

文章编号 1004-924X(2018)06-1338-08

马赫-曾德尔干涉集成化的全光纤磁场与温度传感器

沈 涛^{1,2*}, 孙滨超², 冯 月^{1,2}

(1. 哈尔滨理工大学 工程电解质及其应用教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 哈尔滨理工大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:为了简化光纤磁场与温度传感器的结构并提高传感器灵敏度,设计并制作了马赫-曾德尔干涉集成化的全光纤磁场与温度传感器。将单根光纤的马赫-曾德尔模间干涉结构和双臂马赫-曾德尔干涉结构结合;将总长度为 1.2 m 的单模光纤部分制备成长度为 2.7 cm、锥腰直径为 30.1 μm 的锥形微纳光纤,并得到了拉锥时间与锥腰直径的关系。将锥形微纳光纤放置尼龙槽内并包覆磁凝胶构成传感头,实现模间干涉的马赫-曾德尔磁场传感器;将磁场传感器通过两耦合比为 50% : 50% 的耦合器并联带有可调谐光衰减器的单模光纤形成马赫-曾德尔干涉的温度传感器。从理论上分析了光谱漂移对磁场和温度传感的特性关系,实验测得室温下磁场强度在 25~50 mT 时,磁场传感的灵敏度为 0.301 14 nm/mT;在磁场强度为 0,温度由 25 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 30 $^{\circ}\text{C}$ 时,温度传感的灵敏度为 0.518 86 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。该传感器可广泛应用于电力系统放电检测、材料加工、安全监控等领域。

关键词: 光纤传感器;马赫-曾德尔干涉仪;磁场传感;温度传感;灵敏度分析

中图分类号: TN253; TP212.11 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182606.1338

Mach-Zehnder interference all-fiber sensor for measurement of magnetic field and temperature

SHEN Tao^{1,2*}, SUN Bin-chao², FENG Yue^{1,2}

(1. Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. School of Science, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

* Corresponding author, E-mail: taoshenchina@163.com

Abstract: A Mach-Zehnder interferometer all-fiber sensor for magnetic field and temperature measurement was proposed and experimentally demonstrated for a simplified sensor with improved sensitivity. It combined a Mach-Zehnder modal interferometer and two arms Mach-Zehnder interferometer. A single mode fiber of 1.2 m in length was partly processed into a taper-structured microfiber of 2.7 cm length and a 30.1 μm diameter taper waist. The relationship between the tapering time and the taper waist was investigated. The tapered fiber was placed into a nylon slot and was coated using magnetic sol-gel to fabricate the sensor head. The Mach-Zehnder modal interferometer magnetic field sensor was then complete. The other single mode fiber with a tunable optical attenuator was employed to

收稿日期:2017-12-15;修订日期:2018-01-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51677044);哈尔滨市科技人才创新项目(No. 2017RAYXJ022)

form the Mach-Zehnder interferometer temperature sensor via two couplers with coupling ratio 50 : 50. The characteristic relationship between the spectra drift, and the magnetic field/ temperature sensing was analyzed theoretically. Experiment results show that the sensitivity of the magnetic field sensor is 0.301 14 nm/mT when the magnetic field intensity ranged from 25 mT to 50 mT at room temperature. The temperature sensor had a sensitivity of 0.518 86 nm/°C in the range of 25 °C to 30 °C without an applied magnetic field. This sensor has potential applications in numerous areas, including discharge detection systems, material processing, and safety monitoring, etc.

Key words: fiber optic sensors; Mach-Zehnder interferometers; magnetic field measurement; temperature measurement; sensitivity analysis

1 引言

磁场与温度传感在电力系统局部放电检测、复合材料成型加工和医疗生化安全监控^[1-3]等领域有着广泛的应用。相比电信号解调的传感系统,全光纤传感器因灵敏度高、稳定性好、结构紧凑、成本低廉等特点^[4-7]而备受研究人员的关注,将磁场测量与温度测量和光纤传感结合已成为相关科研工作者近些年的研究热点^[8]。由于光纤对磁场不敏感的特性,光纤磁场传感通常利用光学磁性敏感材料对传感头进行封装处理^[9]或利用某种介质使光和磁场产生法拉第效应来实现。光纤温度传感多采用基于干涉理论的光路结构或将传感器与光纤光栅进行结合来实现^[10]。

