

一种检测弱磁场的光纤传感器的研究与仿真

赵欣瑜 江兴方 阮志强 张磊

Research and simulation of fiber sensor for weak magnetic field detection

ZHAO Xinyu, JIANG Xingfang, RUAN Zhiqiang, ZHANG Lei

引用本文:

赵欣瑜, 江兴方, 阮志强, 等. 一种检测弱磁场的光纤传感器的研究与仿真[J]. 应用光学, 2024, 45(4): 873–878. DOI: 10.5768/JAO202445.0408002

ZHAO Xinyu, JIANG Xingfang, RUAN Zhiqiang, et al. Research and simulation of fiber sensor for weak magnetic field detection[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(4): 873–878. DOI: 10.5768/JAO202445.0408002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0408002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

侧边抛磨的U型金溅射塑料光纤等离子体共振传感器

Side-grinding U-shaped gold sputter plastic fiber SPR sensor

应用光学. 2019, 40(3): 511–516 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0308002>

光纤布拉格光栅柔性传感器研究进展

Research progress of flexible sensor of fiber Bragg grating

应用光学. 2021, 42(5): 932–940 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0508002>

基于荧光淬灭原理的光纤氧传感器的实验研究

Experimental research on fiber optic oxygen sensor based on fluorescence quenching principle

应用光学. 2019, 40(4): 704–709 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0408002>

波长和强度同时响应的锥形多模光纤温度传感器

Tapered multi-mode fiber temperature sensor based on simultaneous response of wavelength and intensity

应用光学. 2017, 38(2): 331–335 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0208001>

基于有限包络圆的光电平台传感器布局设计

Design of sensor layout in photoelectric platform based on finite circle method

应用光学. 2017, 38(6): 857–862 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0601001>

FBG传感器在空腔爆炸压力测量中的应用研究

Application research of FBG sensors used in cavity explosion for pressure measurement

应用光学. 2019, 40(2): 300–305 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0203004>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 04-0873-06

一种检测弱磁场的光纤传感器的研究与仿真

赵欣瑜, 江兴方, 阮志强, 张 磊

(常州大学 微电子与控制工程学院, 江苏 常州 213164)

摘 要: 提出一种基于表面等离子共振的光子晶体光纤传感器, 用于实时检测弱磁场强度变化。光子晶体光纤表面覆盖氮化硅和银薄膜, 实现表面等离子共振, 传感器外侧的磁流体用于感知磁场变化。针对磁场强度检测, 基于折射率性能指标归纳了磁场与传感器性能指标。有限元方法的仿真结果表明, 在 80 Oe~1 000 Oe 磁场强度范围内, 传感器波长灵敏度可达 $0.55 \text{ nm} \cdot \text{Oe}^{-1}$; 此外, 幅度灵敏度、分辨力、检测限、品质因数和拟合度分别达到了 -0.107 Oe^{-1} 、 $1.8 \times 10^{-2} \text{ Oe}$ 、 $3.3 \times 10^{-2} \text{ Oe}^2 \cdot \text{nm}^{-1}$ 、 $6.73 \times 10^{-2} \text{ Oe}^{-1}$ 和 0.991 17。该传感器具备制作工艺简单、易于制造的特点, 可以预见其在磁场检测的广阔前景。

关键词: 传感器; 光子晶体光纤; 表面等离子共振; 磁场检测; 有限元方法

中图分类号: TP212.3

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0408002

Research and simulation of fiber sensor for weak magnetic field detection

ZHAO Xinyu, JIANG Xingfang, RUAN Zhiqiang, ZHANG Lei

(School of Microelectronics and Control Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China)

Abstract: A photonic crystal fiber sensor based on surface plasmon resonance was proposed for real-time detection of weak magnetic field. The surface of the photonic crystal fiber was covered with silicon nitride and silver film to achieve surface plasmon resonance, and the magnetic fluid on the outside of the sensor was used to sense the magnetic field changes. For the detection of magnetic field intensity, the performance indexes of magnetic field and sensor were summarized based on the performance indexes of refractivity. The simulation results of finite element method show that the wavelength sensitivity of the sensor can reach $0.55 \text{ nm} \cdot \text{Oe}^{-1}$ in the magnetic field range of 80 Oe~1 000 Oe. The amplitude sensitivity, resolution, limit of detection, quality factor and fitting degree reach -0.107 Oe^{-1} , $1.8 \times 10^{-2} \text{ Oe}$, $3.3 \times 10^{-2} \text{ Oe}^2 \cdot \text{nm}^{-1}$, $6.73 \times 10^{-2} \text{ Oe}^{-1}$ and 0.991 17, respectively. The sensor also has the characteristics of simple production process and easy to manufacture, which can foresee its broad prospect in magnetic field detection.

