

基于酒精与磁流体填充的单模-空芯-单模光纤结构温度磁场双参数传感器

赵勇 蔡露 李雪刚 吕日清

A modal interferometer based on single mode fiber-hollow core fiber-single mode fiber structure filled with alcohol and magnetic fluid for simultaneously measuring magnetic field and temperature

Zhao Yong Cai Lu Li Xue-Gang Lü Ri-Qing

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 070601 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.070601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

啁啾相移光纤光栅分布式应变与应变点精确定位传感研究

Phase shift chirped fiber Bragg grating based distributed strain and position sensing

物理学报.2017, 66(7): 070702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070702>

基于⁸⁷Rb原子的大失谐光晶格的设计与操控

Design and control of large-detuned optical lattice based on ⁸⁷Rb atoms

物理学报.2017, 66(1): 010701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.010701>

基于本征荧光的生物气溶胶测量激光雷达性能

Research and analysis on lidar performance with intrinsic fluorescence biological aerosol measurements

物理学报.2016, 65(20): 200701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.200701>

一种以压力一维均匀分布为特征的长条形对顶压砧

A strip anvil apparatus with linear uniform pressure distribution

物理学报.2016, 65(10): 100701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.100701>

基于材料反射率谐振特性测试电磁参数的自由空间法

A novel free-space method of measuring of electromagnetic parameters based on the resonance property of reflectivity

物理学报.2012, 61(22): 220601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.220601>

专题: 光纤传感

编者按 传感器技术近年来迅猛发展,已经逐步成为当代科技发展水平的重要标志,与通信技术、计算机技术并称信息产业三大支柱.在传感器家族中,光纤传感器以其体积小、重量轻、灵敏度高、响应速度快、抗电磁干扰、耐恶劣环境、可多参量测量、易于集成,可组成光纤传感网络并接入互联网的特点,处于传感器技术发展的前沿,现已广泛应用于航空航天、石油化工、电子电力、土木工程、生物医药等领域.光纤传感技术的形式主要体现为分立式和分布式:分立式光纤传感技术利用光纤敏感器件作为传感器来感知被测量的变化,光纤作为光信号的传输通道连接光源、光纤传感器及后端的解调装置;分布式光纤传感系统基于光纤瑞利散射、拉曼散射或布里渊散射等光学效应,利用光纤本身作为敏感元,可对沿途的光信号进行大范围、长距离传感.

“光纤传感”专题,汇集了各类分立式与分布式光纤传感器的最新研究成果,对其工作机理、关键器件设计等方面的创新研究和发展现状进行介绍.希望通过对传统和各类新型光纤传感器的深入研究,能够进一步推动光纤传感理论与技术的发展,让光纤传感器在更多领域找到用武之地,更好地服务国家建设,改善人民生活,保卫国家安全.

(客座编辑: 天津大学 刘铁根; 北京大学 龚旗煌)

基于酒精与磁流体填充的单模-空芯-单模光纤结构 温度磁场双参数传感器*

赵勇^{1)2)†} 蔡露¹⁾ 李雪刚¹⁾ 吕日清¹⁾

1) (东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

2) (东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110819)

(2016年9月9日收到; 2016年12月7日收到修改稿)

提出了一种基于空芯光纤模间干涉原理的环境温度和磁场双参数传感器,为了使光入射进空芯光纤壁中,将空芯光纤与单模光纤错位熔接,传感部分用毛细玻璃管封装,空芯光纤内外分别填充酒精和磁流体.除了光纤材料的热光效应和热膨胀效应外,环境温度变化会引起两种溶液折射率的变化,而磁场变化仅引起空芯光纤外的磁流体折射率变化.理论计算可知空芯光纤壁中可支持多个模式传输并相互干涉,各模式传输相位对内外溶液折射率变化灵敏程度不同.因此,干涉谱中两个含有不同模式成分的波谷,即波谷1和波谷2,它们的漂移可以作为指示信号,通过建立敏感矩阵可同时解调出周围环境温度与磁场的变化.实验中,在28—58 °C范围内,温度传感灵敏度可达 $-468 \text{ pm}/^\circ\text{C}$;在0—169 Oe范围内磁场传感灵敏度可达 $82 \text{ pm}/\text{Oe}$.该传感器具有高灵敏度与高机械强度,并且能够实现温度与磁场的同时测量,有效消除了温度波动对磁场测量信号的干扰.

