta(T - 20) \quad (4)$$

式中, $\beta = 3.94 \times 10^{-4}$ 是乙醇的温敏系数, T 为外界温度,此时纯石英材料影响可忽略不计,因该材料随温度变化而产生的影响较小^[21]。

在金属和介质的交界面处,金属中的许多自由电子引起共振^[22],即表面等离子体共振。光在全内反射时产生的倏逝波会使交界面自由电子发生相干振荡,这些电子振动会以密度起伏波动的形态显示出来,经量化后称为表面等离子体激元(Surface plasmon polariton, SPP)。当入射光耦合至金属层时,入射光会发生全反射,倏逝波会产生沿 x 轴方向上平行于金属层的波矢,即倏逝波的波矢 k_x ;同时倏逝波还会引起交界面处的自由电子发生相干振荡,并产生金属薄膜/环境介质表面等离子体波的波矢,即等离子体波矢 k_p ,当两者满足相位匹配条件时:

$$k_x = k_p \quad (5)$$

表面等离子体也会产生共振,即与 SPP 发生共振。此时,入射光的大部分动能就会传递至 SPP 上,使得全内反射的反射光光强大大减小,在透射谱中表现为峰值。为实现温度传感,加入乙醇温敏材料,因乙醇的折射率会随外界环境温度改变,而且 SPR 共振峰对折射率的改变较为敏感,即可通过改变外界环境温度,改变乙醇折射率,同时损耗峰随温度的改变发生移动,最终实现温度传感。

2 仿真分析

文中基于全矢量有限元理论,使用 COMSOL 软件构建结构模型,利用 MATLAB 软件计算所设计模型的有效折射率,分析各项结构数据之间作用机理关系,最终确定最佳参数。

2.1 传感器特性分析

选取温度 $T = 20^\circ\text{C}$ 和磁场强度 $B = 10 \text{ mT}$ 的环境条件,计算得到传感器特性分析图,如图 2 所示。图 2(a)中, x 偏振模式指的是电场箭头指向水平方向,而 y 偏振模式是电场箭头指向垂直方向。两个偏振模式的有效折射率都随波长的增大而减