Key words: sensor; photonic crystal fiber; surface plasmon resonance; magnetic field detection; finite element method

引言

基于表面等离子共振(surface plasmon resonance, SPR)的传感器已被用于生物和化学检测中^[1]。与此同时, 基于 SPR 技术的光纤传感器因其对电磁辐射不敏感, 具有遥感能力、紧凑性和耐腐蚀性等特点, 在物理领域也具有巨大的潜力。SPR 技术

本质是通过监测分析物的折射率进而分析出想要的参数。目前, 已经使用 SPR 的传感机制对一些物理量进行测量, 例如温度、压力^[2]、气体浓度^[3]等。磁场测量在工业、医疗, 甚至国防领域都发挥着重要作用。磁场检测经历了早期磁电信号转换测量, 再到现代光学测量。磁电信号转换应用较为

收稿日期: 2023-05-10; 修回日期: 2023-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(41875026); 江苏省现代光学技术重点实验室开放研究课题(KJS1405)

作者简介: 赵欣瑜(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感器研究。E-mail: zhaoxinyu0113@163.com

通信作者: 江兴方(1963—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事光纤技术研究。E-mail: xfjiang@cczu.edu.cn

广泛的是霍尔传感器^[4],它利用了霍尔效应;光学测量方法使用光纤干涉仪^[5]、布拉格光栅^[6]、光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)等多种设备进行磁场探测。

基于 SPR 技术的光子晶体光纤传感器已有相关报导。2018 年, NARAYAN DASH J^[7] 等人设计了一款类 D 型传感器,其微弧形面覆盖氧化铜锡薄膜实现传感,在 90 Oe~1 000 Oe 磁场检测范围灵敏度可达 $0.56 \text{ nm} \cdot \text{Oe}^{-1}$ 。2021 年, ISLAM M R^[8] 等人设计了一种外侧检测磁场的光纤传感器,其灵敏度为 $0.16 \text{ nm} \cdot \text{Oe}^{-1}$ 。2022 年, YAO S Y^[9] 等人设计了一种内填充的传感器,在 50 Oe~130 Oe 磁场范围内灵敏度可达 $0.59 \text{ nm} \cdot \text{Oe}^{-1}$ 。这些传感器都有各自的特点,但如 PCF 堆叠层数过多,内部镀膜和材料填充不易实现, D 型光纤侧面抛光精度不够等都是需要克服的问题^[10],并没有一款传感器能兼顾性能和易于制造。基于 SPR 技术的 PCF 传感器实际加工制造中存在两个难点:一是 PCF 的制作, PCF 的外形类似为无限高度的,内部有规则排列空气圆孔的圆柱结构,更改其外形(例如 D 型光纤侧面抛光)或者增加气孔数量,会带来更多不确定性;二是 PCF 的镀膜,在 PCF 气孔内壁镀膜的工艺难度极大,因此在 PCF 表面全方位镀膜为最优解。此外,由于磁场检测与常见分析物折射率的检测存在一定的差异性,部分性能指标并不适用,这也给研究带来不便。

本文设计了一款新型光子晶体光纤传感器,其基于表面等离子共振技术,用来检测弱磁场。光子晶体光纤表面覆盖氮化硅(Si_3N_4)和银薄膜,实现表面等离子共振,氮化硅因其在提高灵敏度方面的良好表现^[11]被用在本次设计中,传感器外侧的磁流体(magnetic fluid, MF)用于感知磁场变化。此外,磁场检测上对折射率性能指标总结,并提出了磁场与传感器性能指标的计算公式。仿真结果表明,在 80 Oe~1 000 Oe 磁场范围内传感器波长灵敏度可达 $0.55 \text{ nm} \cdot \text{Oe}^{-1}$,非常适合弱磁场的检测。同时幅度灵敏度、分辨力、品质因数等性能指标也较为优秀。