关键词: 磁流体, 空芯光纤, 模间干涉, 光纤传感

PACS: 06.30.Ka, 07.05.Fb, 07.07.Df, 07.55.Ge

DOI: 10.7498/aps.66.070601

* 国家自然科学基金(批准号: 61425003, 61273059, 51607028)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaoyong@ise.neu.edu.cn

1 引言

磁场的测量在许多领域如航空航天、海底环境监测等都是一个重要的环节. 近几年, 光纤磁场传感器因其体积小、重量轻、精度高, 能够适应恶劣的检测环境和可实现远距离传感等优点成为国内外学者密切关注的研究课题. 而磁流体作为一种光与磁场的媒介, 被广泛地引入光纤磁场传感器中. 磁流体^[1], 又称为磁性液体、铁磁流体或磁液, 是由强磁性粒子、基液以及表面活性剂三者混合而成的一种稳定的胶状溶液. 当外加磁场作用时, 磁性粒子结成链状, 沿磁场方向有序排列, 这导致了磁流体等效介电常数发生变化, 从而使其折射率发生改变. 利用磁流体的折射率可控特性与光纤传感器相结合, 可以间接测量出外界磁场的变化. 目前已实现的基于磁流体的光纤磁场传感器有 Fabry-Perot 微腔磁场传感器^[2], 锥形光纤磁场传感器^[3], 光子晶体光纤磁场传感器^[4], 模间干涉型光纤磁场传感器^[5]等. 在众多光纤传感器类型中, 模间干涉光纤传感器因其结构灵活、制备工艺简单、成本低廉, 近年来备受关注^[6-8]. 模间干涉光纤传感器是利用模式不匹配结构实现多种模式的激发. 由于高阶模式更容易受外界环境变化, 如温度、折射率、曲率等参数变化的影响, 因此引起模式间相位差的变化, 最终反映在干涉光谱上即特征波长的移动或能量的线性变化. 利用这一传感原理, 结合特种光纤, 如空芯光纤 (hollow core fiber, HCF)^[9]、锥形光纤^[10]等, 可以实现高灵敏度的折射率测量, 进而实现磁场传感. 2013年, Wang等^[11]在《Optics Letters》上发表的一篇文章将经典的单模-多模-单模光纤结构与磁流体结合, 制作成模间干涉磁场传感器, 测量磁场灵敏度达 -16.86 pm/Oe . 2014年, Dong等^[12]将单模光纤错位熔接节点与锥形熔接节点级联, 实现内嵌式的 Mach-Zehnder 模式干涉仪, 将其浸没在磁流体液体中测量磁场, 灵敏度可达 26 pm/Oe . Song等^[13]将空芯光纤与单模光纤错位熔接, 形成模间干涉结构, 在结构外面包覆磁流体并用毛细管封住, 测量磁场灵敏度可达 -0.02173 dB/Oe . Liu等^[14]将U形单模光纤固定在基底上, 传感部分浸没在磁流体中并用聚四氟乙烯套管封住, 实现高灵敏度的磁场传感, 波长和强度灵敏度分别可达 0.374 nm/Oe 和

-0.4821 dB/Oe .

在磁场测量过程中, 环境温度的变化常常带来扰动, 为测量增加不准确性, 同时, 温度在生产过程中也是一个重要的参数. 因此, 设计一种磁场与温度双参数同时测量的光纤传感器是十分有意义的工作. Zhao等^[15]设计一种将磁场传感部分与布拉格光纤光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 级联的结构, 实现对温度的补偿, 但是温度测量灵敏度较低. Wu等^[16]利用多模光纤内模式热光系数相近的性质实现不易受温度扰动的磁场传感, 但是温度影响仍不能消除; Peng等^[17]制作基于光子晶体光纤的温度不敏感磁场传感器, 但磁场灵敏度较低. 因此, 本文设计了一种基于模式间干涉原理的温度磁场双参数同时测量的光纤传感器, 利用单模光纤与空芯光纤的错位熔接点将光导入空芯光纤壁中传播, 形成模间干涉效应. 并利用空芯光纤内外填充的不同液体的热光效应以及磁流体的折射率可调谐效应, 将外界的温度变化与磁场变化转化为液体折射率的变化, 进而改变各模式相位, 将这一变化体现在干涉谱中. 选取干涉谱中两个含有不同模式成分的波谷, 检测其漂移量并建立敏感矩阵, 即可同时解调出磁场与温度的变化. 与参考文献^[16]比较, 本文所提出的传感器不仅能够将双参数同时解调出来, 并且都具有较高的灵敏度, 温度传感灵敏度可达 $-468 \text{ pm/}^\circ\text{C}$, 磁场传感灵敏度可达 82 pm/Oe , 灵敏度数值甚至高于单独测量磁场^[11,18-21]或温度^[22-26]的同类型光纤传感器.