在磁场传感研究中,2014年 Laeghi等^[11]在锥形光纤处填充磁流体,制备了光纤磁场传感器,灵敏度为 0.0717 nm/mT。2016年,Zhao等^[12]设计并制作了一种马赫-曾德尔干涉和光纤布拉格光栅级联的光纤磁场传感器,在磁场强度为 0~20 mT时,传感器的灵敏度为 0.11 nm/mT。2016年,Cao等^[13]通过控制光纤熔接机的放电强度和放电时间,将单模光纤部分制作出级联球形结构作为光纤耦合器,并将此结构级联长周期光栅形成的磁场传感器,其灵敏度为 0.064 nm/mT。同年,Shen等^[14]制作了磁流体与微纳光纤结合的环形衰荡式光纤磁场传感器,其灵敏度为 95.5 ns/mT。2017年,Wang等^[15]提出了级联球形结构的多模光纤磁场传感器,测量灵敏度为 0.077 nm/mT。在温度传感研究中,2016年SHO等^[16]基于 TiO₂ 的热光效应,将 TiO₂ 与 Au膜镀到微纳光纤上,形成表面等离子共振的光纤温度传感器,灵敏度为 0.026 7 nm/°C。2017年,

Sun等^[17]将 ZnO 薄膜镀到空芯光纤的纤芯处,制备了最高测量温度为 460 °C 的光纤温度传感器,其灵敏度为 0.010 87 nm/°C。然而,多数传感器由于无法利用同一装置实现磁场和温度的测量,在实际应用中,磁场和温度传感设备的复杂度和投入成本均较大。目前,可实现磁场测量与温度测量的集成化传感器报道较少。2017年,Sun等^[18]设计并提出了基于时分复用原理的环形衰荡式光纤磁场与温度双参量传感器,利用磁凝胶填充微纳光纤形成磁场传感头,并结合温度应变转换装置,达到对光纤应变损耗的测量及温度传感的目的,其灵敏度分别为 12.7 ns/mT 和 3.53 ns/°C。不过,该传感器并非全光纤传感器,受电磁干扰较明显且系统结构较复杂。

本文提出了基于马赫-曾德尔(Mach-Zehnder, MZ)干涉集成化的全光纤磁场与温度传感器。将磁凝胶^[17]包覆锥形微纳光纤形成 MZ 模间干涉的磁场传感器。将 MZ 干涉的磁场传感器通过耦合器并联单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)构成 MZ 干涉的温度传感器。透射光谱包络的漂移反映磁场变化的特性关系,透射光谱的漂移反映温度变化的特性关系。该传感器具有较高的灵敏度,同时具有结构简单、成本低廉、抗电磁干扰能力强等优势。

2 实验原理

MZ 干涉的磁场与温度传感器结构如图 1 所示。自发辐射放大(Amplified Spontaneous Emission, ASE)宽带光源发出的光信号经耦合器 1 后被分成两束,一束经 SMF 到达传感头,另一束经 SMF 到达可调谐光衰减器(Variable Optical Attenuator, VOA)。其中,传感头内包含磁凝胶

包覆的锥形微纳光纤,其结构如图 2 所示。当光经过传感头锥形微纳光纤第一过渡区时激发起高阶模式,一部分光进入包层和磁凝胶包覆区,另一部分光继续在纤芯中传播。两路光经过第二过渡区后,包层和磁凝胶包覆区的光耦合回纤芯,发生纤芯与包层和磁凝胶之间的模式干涉,当把传感头置于变化的磁场中时,其透射光谱包络会受磁场变化影响发生漂移,这一部分是 MZ 干涉的磁场传感器。调整 VOA,使通过它的光强减弱到一定程度,经过传感头的光与经过 VOA 的光在耦合器 2 中相遇时因存在相位差而发生干涉。当把传感头置于温度变化区域时,其透射光谱会受温度变化影响发生漂移,这一部分是 MZ 干涉的温度传感器。当透射光传输到光谱仪 (Optical Spectrum Analyzer, OSA) 中,通过观察透射光谱包络的变化可得到磁场变化的情况,通过观察透射光谱的变化可得到温度变化的情况,从而实现磁场与温度的测量。

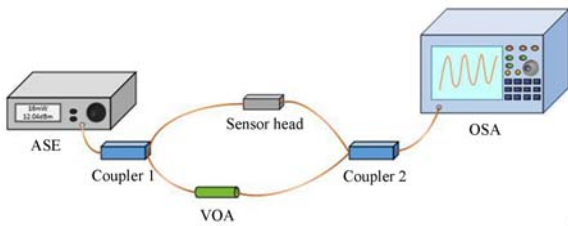


图 1 MZ 干涉磁场测量与温度测量传感实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of MZ interferometric magnetic field and temperature sensing experimental setup