1 原理及设计

传感工作原理如图 1 所示。可调光源发出光并经过单模光纤(single mode fiber, SMF)传输,单

模光纤的一部分被光纤传感器取代,且光纤传感器被封入在磁流体中。单模光纤的另一侧是光谱分析仪(optical spectrum analyzers, OSA)。传感部分的外侧存在磁场,当磁场强度发生变化时,磁流体折射率改变。光纤传感器感知磁流体折射率的变化并转化为光谱信息,计算机连接至光谱分析仪,获取光谱信息数据并处理,得出磁场强度。

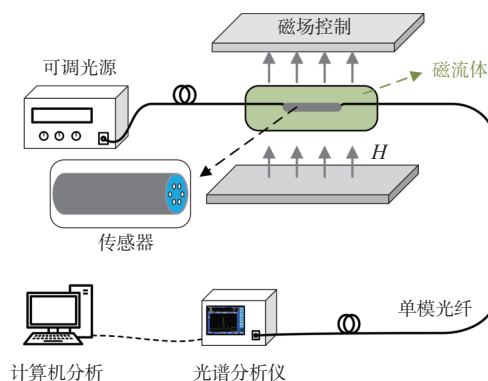


图 1 传感工作原理

Fig. 1 Schematic diagram of proposed sensor

传感器的截面示意图如图 2 所示。光子晶体光纤由实心 and 空心的光纤原料进行六边形堆叠拉伸制造而成,其材料是熔融石英。PCF 表面有 3 层纳米薄膜,由内而外依次是氮化硅-银-氮化硅,其厚度依次为 20 nm、30 nm、15 nm。氮化硅因其在提高灵敏度方面的良好表现被用在本次设计中,且氮化硅薄膜可以保护银薄膜以防氧化。薄膜外侧是磁流体材料,用来感知磁场的变化,其厚度需控制在微米尺度。最外面是完美匹配层(perfectly matched layer, PML),用以在模拟中吸收散射的能量。

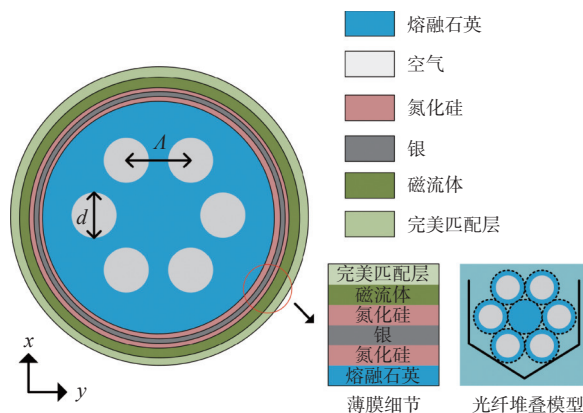


图 2 传感器的截面示意图

Fig. 2 Cross-sectional diagram of proposed sensor

本次设计孔间距与孔直径分别为 $A = 2 \mu\text{m}$ 和 $d = 0.55A$, 光纤直径为 $10 \mu\text{m}$, 此直径与单模光纤直

径一致,易于两者之间耦合。此外,传感器内部结构对称,因此不需要考虑磁场方向与测量方向是否匹配问题。传感器采用有限元法 (finite element method, FEM) 软件 COMSOL Multiphysics 进行仿真。利用软件对传感器结构进行网格划分,通过求解麦克斯韦方程组找到有效的模式并计算出有效折射率。所需材料光学特性在软件配置中定义。

光子晶体光纤选择熔融石英作为基底材料,由式(1)的 Sellmeier 方程^[12]可以计算出折射率:

$$n_{\text{silica}} = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^3 \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i}} \quad (1)$$

式中: λ 为波长,单位是 μm ; B_i 和 C_i 为 Sellmeier 系数; $B_1=0.696\ 163$; $B_2=0.407\ 946$; $B_3=0.897\ 479\ 400$; $C_1=0.004\ 679\ 148\ 6$; $C_2=0.013\ 512\ 063\ 1$; $C_3=97.934\ 002\ 5$ 。

氮化硅的折射率如式(2)所示^[11]:

$$n_{\text{Si}_3\text{N}_4} = \sqrt{1 + \frac{3.024\ 9\lambda^2}{\lambda^2 - 0.135\ 340\ 6^2} + \frac{40\ 314\lambda^2}{\lambda^2 - 1\ 239.842^2}} \quad (2)$$