2 传感原理

传感器结构示意图见图1. 宽谱光从一段单模传输光纤进入第一个单模-空芯光纤错位熔接点, 由于模式的不匹配, 一部分光损耗, 一部分光在空芯光纤壁中继续传播. 空芯光纤壁中可以容纳多个传导模式, 这些模式以不同的传播常数轴向传播并且发生模式间干涉, 在第二个融接点处一部分光重新进入单模光纤中向前传播. 当外界参量 (如温度、折射率、应变等) 的改变施加在光纤上时, 这些模式的相位发生变化, 输出光中携带被测量信息, 最终被解调设备接收. 本文中利用模间干涉结构对温度和折射率 (RI) 敏感的特性, 而获得外界磁场和温度的信息.

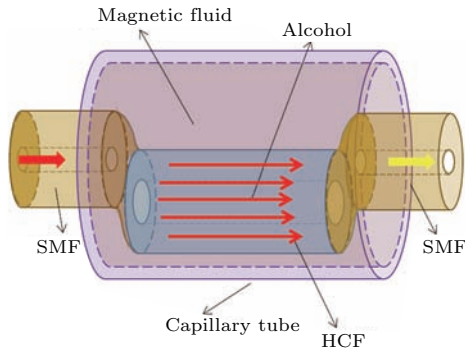


图1 单模-空芯-单模光纤错位熔接内填酒精外封磁流体结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of offset spliced single mode-hollow core-single mode fiber with inside alcohol and outside magnetic fluid.

值得一提的是,空芯光纤作为一种特种光纤,其横截面为同心圆环.当光在空芯光纤壁中传输时,模场分布是轴对称的而非中心对称或圆对称,并且各模式在空芯光纤与外部介质的内外交界面处倏逝场的能量不同.这将导致同一模式对环内外介质折射率变化的灵敏度不同.分别计算了LP₀₁, LP₃₁, LP₅₁, LP₇₁四个模式的有效折射率随环内、

外折射率变化而变化的曲线如图2所示,当只改变空芯光纤环内折射率时,环外折射率 N_{out} 设定为1,反之环内折射率 N_{in} 为1.此时由于光纤对低阶模式的束缚能力相对更强,LP₀₁与LP₃₁模式分布靠近石英管壁的中层,因此对环内外折射率变化的灵敏度均较低.而LP₅₁与LP₇₁模式对环内外折射率变化的灵敏度则均表现出较大差异.当环内外折射率同时变化时,可以看出对于LP₅₁与LP₇₁模式,环外折射率变化带来了更大贡献,并且LP₅₁模式的灵敏度更高.这说明各模式间对环境介质折射率变化的敏感程度也有很大差异.

因此,如果在干涉谱中选择两个不同阶数模式参与的波谷作为特征波谷(波谷1和波谷2),其波长移动可表示为:

$$\Delta\lambda_{T1} = a_1k_1\Delta T + a_2k_2\Delta T + a_{01}\Delta T, \quad (1a)$$

$$\Delta\lambda_{T2} = a_3k_1\Delta T + a_4k_2\Delta T + a_{02}\Delta T, \quad (1b)$$