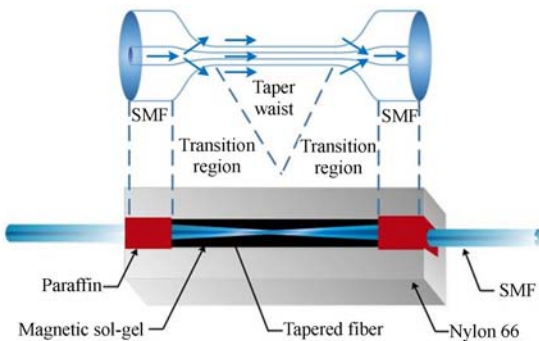


图 2 传感头结构图

Fig. 2 Schematic diagram of sensor head

MZ 干涉的透射谱光强可表示为^[19]:

$$I = I_{sen} + I_{ref} + 2 \sqrt{I_{sen} I_{ref}} \cos(\phi_0 + \Phi), \quad (1)$$

式中: I 为干涉光强度, I_{sen} 为传感区光强 (MZ 干

涉的磁场传感为包层和磁凝胶区域的平均光强, MZ 干涉的温度传感为传感头区域的光强), I_{ref} 为参考区域光强 (MZ 干涉的磁场传感为带有传感头的纤芯区域光强, MZ 干涉的温度传感为带有 VOA 的 SMF 区域光强), ϕ_0 为初始相位, Φ 为不同模式间的相位差。

不同模式间传播常数不同,在传播相同距离后,不同模式会产生相位差,产生的相位差可表示为:

$$\Phi = \frac{2p\Delta n_{eff}L}{\lambda}, \quad (2)$$

式中:对于 MZ 干涉的磁场传感, L 为第一过渡区和第二过渡区之间的光纤长度;对于 MZ 干涉的温度传感, L 为两耦合器之间的光纤长度; λ 为真空中光波波长; Δn_{eff} 为有效折射率之差,对于 MZ 干涉磁场传感为包层和磁凝胶平均折射率和锥腰处纤芯折射率之差,对于 MZ 干涉的温度传感为传感头与带有 VOA 的 SMF 的折射率之差。

当相位差满足 $\Phi = (2m+1)p$ (m 为正整数) 时,即会发生干涉。结合式 (2) 可得干涉峰的波长为:

$$\lambda_{Cre} = \frac{2\Delta n_{eff}L}{2m+1}. \quad (3)$$

磁场传感或温度传感由光耦合形成的干波峰间隔为:

$$\Delta\lambda_{Cre} = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{eff}L}. \quad (4)$$

当磁场或温度发生变化时,式 (3) 中的 Δn_{eff} 和 L 也会发生改变,使得干涉峰发生漂移,干涉峰的相对漂移量可表示为:

$$\frac{\Delta\lambda_{Cre}}{\lambda_{Cre}} = \left(\frac{\xi_{sen} n_{eff}^{sen} - \xi_{ref} n_{eff}^{ref}}{n_{eff}^{sen} - n_{eff}^{ref}} + \alpha \right) \Delta T + \left(\frac{1}{n_{eff}^{sen} - n_{eff}^{ref}} - \frac{\partial n_{eff}^{ref}}{\partial n_{ex}} \right) \Delta n_{ex}, \quad (5)$$

式中: $\alpha = \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T}$, 为热膨胀系数; ξ_{sen} 为传感区的热光系数; ξ_{ref} 为参考区的热光系数; n_{eff}^{sen} 为传感区的有效折射率; n_{eff}^{ref} 为参考区的有效折射率。

对于 MZ 干涉温度传感有:

$$\frac{\Delta\lambda_{Cre}}{\lambda_{Cre}} = \left(\frac{\xi_{sen} n_{eff}^{sen} - \xi_{ref} n_{eff}^{ref}}{n_{eff}^{sen} - n_{eff}^{ref}} + \alpha \right) \Delta T, \quad (6)$$

式中: ξ_{sen} 为传感头处的热光系数, ξ_{ref} 为经过 VOA 的 SMF 的热光系数, n_{eff}^{sen} 为传感头处的有效折射率, n_{eff}^{ref} 为经过 VOA 的 SMF 的有效折射率。由式