银的相对介电常数由 Drude-Lorentz 方程^[13]得到,如式(3)所示:

$$\varepsilon_{\text{Ag}} = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_D^2}{\omega(\omega + i\gamma_D)} - \frac{\Delta\varepsilon \cdot \Omega_L^2}{(\omega^2 - \Omega_L^2) + i\Gamma_L\omega} \quad (3)$$

式中: ω 是角频率;对于银, $\varepsilon_{\infty} = 2.406\ 4$; 洛伦兹振荡强度 $\Delta\varepsilon = 1.660\ 4$; ω_D 和 γ_D 为模型常量,并且 $\omega_D/2\pi = 2\ 214.6\ \text{THz}$; $\gamma_D/2\pi = 4.8\ \text{THz}$; Ω_L 和 Γ_L 为洛伦兹振荡的频率和频谱宽度,并且 $\Omega_L/2\pi = 1\ 330.1\ \text{THz}$; $\Gamma_L/2\pi = 620.7\ \text{THz}$ 。

磁流体的折射率由式(4)给出^[14]:

$$n_{\text{MF}} = [n_s - n_b] \left[\coth\left(\alpha - \frac{H - H_{c,n}}{T}\right) - \frac{T}{\alpha \times (H - H_{c,n})} \right] - n_b \quad (4)$$

式中: $H_{c,n}$ 、 n_b 、 n_s 分别为磁流体的临界磁场强度、低于临界磁场强度的折射率值和磁流体的饱和折射率, $H_{c,n} = 80\ \text{Oe}$, $n_b = 1.341\ 1$, $n_s = 1.390\ 1$; α 是拟合参数, $\alpha = 0.143$; H 和 T 分别是磁场强度和工作温度,单位为奥斯特(Oe)和摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。

在不同工作温度下的磁场强度与折射率的关系如图3所示。磁场强度与折射率并非线性关系,且当磁场强度低于临界磁场强度 $80\ \text{Oe}$ 时为固定折射率 $1.341\ 1$ 。在不同温度下,磁流体折射率范围会随着工作温度升高而缩小。研究工作温度默认设置为室温 $25\ ^{\circ}\text{C}$,对于温度带来的性能上的变化后面会进行研究讨论。

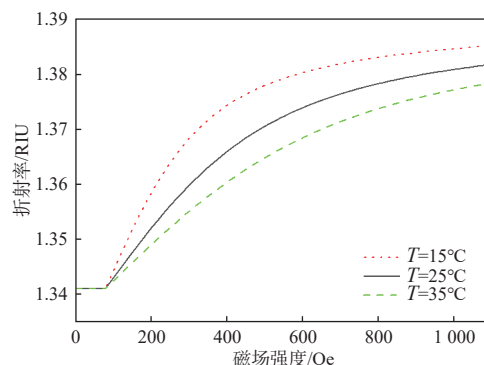


图3 磁流体在不同温度下磁场强度与折射率的关系

Fig. 3 Relationship between magnetic field and RI of magnetic fluid at different temperatures

2 结果与讨论

光在传感器纤芯缺陷处传输时,有部分泄漏至薄膜附近,并且在金属表面激发电子。核心模式的有效折射率 (n_{eff}) 的实部和表面等离子激元 (surface plasmon polariton, SPP) 模式的有效折射率的实部相等时,其所在工作波长也称为共振波长。在共振波长处会发生相位匹配,核心模式到 SPP 模式发生最大能量转移,这被量化为限制损耗 (confinement loss, CL)。限制损耗由式(5)给出^[15]:

$$\alpha_{\text{CL}} \approx 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} \times \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^4 \text{ (dB} \cdot \text{cm}^{-1}) \quad (5)$$

式中: 波长 λ 的单位为 μm ; $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为有效折射率的虚部。

图4是磁场强度 $H = 500\ \text{Oe}$, 温度为 $25\ ^{\circ}\text{C}$ 时传感器在工作波长 $905\ \text{nm} \sim 1065\ \text{nm}$ 区间的色散关系曲线。传感器的限制损耗在波长 $983\ \text{nm}$ 处于峰值,分析有效折射率的实部发现,核心模式和