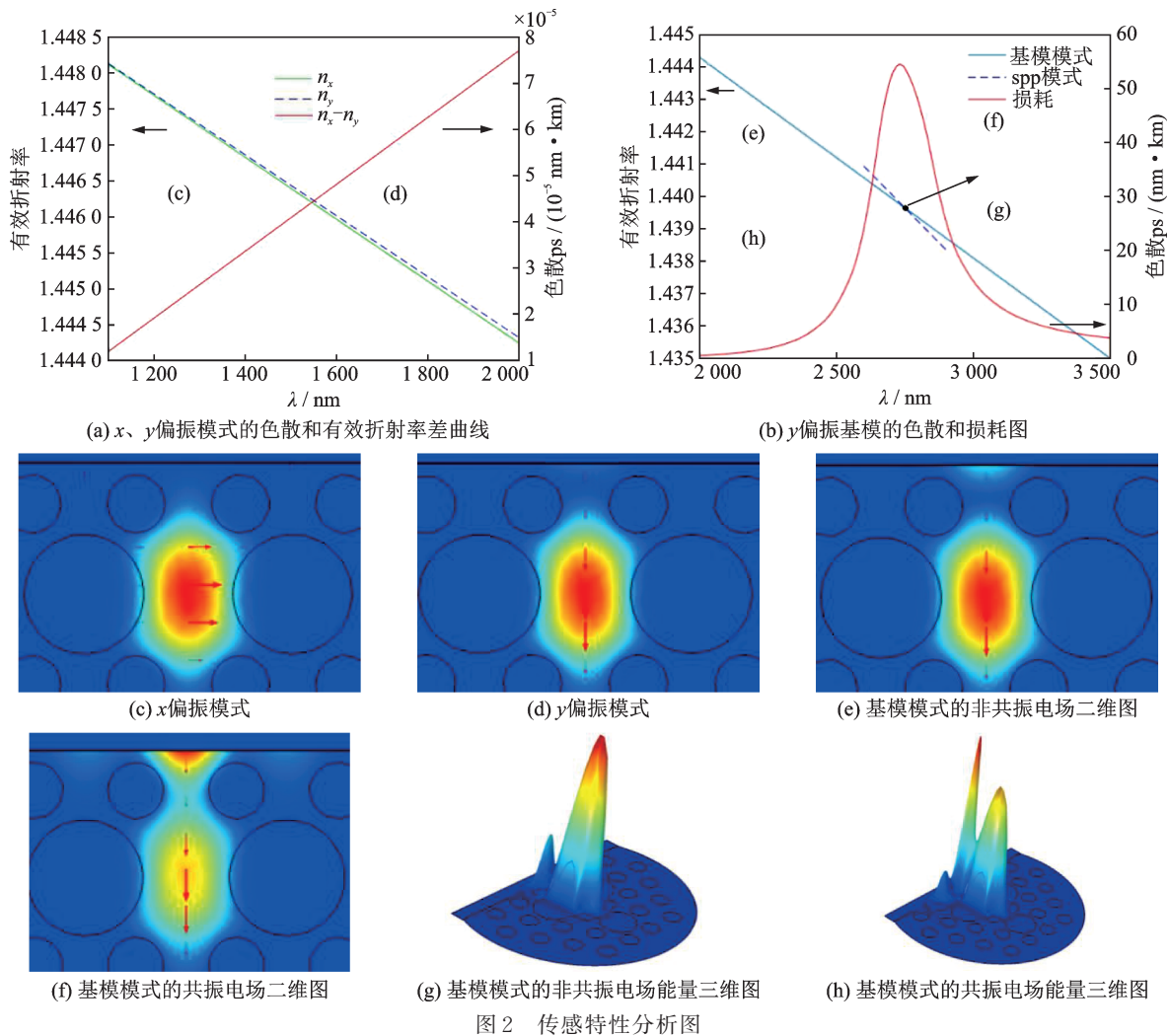


Fig.2 Analysis diagram of sensing characteristics

小,且随着波长的增加分离度越来越大,说明相位差 $\Delta p = n_x - n_y$ 越来越大,红色实线为相位差,其随着波长的增加而增加,当满足(3)式时就会在透射谱中产生透射峰。图2(b)中,蓝色实线为基模模式的色散图,虚线为SPP模式的色散图,都随着波长的增加而减小,当波长等于2 610 nm时,两色散曲线相交,此时产生损耗峰,满足相位匹配条件,即等离子体模式和基模模式有效折射率实部值相等。在共振点处有两张内插图2(f)、图2(h),分别代表基模模式的共振电场二维图和电场能量三维图,图2(e)、图2(g),分别代表基模模式的非共振电场二维图和电场能量三维图,在未达到共振之前,图2(c)中呈现基模能量较强,部分光泄漏至Au膜层,纤芯与金属/待测介质交界处并无明显的电磁场交叠,图2(g)图中在Au膜层出现较小的峰值,说明y偏振基模模式能量耦合至SPP模式较少。达到共振状态时,图2(f)、图2(h)图中,基模和SPP模式的电场有显著交叠,基模大部分能量泄漏到Au膜层,并呈现较高的能量峰值。

2.2 传感器的结构参数优化

PCF中的包层具有周期性空气孔,可调控入射光的传输和泄露,结构参数的取值会影响传感器的性能。保持外界温度为20℃,磁场为10 mT不变,为了得到该传感器的最优结构参数,作不同结构参数下透射谱的峰值位置随磁场强度的变化情况,如图3所示。通过斜率可计算出磁场传感灵敏度,通过线性拟合可对磁传感器的传感线性度进行分析。