(6)可以看出,MZ 干涉的温度传感干涉峰与温度变化是线性关系。温度升高, $\Delta T > 0$,光谱红移。

对于 MZ 干涉磁场传感有:

$$\frac{\Delta \lambda_{\text{Cre}}}{\lambda_{\text{Cre}}} = \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}^{\text{sen}} - n_{\text{eff}}^{\text{ref}}} - \frac{\partial n^{\text{ref}}}{\partial n_{\text{ex}}} \right) \Delta n_{\text{ex}}, \quad (7)$$

式中: $n_{\text{eff}}^{\text{sen}}$ 为锥腰处包层和磁凝胶的平均折射率, $n_{\text{eff}}^{\text{ref}}$ 为锥腰处纤芯的有效折射率, Δn_{ex} 是磁凝胶折射率随磁场和温度的变化值。其中:

$$\Delta n_{\text{ex}} = \zeta_{\text{H-n}} \Delta H + \zeta_{\text{T-n}} \Delta T, \quad (8)$$

式中: $\zeta_{\text{H-n}}$ 为磁凝胶的磁场灵敏度, $\zeta_{\text{T-n}}$ 为磁凝胶的温度灵敏度。由式(7)和式(8)可以看出,当温度不变时,MZ 干涉磁场传感干涉峰与磁场变化是线性关系。磁场增强, $\Delta H > 0$,光谱红移。

由式(6)~式(8)可知,当只改变传感头温度时,经过传感头 SMF 的光信号与经过可调谐衰减器 SMF 的光信号发生干涉,干涉谱波峰随温度的变化而发生漂移,且二者存在线性关系。当只改变传感头磁场强度时,传感头内二过渡区之间的部分发生干涉,干涉谱包络的波峰随磁场的变化而发生波长的漂移,且二者存在线性关系。利用该传感器可实现磁场与温度的传感。

3 实验与讨论

实验仪器包括:ASE 光源(CONQUER, KG-ASE,波段为 1 525~1 565 nm)、OSA(YOKOGAWA, AQ6370C)、光纤熔接机(韩国黑马, D90S)、特斯拉计(韦特磁电子, WT10A)、光纤拉锥机、温度加热器、实验室自制的光纤耦合器(耦合比为 50% : 50%,插入损耗为 3 dB)和 VOA 等。

实验过程如下:首先完成传感头的制备,将传感头两侧通过 SMF 连接耦合器二端口一侧的任意一端口,耦合器该侧另一端口分别通过一定长度的 SMF 连接 VOA。耦合器 1 单端口一侧通过 SMF 连接 ASE 宽带光源,耦合器 2 单端口一侧通过 SMF 连接 OSA。待 ASE 宽带光源输出光信号稳定后,分别改变传感头处的磁场强度和温度,观察 OSA 光谱变化与二参量变化的关系。

3.1 传感头制备

将 SMF 通过光纤拉锥机拉锥成锥形微纳结构,光纤拉锥的锥腰直径和长度均会对传感器的性能产生影响。理论上,锥腰直径越小,泄露到包层与磁凝胶部分的光信号与磁凝胶的作用越充

分,传感头的灵敏度越高^[20]。但实际操作中发现锥腰越细透射光功率越弱,不利于光谱的检测和分析。当锥腰直径过细时,透射光谱稳定性下降,实验误差增大。此外,过细的锥形微纳光纤极易折断,不利于磁凝胶的填充和传感头的封装。锥腰长度对传感头性能也有类似的影响,随着锥腰长度的增加,透射光功率下降;同时外界环境干扰也会影响透射光谱,降低实验的准确性。因此,在拉锥光纤时,需要兼顾考虑锥形微纳光纤的锥腰直径、锥腰长度对传感头灵敏度及稳定性的影响。

锥形微纳光纤的制作方法如下:在全长 1.2 m 的 SMF 中间去除近 2.7 cm 的涂覆层并用酒精擦净,平整固定于光纤拉锥机的夹具上。所用光纤拉锥机的拉锥火焰为氢氧焰且宽度固定约为 3 mm。固定好的光纤在氢氧焰下加热到熔融状态,同时光纤两端的固定夹具以一定的速度向两边拉伸,从而在加热区域形成被拉细拉长的锥形微纳光纤。实验中可根据拉锥时间控制锥腰直径,其直径大小与拉锥时间的关系如图 3 所示。由图 3 可知,拉锥时间与锥腰直径存在很好的线性关系,拉锥速率为 1.695 $\mu\text{m/s}$ 。图 3 中(a)、(b)、(c)、(d)分别对应拉锥时间为 0, 20, 40, 60 s 时光纤锥腰的显微放大图。基于拉锥时间和锥腰直径的关系并考虑稳定性和灵敏度,经试验测试,选取拉锥时间为 60 s 的锥形光纤,此时锥腰直径为 30.1 μm ,该直径保证了光信号与磁凝胶充分作用的同时一定程度上避免了光谱功率弱稳定性差的问题。