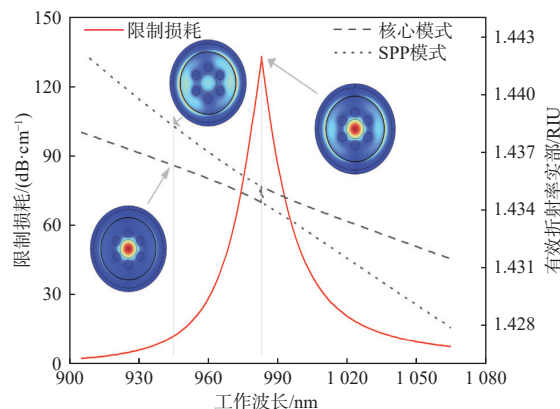


图4 核心模式、SPP模式和限制损耗的色散关系曲线

Fig. 4 Dispersion relation curves of core mode, SPP mode and CL

SPP 模式在此处能量转移最大化。

光纤传感器通常情况下考察的是不同折射率下的色散关系,但本次传感器的目的为磁场检测,而磁场强度和折射率之间并非线性关系,因此,讨论不同磁场强度下的色散关系更有意义。参考此前研究者的文献,设定 80 Oe、250 Oe、500 Oe、750 Oe 和 1 000 Oe 的磁场强度作为参考,进一步求解色散关系曲线。不同磁场强度下,600 nm~1 300 nm 工作波长的色散关系曲线如图 5 所示,限制损耗的峰值处波长随着磁场强度的增加向红外波长方向偏移。

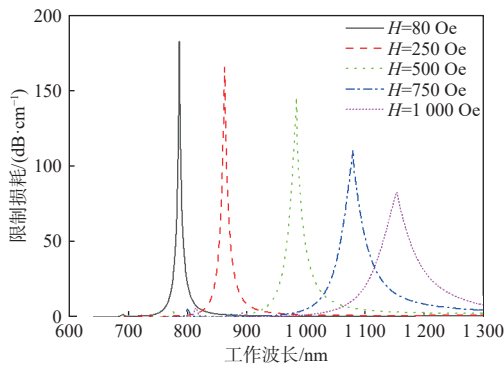


图 5 不同磁场强度下色散关系曲线 ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 5 Dispersion relation curves under different magnetic field intensities ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

通过不同磁场强度下的色散关系,可以得到一系列参数指标,包括幅度/波长灵敏度、分辨力、检测限、品质因数、拟合度。而对于磁场强度检测,通常量程、精度是其关键值。量程也就是磁场强度检测范围,通常要对应用途,并不是越大越好。本次设计的传感器针对弱磁场进行检测,弱磁场的场强为 0 Oe~2 000 Oe,符合应用范围。精度方面,光纤传感器的分辨力是其精度的决定因素^[16],同时其他参数指标也具有一定的参考价值。

幅度询问技术和波长询问技术用于确定传感器设计的极限,并表示为幅度灵敏度 (amplitude sensitivity, AS) 或波长灵敏度 (wavelength sensitivity, WS)。在幅度询问技术中,分析物检测只需要在固定波长处进行测量,避免了频谱操作,因此操作比较简单。根据文献 [12],幅度灵敏度由式(6)给出:

$$S_A = -\frac{\Delta\alpha_{CL}(\lambda, H)}{\alpha_{CL}(\lambda, H) \times \Delta H} (\text{Oe}^{-1}) \quad (6)$$

式中 $\alpha_{CL}(\lambda, H)$ 表示核心模式下与波长相关的限制损耗。

在波长询问技术中,波长灵敏度表示当分析物 RI 变化时共振波长的偏移。共振峰值波长与磁场之间的关系由式(7)确定^[17]:

$$S_\lambda = \frac{\Delta\lambda_{\text{peak}}}{\Delta H} (\text{nm} \cdot \text{Oe}^{-1}) \quad (7)$$

式中 λ_{peak} 为共振峰值波长,单位 nm; H 表示磁场强度,单位 Oe; S_λ 为波长灵敏度。

光纤传感器分辨力描述了传感器在观察分析物质性质的微小变化方面的能力。同时,检测限(limit of detection, LoD)可由分辨力计算得到。与磁场强度关联的分辨力和检测限分别由式(8)和式(9)给出:

$$R_{\text{es}} = \frac{\Delta H \times \Delta\lambda_{\text{min}}}{\Delta\lambda_{\text{peak}}} (\text{Oe}) \quad (8)$$

$$D_{\text{Lo}} = R_{\text{es}}/S_\lambda (\text{Oe}^2 \cdot \text{nm}^{-1}) \quad (9)$$