从图中可以看出,在不同的结构参数下,磁场的传感灵敏度和线性度不同,传感灵敏度的提高可能会引起线性度变差,图3(d)中, $t = 11 \mu\text{m}$ 时传感灵敏度相对较高,但线性度变差,而线性度的提高导致传感灵敏度的降低,图3(a)中, $c = 10.8 \mu\text{m}$ 时,线性度较好,但传感灵敏度相对较低。在实际参数选取中,综合这两个指标,使它们达到相对的平衡点。文中结合实际和参考仿真数据选取优化结构 $c = 9.6 \mu\text{m}$ 、 $l = 4.6 \mu\text{m}$ 、 $s = 8.75 \mu\text{m}$ 、 $t = 11.0 \mu\text{m}$ 、 $d = 35 \text{nm}$ 。

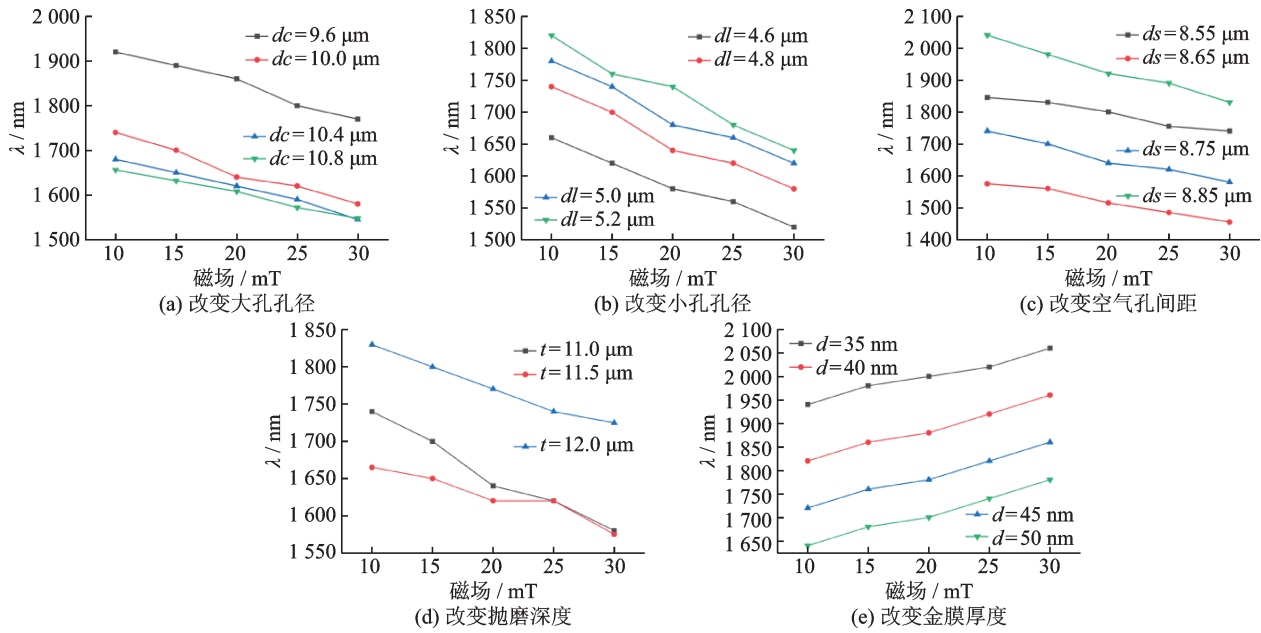


图 3 不同结构参数下峰值位置随磁场强度的变化

Fig 3 Peak position changes with magnetic field strength under different structural parameters

2.3 磁场和温度双参量传感特性分析

为研究该传感器的磁场和温度双参量解调传感机理及变化关系,画出基于 Sagnac 干涉原理的磁场和温度感透射谱和基于等离子体共振原理的磁场和温度传感损耗谱,如图 4 所示。