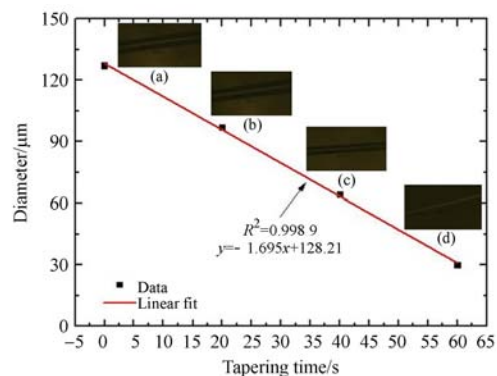


图 3 拉锥时间与锥腰直径的关系

Fig. 3 Relationship between tapering time and diameter of taper waist

将拉锥好的锥形微纳光纤置于尼龙槽内,用石蜡封装尼龙槽两端,以固定光纤并阻挡磁凝胶泄露。用注射器向尼龙槽内滴入磁凝胶,滴磁凝胶时要保证其均匀分布在尼龙槽内且不破坏锥形光纤。

3.2 光路搭建与测试

传感光路结构如图 1 所示。实验中两路 SMF 的芯径均为 $8\ \mu\text{m}$, 外径均为 $125\ \mu\text{m}$, 总长度均为 $1.2\ \text{m}$ 。传感头处锥形微纳光纤锥腰直径为 $30.1\ \mu\text{m}$, 长度为 $2.7\ \text{cm}$ 。连接传感头的 SMF 作为 MZ 干涉的温度传感器的传感臂及 MZ 干涉的磁场传感器的光通路, 连接 VOA 的 SMF 作为 MZ 干涉的温度传感器的参考臂。所有 SMF 的连接均通过光纤熔接机熔融连接, 以增加系统的稳定性并减少法兰连接的插入损耗。

室温下对光路进行测试, 经过约半小时后光源稳定, 得到的光源透射光谱如图 4(a) 所示。光路连接传感头后, 在室温下没有外加磁场时得到的透射光谱如图 4(b) 所示。和图 4(a) 相比, 光谱的光强明显下降, 在 $1\ 525\sim 1\ 565\ \text{nm}$ 的带宽内出现 7 个明显的干涉波峰, 可选取部分干涉波峰进行磁场传感。通过耦合器并联带有 VOA 的 SMF, 干涉光谱消失, 原因是该路光强远远大于带有传感头一路的光强, OSA 中呈现的光谱几乎全部来自该路光信号。调节 VOA, 使该路光强与带有传感头一路光强近似, 此时得到的光谱如图 4(c) 所示。比较图 4(c) 和图 4(b), 明显发现图 4(c) 的干涉光谱波峰和波谷更多, 该干涉光谱由两路 SMF 的光信号干涉产生, 用作 MZ 干涉的温度传感。这些干涉条纹的包络与图 4(b) 一致, 利用这些透射谱的包络对磁场传感。

3.3 磁场传感

为防止周围环境震动和气流对实验结果产生干扰, 将 SMF 粘贴固定在实验平台上。在传感头两侧放置磁场产生装置。在靠近传感头的上方放置特斯拉计的传感头, 用以监测磁场强度的变化情况。实验中, 控制磁场强度由 $25\ \text{mT}$ 变化到 $50\ \text{mT}$, 通过光谱仪观察透射光谱包络的变化, 每隔 $5\ \text{mT}$ 记录一个波长在 $1\ 533\ \text{nm}\sim 1\ 548\ \text{nm}$ 的透射光谱包络, 将不同磁场强度下的光谱包络进行整理, 得到 MZ 干涉的磁场传感透射光谱, 如图 5(a) 所示。