品质因数 (figure of merit, FOM) 同样是评估传感器性能的重要参数,与磁场强度关联的品质因数由式(10)给出:

$$M_{\text{FO}} = \frac{S_\lambda}{W_{\text{FWHM}}} (\text{Oe}^{-1}) \quad (10)$$

式中 W_{FWHM} 是半高宽。过大的半高宽会影响传感器检测的准确度,半高宽越窄越好。

本次设计中,磁场强度为 80 Oe 时处于测量临界点,选取磁场强度 100 Oe 作为替代参考。传感器的幅度灵敏度如图 6 所示,幅度灵敏度随着磁场强度减少而增大,当磁场强度为 100 Oe 时,幅度灵敏度最大可达 -0.107 Oe^{-1} 。

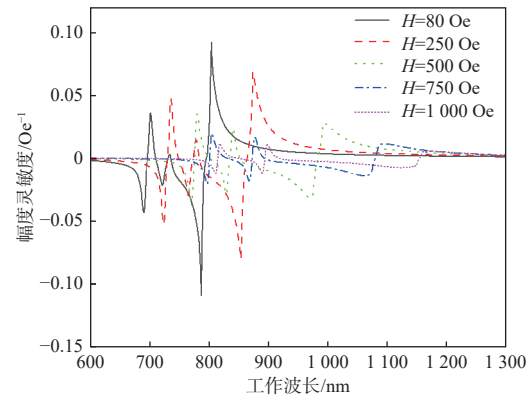


图 6 不同磁场强度下传感器的幅度灵敏度 ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 6 Amplitude sensitivity of sensor under different magnetic field intensities ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

此外,对不同磁场强度下的幅度/波长灵敏度、分辨力、检测限、品质因数进行了整理,如表 1 所示。在磁场强度为 100 Oe 时,幅度灵敏度达到最佳为 $-1.07 \times 10^{-1}\text{ Oe}^{-1}$ 。与幅度灵敏度不同,波长灵敏度、分辨力、检测限在磁场强度为 500 Oe 时最佳,分别为 $0.55\text{ nm} \cdot \text{Oe}^{-1}$ 、 $1.8 \times 10^{-2}\text{ Oe}$ 、 $3.3 \times 10^{-2}\text{ Oe}^2 \cdot \text{nm}^{-1}$ 。品质因数与半高宽存在关系,从图 5 不难看出,半高宽随着磁场强度的增加而变大。当磁场强度为

250 Oe 时, 品质因数最佳为 $5.00\times10^{-2}\text{ Oe}^{-1}$ 。

表 1 不同磁场强度下的幅度/波长灵敏度、分辨力、检测限、品质因数

Table 1 Amplitude/wavelength sensitivity, resolution, limit of detection, and quality factor under different magnetic field intensities

磁场强度/(Oe)	100	250	500	750	1 000
幅度灵敏度/ (Oe^{-1})	-1.07×10^{-1}	-7.7×10^{-2}	-3.2×10^{-2}	-1.4×10^{-2}	-0.7×10^{-2}
波长灵敏度/ ($\text{nm}\cdot\text{Oe}^{-1}$)	0.43	0.50	0.55	0.40	0.30
分辨力/(Oe)	2.3×10^{-2}	2.0×10^{-2}	1.8×10^{-2}	2.5×10^{-2}	3.3×10^{-2}
检测限/ ($\text{Oe}^2\cdot\text{nm}^{-1}$)	5.3×10^{-2}	4.0×10^{-2}	3.3×10^{-2}	6.3×10^{-2}	1.1×10^{-1}
品质因数/ (Oe^{-1})	6.73×10^{-2}	5.00×10^{-2}	2.89×10^{-2}	1.06×10^{-2}	4.88×10^{-3}

多项式拟合同样为优化基于 SPR 的 PCF 传感器提供了重要提示, 图 7 显示了磁场强度 80 Oe~1 000 Oe 之间的多项式拟合结果。传感器的拟合度 R^2 的值为 0.991 17, 在传感范围内表现出极好的连续响应。