图 4(a)是在外界环境温度为 20 °C 下,磁场从

10 mT 到 30 mT 透射谱的变化,随磁场的变大,透射谱会均匀左移。磁场的逐渐增大会使得磁流体的折射率增加, n_x 和 n_y 也会随之增大,根据透射谱公式可得,相对波长减小,所以透射峰会向短波波长方向移动。(b)图是固定外界磁场为 10 mT 时,外界温度变化时,透射峰的变化情况。由图可得,随着温度的增加,透射谱近似均匀右移,因为随着温度

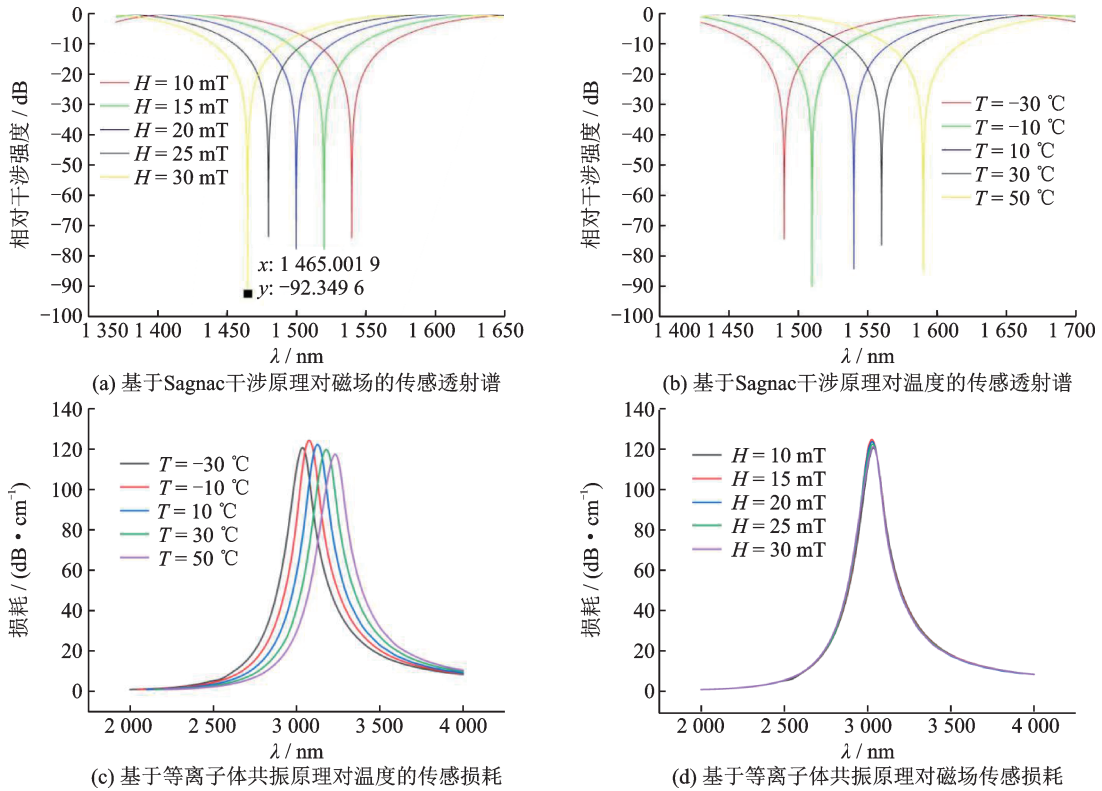


图 4 传感特性分析

Fig.4 Sensing characterization

增加磁流体折射率会减小,故透射峰位置的移动方向正好与磁场影响效果相反,两偏振模的有效折射率减小,使透射峰向长波方向移动。

图4(c)、4(d)是基于等离子体共振原理对磁场和温度的传感损耗谱。图4(c)中外界磁场为10 mT下,随着温度增加,损耗峰向右移,损耗值的大小无太大变化,而当固定外界环境为20 °C时,外界磁场发生变化,损耗峰几乎不会移动,如图4(d)所示,这是因为乙醇的折射率仅对温度敏感,而磁场对它的折射率变化几乎不会产生影响。磁场和温度的变化量可以用下式^[23]计算得到:

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_t \\ \Delta\lambda_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial\lambda_t}{\partial T} & \frac{\partial\lambda_t}{\partial B} \\ \frac{\partial\lambda_l}{\partial T} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & K_2 \\ K_3 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta B \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中, $\Delta\lambda_t$ 、 $\Delta\lambda_l$ 分别是透射谱和损耗谱移动的波长, $\frac{\partial\lambda_t}{\partial T}$ 和 $\frac{\partial\lambda_l}{\partial T}$ 分别是透射峰和损耗峰的温度灵敏系数, $\frac{\partial\lambda_t}{\partial B}$ 是磁场的灵敏系数,它们分别用 K_1 、 K_2 和 K_3 表示,它们的数值通过线性拟合得到,如图5所示。由图可知, $K_1=1.239 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, $K_2=-3.799 \text{ nm}/\text{mT}$, $K_3=2.514 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,通过求 K 系数矩阵的逆矩阵求得变化的温度和磁场,关系式为:

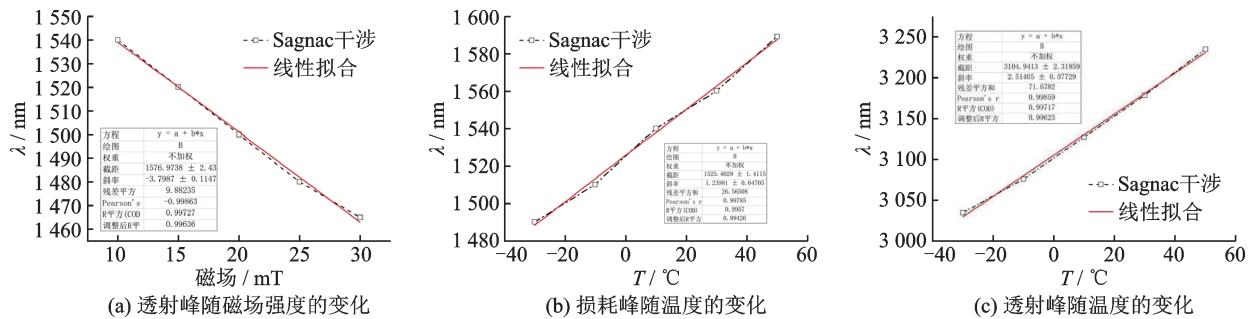


图5 透射峰和损耗峰随温度和磁场强度的变化

Fig.5 Changes of transmission peak and loss peak with temperature and magnetic field strength

$$\begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & K_2 \\ K_3 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta\lambda_t \\ \Delta\lambda_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0.398 \\ -0.263 & 0.130 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\lambda_t \\ \Delta\lambda_l \end{pmatrix} \quad (7)$$

如图(5)及图(6)所示,该传感器温度在-30 °C~50 °C,透射峰温度灵敏度为1.239 nm/°C,线性度达0.995 7;损耗峰温度光谱灵敏度为2.514 nm/°C,线性度达0.997 17。外界磁场在10 mT~30 mT,透射峰磁场灵敏度为-3.799 nm/mT,线性度达0.997 27。该传感器损耗峰峰值较大,半峰全宽为235 nm左右,半峰全宽值相对较小,损耗峰尖锐,检测峰值位置时精确,传感准确性较好。该传感器基于Sagnac干涉原理和表面等离子体共振原理实现了磁场与温度的双参量传感,避免了传统传感器中交叉传感的问题,且温度的测量误差为1.135%,磁场的测量误差为6.67%。

3 讨论与展望

近年来PCF因其优良的性能备受青睐,并得到了广泛应用,其中PCF-SPR传感器是一重要应用。文中为解决目前PCF-SPR传感器多维参量检测研究少等问题,基于Sagnac干涉原理和表面等离子体共振原理提出了一种可实现多维参量检测的D型光子晶体光纤传感器,通过引入三个大孔径孔空气孔、磁场传感器通道和温度传感通道,再使用数学公式进行计算,利用仿真软件COMSOL,在光子晶