图 5(a) 反映了不同磁场强度下的光谱情况,



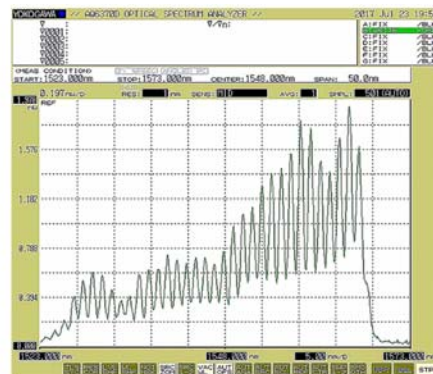
(a) ASE 光源透射光谱

(a) Transmission spectrum of ASE



(b) 仅带有磁场传感头的透射光谱

(b) Transmission spectrum of sensor head without temperature reference arm



(c) 带有温度参考臂和传感头的透射光谱

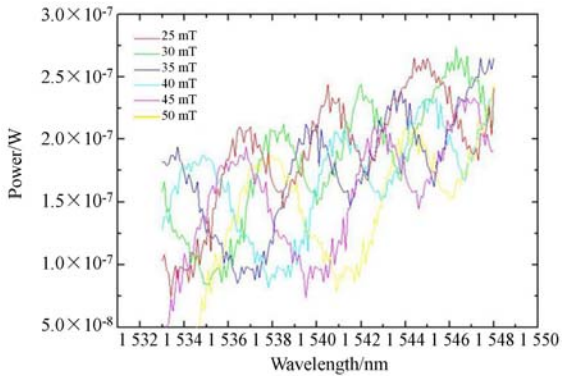
(c) Transmission spectrum of sensor head with temperature reference arm

图 4 不同光路结构的透射光谱

Fig. 4 Transmission spectra with different experimental setup

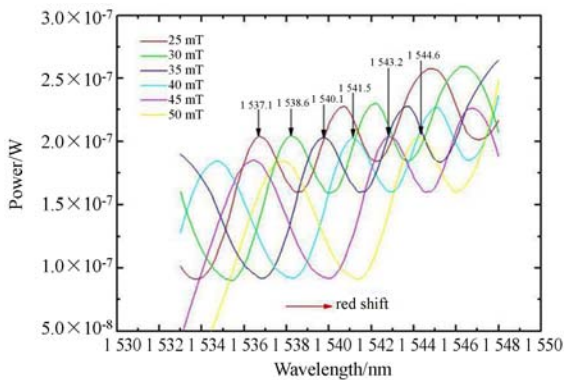
受外界环境微小扰动的影响, 这些光谱存在一定的畸变, 无法直接用于实验分析, 需对这些光谱进

行一定的平滑处理。图 5(b)是平滑处理后的光谱图。由图 5(b)可以看出,随着磁场强度的增加,光谱红移。实验结果符合公式(7)和公式(8)的推断。



(a) 透射谱包络图

(a) Envelope curves of transmission spectrum



(b) 平滑处理后的透射谱包络

(b) Envelope curves of transmission spectrum after smoothing

图 5 MZ 干涉的磁场传感透射光谱

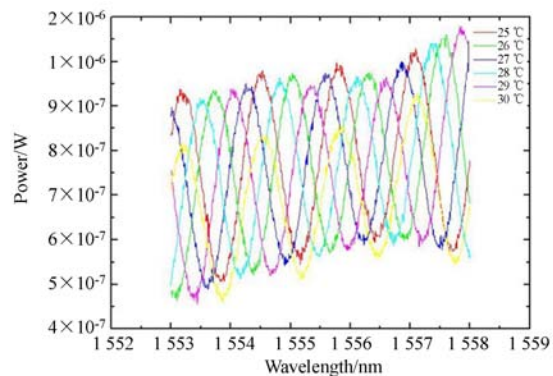
Fig. 5 Transmission spectra of MZ interference magnetic field sensing

3.4 温度传感

和磁场传感一样,将所有 SMF 粘贴固定在实验平台上。在传感头下放置一温度加热器,该温度加热器集成温度传感系统,可在加热过程中实时显示传感头的温度。实验中,只控制传感头的温度变化,在此过程中,使温度由室温 25 °C 变化到 30 °C,通过光谱仪观察透射光谱在 1 553~1 558 nm 的变化,每隔 1 °C 记录一个对应该温度的光谱,对不同温度下的光谱进行整理,得到 MZ 干涉的温度传感透射光谱如图 6(a)所示。

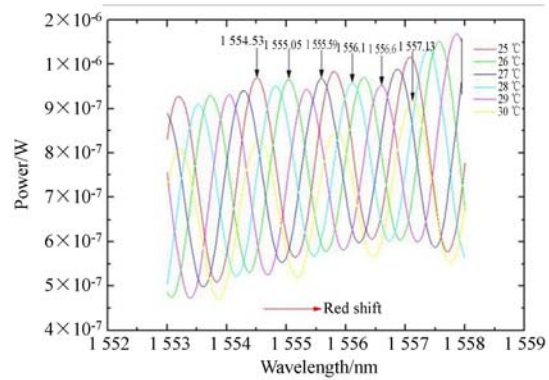
图 6(a)反映了不同温度下的光谱情况,受外界环境微小扰动的影响,这些光谱同样存在一定