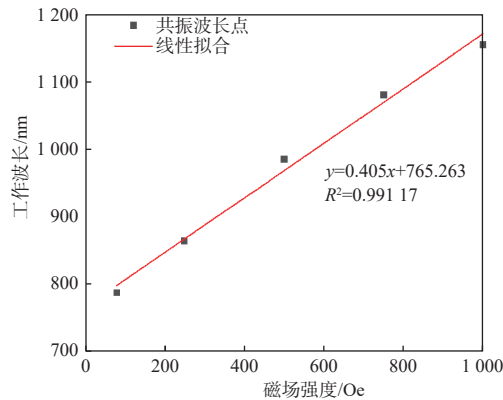


图 7 传感器磁场强度与共振波长的多项式拟合 ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig. 7 Polynomial fitting of sensor magnetic field intensity and resonant wavelength ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

表 2 所提出传感器与其他磁场传感器的对比

Table 2 Performance comparison between proposed sensor and other magnetic field sensors

文献	检测范围/Oe	幅度灵敏度/(Oe^{-1})	波长灵敏度/($\text{nm}\cdot\text{Oe}^{-1}$)	分辨力/Oe	品质因数/(RIU^{-1})
[9]	50~130	—	0.59	1.00×10^{-1}	374.3
[14]	0~1 000	—	0.16	—	4.23×10^3
[7]	90~1 000	-5.52×10^{-3}	0.56	1.77×10^{-1}	—
[18]	0~500	—	0.044	—	—
本文	80~1 000	-1.07×10^{-1}	0.55	1.80×10^{-2}	719.5

3 结论

本文提出了一种基于表面等离子共振的光子晶体光纤传感器, 实现了弱磁场的实时测量。在评估传感器性能时, 重新梳理了磁场检测的参数

以上是传感器在室温 ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下的性能参数指标。当温度变化时, 传感器的性能指标也会发生相应变化。图 8 展示了不同温度下的色散关系曲线。结合图 3 磁流体在不同温度下磁场强度与折射率的关系, 温度上升会让磁流体折射率范围缩小, 进而导致幅度灵敏度、分辨力以及检测限显著降低。而温度下降虽然能提升波长灵敏度, 但会使限制损耗共振峰的半高宽变大, 特别是磁场强度为 1 000 Oe 时, 品质因数会大幅降低。

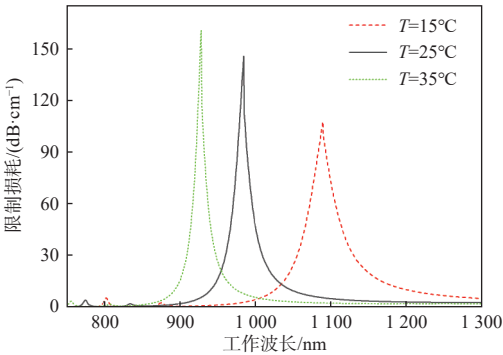


图 8 不同温度下传感器的限制损耗
Fig. 8 CL of sensor under different temperatures

为了更好地展示传感器性能, 表 2 对比展示了类似磁场传感器的参数。由于过去的研究只揭示了磁场变化下部分性能参数, 例如幅度/波长灵敏度、分辨力, 而诸如幅度灵敏度、分辨力等参数都仅为折射率变化下的性能指标。为了更直观地对比, 对本次提出的传感器的指标做了相应的转化。由于拟合分为折射率拟合和磁场拟合, 因此拟合度不具备对比价值。从表 2 中可以看出, 所提出的传感器幅度灵敏度表现出色, 波长灵敏度达到领先水准, 分辨力极高。

指标。作者认为, 对于磁场检测关键点的磁流体, 其折射率与磁场强度并非线性关系, 参考折射率变化得到的性能参数是无意义的。仿真结果表明, 本研究提出的传感器非常适合检测弱磁场, 在

具有简单结构的同时拥有优异的性能,幅度灵敏度、分辨力、品质因数都极为优秀,分别可至 $-1.07 \times 10^{-1} \text{ Oe}^{-1}$ 、 $1.80 \times 10^{-2} \text{ Oe}$ 、 $6.73 \times 10^{-2} \text{ Oe}^{-1}$, 并且毫不逊色的波长灵敏度也能达到 $0.55 \text{ nm} \cdot \text{Oe}^{-1}$ 。可以预见该传感器在弱磁场检测的广阔应用前景。尽管所提出的传感器已对加工制造过程充分考虑,但仍存在一些难点:薄膜厚度的控制、氮化硅与银夹层的工艺以及微米厚度的磁流体封装,这些问题都需要在制造过程中不断尝试改进。