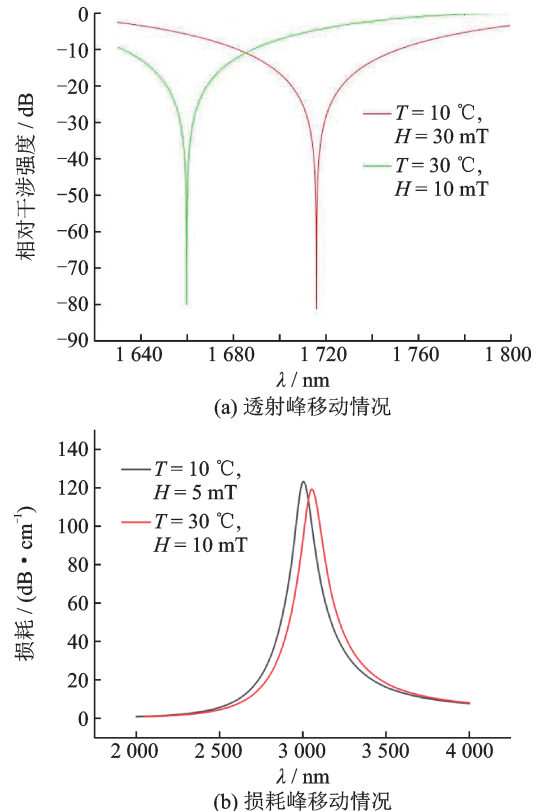


图6 两种环境状态下透射峰和损耗峰的变化

Fig.6 Changes of transmission peak and loss peak under two environmental conditions

体光纤领域进行仿真验证,通过添加完美匹配层(PML)作为边界条件,求解获得PCF-SPR模型在设

定波长下不同模式的有效折射率和模场分布图,分析纤芯导模与表面等离子体模之间的耦合,进行参数化扫描,求解得到 PCF-SPR 损耗谱,完成参数优化,最终实现磁流体双芯填充的磁场和温度双参量测量。但在实际工艺中对传感器进行封装时,需保证磁流体均匀地填充于传感结构中,要综合考虑传感器结构尺寸与灵敏度。若传感器结构尺寸过小,则封装胶水将影响传感区域,削弱其灵敏度;若传感器结构尺寸过大,则无法体现其尺寸小的优势。同时磁流体双芯填充的磁场和温度双参量测量传感器的制作工艺复杂,其灵敏度高,但是实现困难,目前使用如紫外线可擦除聚合物手动粘合法、飞秒激光微加工法、氢氟酸的侧向腐蚀结合石蜡法等^[24]方法制备,复杂的几何结构和工艺复杂等问题限制了 PCF-SPR 传感器的发展,解决 PCF-SPR 传感器制备难的问题仍将是 PCF-SPR 传感器研究领域的重点。

4 结 论

文章基于 Sagnac 干涉原理和表面等离子体共振原理提出了一种 D 型光子晶体光纤磁流体双芯填充的磁场和温度双参量测量传感器,通过引入三个大孔径空气孔,破坏光纤结构的对称性,增大 x 偏振与 y 偏振的相位差,增强干涉效果,获得更高的灵敏度,同时引入磁场传感器通道和温度传感通道,使用双参量解调矩阵公式分别计算出磁场和温度。仿真结果表明:该传感器在温度 $-30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,外界磁场为 10 mT 时,透射峰温度灵敏度为 $1.239\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,损耗峰温度光谱灵敏度为 $2.514\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。当环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,外界磁场在 10 mT \sim 30 mT,透射峰磁场灵敏度为 $-3.799\text{ nm}/\text{mT}$ 。研究为 D 型 PCF-SPR 双参量解调传感设计提供了解决思路,有效解决了传统传感器的交叉敏感问题,且设计出的传感器具有灵敏度较高、准确度较高等特点,能够有效地应用于光器件集成和双参量传感领域。