的畸变,不能直接用于实验分析,需对这些光谱进行一定的平滑处理。图 6(b)是平滑处理后的光谱图。由图 6(b)可以看出,随着温度的升高,光谱红移。实验结果符合公式(6)的推断。



(a) 透射光谱

(a) Transmission spectrum



(b) 平滑后的透射光谱

(b) Transmission spectrum after smoothing

图 6 MZ 干涉的温度传感透射光谱

Fig. 6 Transmission spectra of MZ interference temperature sensing

3.5 实验结果分析

磁场传感时,光信号经过传感头后,一部分光受锥形结构过渡区的作用被激发到高阶模式,进入磁凝胶和包层区域传输;另一部分继续在纤芯中传输。磁凝胶折射率随外界磁场变化发生变化,导致磁凝胶和包层区域传输光相比纤芯中传输光的光程发生改变。当两束光在另一过渡区相遇时,由相位差引起干涉,表现为随磁场强度的增加,干涉光谱包络红移。在室温下磁场强度为 25~50 mT 时,对磁场强度与干涉谱部分波峰光波波长进行线性拟合,拟合线性度为 0.999 39,灵敏度为 0.301 14 nm/mT。图 7 下部为 MZ 干涉

磁场对光谱波长的特性曲线。

温度传感时,传感头内锥形光纤随外界温度变化发生微小形变,导致传感头纤芯内的光的光程随温度的变化发生改变。经过传感头的光与参考臂的光在耦合器 2 相遇时,因相位不同引起干涉,且随着温度的升高,干涉光谱红移。在磁场强度为 0,温度由 25 °C 升高到 30 °C 时,对温度与光

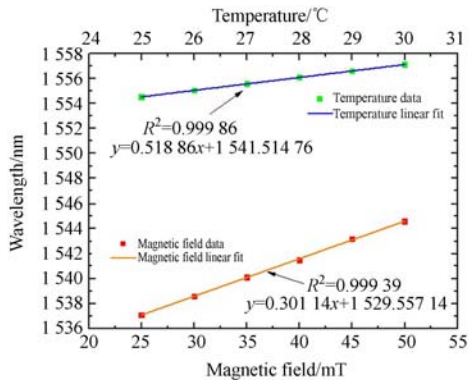


图 7 MZ 干涉传感的波长特性曲线

Fig. 7 Characteristics curves of MZ interference magnetic field sensing and temperature sensing

参考文献:

- [1] XU S, LI W, XING F, *et al.*. An elimination method of temperature-induced linear birefringence in a stray current sensor[J]. *Sensors*, 2017, 17(3):551.
- [2] KRAUS H, SOLTAMOV V A, FUCHS F, *et al.*. Magnetic field and temperature sensing with atomic-scale spin defects in silicon carbide[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5303.
- [3] ZU P, CHAN C C, LEW W S, *et al.*. Temperature-intensive magnetic field sensor based on nanoparticle magnetic fluid and photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(2): 491-498.
- [4] BAI Z, ZHANG W, GAO S, *et al.*. Compact long period fiber grating based on periodic micro-core-offset [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(21): 2111-2114.
- [5] 李岩松, 张国庆, 于文斌, 等. 自适应光学电流互感器[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(11): 100-105.
- [6] LI Y S, ZHAO G Q, YU W B, *et al.*. Adaptive

波波线性拟合,拟合线性度为 0.999 86,灵敏度为 0.518 86 nm/°C。图 7 上部为 MZ 干涉温度对光谱波长的特性曲线。

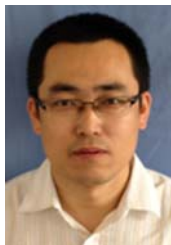
4 结 论

本文设计并提出了基于 MZ 干涉集成化的全光纤磁场与温度传感器。对总长度为 1.2 m 的 SMF 部分进行熔融拉锥,形成长度为 2.7 cm、锥腰直径为 30.1 μm 的锥形微纳光纤,将锥形微纳光纤放置尼龙槽内并包覆磁凝胶作为传感头。传感头两侧的 SMF 通过耦合比为 50% : 50% 的耦合器与带有 VOA 的另一相同长度的 SMF 并联。调节 VOA 使该路光强与另一路光强几乎相等,可实现磁场与温度的传感。透射光谱包络的漂移反映磁场强度的变化,透射光谱的漂移反映温度的变化。室温下磁场强度为 25~50 mT 时,磁场传感器的灵敏度为 0.301 14 nm/mT。在磁场强度为 0,温度由 25 °C 升高到 30 °C 时,温度传感器的灵敏度为 0.518 86 nm/°C。该传感器集成度高、结构紧凑、抗电磁干扰能力强,实验结果可为 MZ 干涉的磁场与温度传感的工程应用提供参考和借鉴。