参考文献:

- [1] MITU S A, AKTAR M N, IBRAHIM S M, et al. Surface plasmon resonance -based refractive index biosensor: an external sensing approach[J]. *Plasmonics*, 2022, 17(4): 1581-1592.
- [2] 刘天沐, 江毅, 崔洋. 光子晶体光纤温度压力传感器[J]. *光子学报*, 2020, 49(4): 0406001.
LIU Tianmu, JIANG Yi, CUI Yang. Photonic crystal fiber temperature and pressure sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(4): 0406001.
- [3] 刘强, 赵锦, 孙宇丹, 等. 基于表面等离子体共振的光子准晶体光纤甲烷氢气传感器[J]. *中国光学*, 2023, 16(1): 174-183.
LIU Qiang, ZHAO Jin, SUN Yudan, et al. A novel methane and hydrogen sensor with surface plasmon resonance-based photonic quasi-crystal fiber[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 174-183.
- [4] DAI T Y, CHEN C Y, HUANG L, et al. Ultrasensitive magnetic sensors enabled by heterogeneous integration of graphene hall elements and silicon processing circuits[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(12): 17606-17614.
- [5] TAO Y, FENG W L. High-sensitivity detection of magnetic field and temperature based on magnetic fluid coated bi-tapered Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optik*, 2022, 259: 168981.
- [6] CHEN J, HUANG S Y, LIN C Y, et al. A low-frequency magnetic field sensor based on fiber Bragg gratings[J]. *Photonics*, 2022, 9(2): 102.
- [7] NARAYAN DASH J, DAS R. SPR based magnetic-field sensing in microchannelled PCF: a numerical approach[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(11): 115001.
- [8] ISLAM M R, KHAN M M I, SIRAZ S, et al. Design and analysis of a QC-SPR-PCF sensor for multipurpose sensing with supremely high FOM[J]. *Applied Nanoscience*, 2022, 12(1): 29-45.
- [9] YAO S Y, YU Y, QIN S P, et al. Research on optimization of magnetic field sensing characteristics of PCF sensor based on SPR[J]. *Optics Express*, 2022, 30(10): 16405-16418.
- [10] DANLARD I, AKOWUAH E K. Assaying with PCF-based SPR refractive index biosensors: from recent configurations to outstanding detection limits[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 54: 102083.
- [11] KUMAR A, KUMAR A, SRIVASTAVA S K. Silicon nitride-BP-based surface plasmon resonance highly sensitive biosensor for virus SARS-CoV-2 detection[J]. *Plasmonics*, 2022, 17(3): 1065-1077.
- [12] 吴蓉, 张璐瑶, 严清博, 等. 用于液体传感的高双折射新型光子晶体光纤结构[J]. *应用光学*, 2020, 41(3): 637-644.
WU Rong, ZHANG Luyao, YAN Qingbo, et al. New photonic crystal fiber structure with high birefringence for liquid sensing[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(3): 637-644.
- [13] YANG H M, WANG G Y, LU Y, et al. Highly sensitive refractive index sensor based on SPR with silver and titanium dioxide coating[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(6): 341-353.
- [14] ISLAM M R, KHAN M M I, AL NASER A M, et al. Design of a quad channel SPR-based PCF sensor for analyte, strain, temperature, and magnetic field strength sensing[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(9): 1-24.
- [15] 叶楚妮, 陈鹤鸣. 基于表面等离子体共振的光子晶体光纤温度传感器[J]. *光通信技术*, 2021, 45(11): 1-5.
YE Chuni, CHEN Heming. Photonic crystal fiber temperature sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Optical Communication Technology*, 2021, 45(11): 1-5.
- [16] ZHU M J, YANG L, LYU J W, et al. Highly sensitive dual-core photonic crystal fiber based on a surface plasmon resonance sensor with gold film[J]. *Plasmonics*, 2022, 17(2): 543-550.
- [17] GU S F, SUN W, LI M, et al. Simultaneous measurement of magnetic field and temperature based on photonic crystal fiber plasmonic sensor with dual-polarized modes[J]. *Optik*, 2022, 259: 169030.
- [18] LIU H, CHEN C C, WANG H R, et al. Simultaneous measurement of magnetic field and temperature based on surface plasmon resonance in twin-core photonic crystal fiber[J]. *Optik*, 2020, 203: 164007.