参 考 文 献

- [1] 吕欢祝,余明芯,钟文博,等.大模场低损耗光子晶体光纤的研究与设计[J].激光技术,2021,45(2):196-201.
- [2] 苏魏全.PCF-SPR传感器的设计优化及传感特性研究[D].大庆:东北石油大学,2019.
- [3] 刘美佟.基于表面等离子体共振的光子晶体光纤传感器研究[D].长春:吉林大学,2019.
- [4] 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.
- [5] Gao D, Guan C, Wen Y, et al. Multi-hole fiber based surface plasmon resonance sensor operated at near-infrared wavelengths [J]. Optics Communications, 2014, 313:94-98.
- [6] 施伟华,尤承杰,吴静.基于表面等离子体共振和定向耦合的 D 形光子晶体光纤折射率和温度传感器[J].物理学报,2015,64(22):282-287.
- [7] Dash J N, Jha R. Highly sensitive side-polished birefringent PCF-based SPR sensor in near IR [J]. Plasmonics, 2016, 11 (6):1505-1509.
- [8] 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.
- [9] Santos D F, Guerreiro A, Baptista J M. SPR optimization using metamaterials in a D-type PCF refractive index sensor [J]. Optical Fiber Technology, 2017, 33(1):83-88.
- [10] Dash J N, Das R. SPR based magnetic-field sensing in micro-channelled PCF: A numerical approach [J]. Journal of Optics, 2018, 20(11):1342-1346.
- [11] 王晴,丁毅,谭策,等.液体填充光子晶体光纤长周期光栅双谐振温度传感器的设计与优化[J].量子光学学报,2018,24(1):84-92.
- [12] 李佳欢,裴丽,王建帅,等.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[J].中国激光,2019,46(2):251-258.
- [13] Wei Liu, Hu Chunjie, Lei Zhou, et al. Ultra-sensitive hexagonal PCF-SPR sensor with a broad detection range [J]. Journal of Modern Optics, 2020, 67(20):1545-1554.
- [14] Kaur Veerpal, Singh Surinder. Design of D-shaped PCF-SPR sensor with dual coating of ITO and ZnO conducting metal oxide [J]. Optik, 2020, 220:1-9.
- [15] 陈灿灿.光子晶体光纤非线性光学特性及其传感应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
- [16] Shi Min, Li Shuguang, Chen Hailiang. A high-sensitivity temperature sensor based on Sagnac interferometer employing photonic crystal fiber fully filled with ethanol [J]. Applied Physics B, 2018, 124(6):1-7.
- [17] Yang X C, Lu Y, Wang M T, et al. A photonic crystal fiber-glucose sensor filled with silver nanowires [J]. Communications Optics, 2016, 359:279-284.
- [18] Gao D, Guan C, Wen Y, et al. Multi-hole fiber based surface plasmon resonance sensor operated at infrared wavelengths [J]. Optics Communications, 2014, 313:94-98.
- [19] Wang Famei, Liu Chao, Sun Zhijie, et al. A highly sensitive SPR sensors based on two parallel PCFs for low refractive index detection [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(4):1-10.
- [20] Liu C, Su W, Wang F, et al. Theoretical assessment of a highly sensitive photonic crystal fibre based on surface plasmon resonance sensor operating in the near-infrared wavelength [J]. Journal of Modern Optics, 2019, 66(1):1-6.
- [21] 李宏伟.D型光子晶体光纤表面等离子体传感机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [22] 魏方皓,张祥军,唐守锋.基于表面等离子体共振的光子晶体光纤折射率传感器的设计与分析[J].半导体光电,2020,41(1):35-38+43.
- [23] Wang Shun, Li Sh G. Surface plasmon resonance sensor based on symmetrical side-polished dual-core photonic crystal fiber [J]. Optical Fiber Technology, 2019, 51:96-100.
- [24] 李锦豪,姜海明,谢康.光子晶体光纤制备工艺的发展与现状[J].科技创新与应用,2021,11(26):105-110+114.