- [7] optical current transducer [J]. *Proceedings of CSEE*, 2003, 23(11): 100-105. (in Chinese)
- [8] 杨玉强, 杨群, 葛伟, 等. 具有自动补偿超致敏伸缩材料布拉格光栅光纤电流传感器[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10): 2377-2382.
- [9] YANG Y Q, YANG Q, GE W, *et al.*. Temperature compensated GMM-FBG current sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 2377-2382. (in Chinese)
- [10] 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 光纤光栅传感信号解调研究技术进展[J]. *中国光学*, 2014, 7(4): 519-531.
- [11] WU J, WU H P, HUANG J B, *et al.*. Research process in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 519-531. (in Chinese)
- [12] WANG C. Fiber loop ring down-a time-domain sensing technique multi-function fiber optic sensor platforms: current status and design perspectives [J]. *Sensors*, 2009, 9(10):7595-7621.
- [13] SIMA W, LIU T, YANG Q, *et al.*. Temperature

- characteristics of pockels electro-optic voltage sensor with double crystal compensation [J]. *AIP Advances*, 2016, 6(5):055109.
- [10] YAN H, LI P, ZHANG H, *et al.*. A micro S-shape optical fiber temperature sensor based on dislocation fiber splice[J]. *Photonic Sensors*, 2017, 7(4): 372-376.
- [11] 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.
- [12] 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.
ZHAO Y, CAO Y, TONG ZH R, *et al.*. Simultaneous measurement of dual-parameter based on optical fiber magnetic field sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(12): 1206004. (in Chinese)
- [13] CAO Y, ZHAO Y, TONG Z R, *et al.*. Optical fiber magnetic field sensors with peanut-shape structure cascaded with LPFP[J]. *Optoelectronics Letters*, 2016, 12(5): 0358-0360.
- [14] SHEN T, FENG Y, SUN B, *et al.*. Magnetic field sensor using the fiber loop ring-down technique and an etched fiber coated with magnetic fluid[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(4): 673-678.
- [15] WANG Y, TONG Z R, ZHANG W H, *et al.*. Research on optical fiber magnetic field sensors based on multi-mode fiber and spherical structure [J]. *Photoelectronics Letters*, 2017, 13(1): 16-20.
- [16] KITAGAWA S, YAMAZAKI H, KOSOKI A, *et al.*. Development of SPR temperature sensor using Au/TiO₂ on hetero-core optical fiber[J]. *SPIE*, 2016: 97541B.
- [17] SUN H, LUO H, WU X, *et al.*. Spectrum ameliorative optical fiber temperature sensor based on hollow-core fiber and inner zinc oxide film [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 245: 423-427.
- [18] SUN B, SHEN T, FENG Y. Fiber-loop ring-down magnetic field and temperature sensing system based on the principle of time-division multiplexing[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 147: 170-179.
- [19] 陈云海, 陈成, 彭保进, 等. 光纤光栅马赫-曾德尔干涉仪条纹信号的傅里叶分析[J]. *光子学报*, 2016, 45(9): 0906002.
CHEN Y H, CHEN CH, PENG B J, *et al.*. Fourier analyses for fringe signals of fiber grating based on Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(9): 0906002. (in Chinese)
- [20] 刘洋, 钟年丙, 陈明, 等. 精确测量微藻生物量的塑料光纤倏逝波传感器[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 151-158.
LIU Y, ZHONG N B, CHEN M. Plastic optical fiber evanescent wave sensor for accurate measurement of microalgae biomass [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 151-158. (in Chinese)

作者简介:



沈涛(1978—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授,硕士生导师,2016年于哈尔滨理工大学获得博士学位,主要从事光电检测技术与电光材料特性的研究。E-mail: taoshenchina@163.com



孙滨超(1991—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,2015年于哈尔滨理工大学获得学士学位,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: binchaosun@126.com