$$\Delta\lambda_{G1} = a_1k_3\Delta G + a_2k_4\Delta G, \quad (1c)$$

$$\Delta\lambda_{G2} = a_3k_3\Delta G + a_4k_4\Delta G, \quad (1d)$$

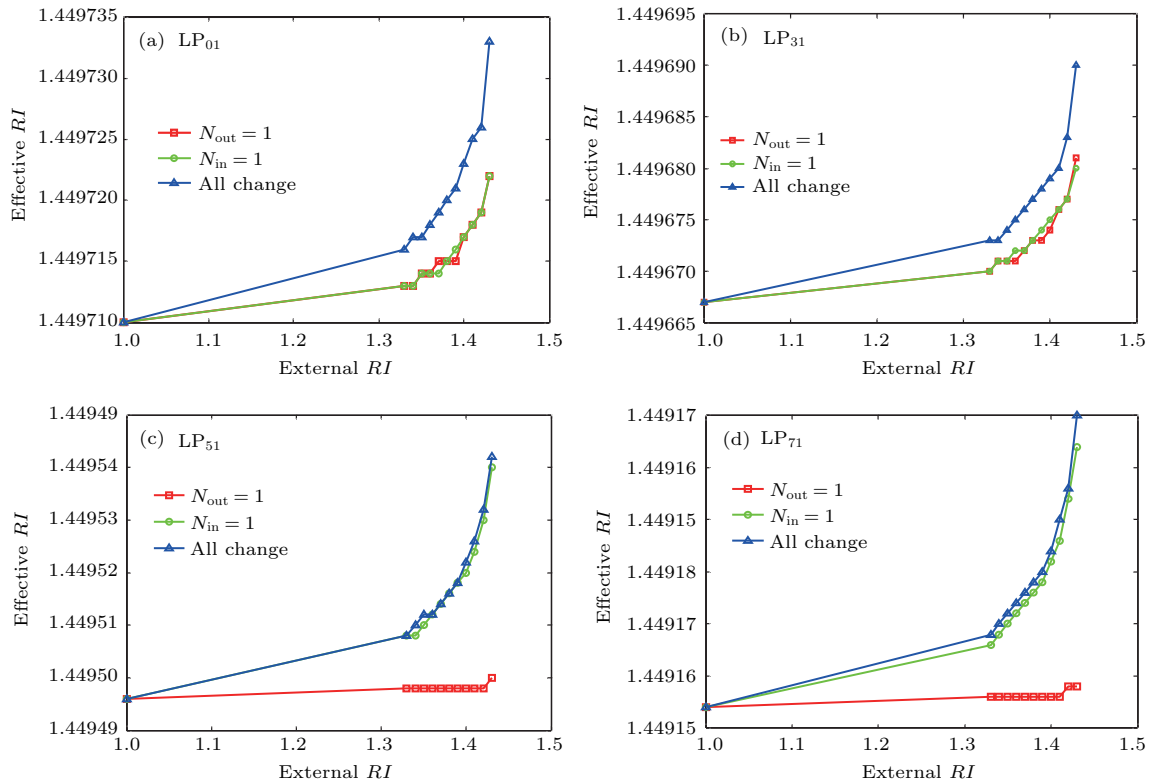


图2 (a) LP₀₁, (b) LP₃₁, (c) LP₅₁, (d) LP₇₁ 四个模式有效折射率分别随着空芯光纤内、外以及同时的折射率变化而变化的曲线

Fig. 2. Effective refractive indices change of (a) LP₀₁, (b) LP₃₁, (c) LP₅₁ and (d) LP₇₁ with changed inside, outside and both refractive index.

其中, $\Delta\lambda_{T1}$ 和 $\Delta\lambda_{T2}$ 分别为由温度变化引起的特征波谷 1 和波谷 2 的波长漂移量; $\Delta\lambda_{G1}$ 和 $\Delta\lambda_{G2}$ 分别为是由磁场变化引起的波谷 1 和波谷 2 的波长漂移量; ΔT 和 ΔG 分别为温度变化和磁场变化; k_1 和 k_2 分别为环内介质和环外介质的热光系数, k_3 和 k_4 为环内外介质折射率对磁场变化的变化率; a_1, a_2, a_3 和 a_4 分别为波谷 1 和波谷 2 对环内、外介质折射率变化的波长灵敏度; a_{01} 和 a_{02} 为光纤材料本身热光效应和热膨胀效应造成的波谷 1 和波谷 2 漂移的温度灵敏度系数, 由于参与的模式不同, 因此热光系数稍有差别, $a_{01} \neq a_{02}$. 为了提高温度测量的灵敏度, 本文中选择在环内填充酒精(无水乙醇)作为温度增敏介质, 其折射率 $n_1 = 1.362@20^\circ\text{C}$, 热光系数 $k_1 = -3.98 \times 10^{-4}$. 环外填充水基磁流体作为磁性敏感介质, 折射率 $n_2 \approx 1.435@20^\circ\text{C}$, 热光系数 $k_2 = -8 \times 10^{-5}$, 最外层用石英毛细管封装. 由于酒精的折射率并不受外界磁场变化的影响, 因此 $k_3 = 0$. 当温度和磁场同时变化时, 建立敏感矩阵:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1k_1 + a_2k_2 + a_{01} & a_2k_4 \\ a_3k_1 + a_4k_2 + a_{02} & a_4k_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta G \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 分别是波谷 1 和波谷 2 的波长移动量. 如果能够在传感器的干涉谱中找到两个波谷, 其灵敏度系数使等式成立, 那么就能通过建立敏感矩阵求解出温度和磁场的变化.

3 传感器特性分析

3.1 传感器的制作与填充

制作传感探头过程中使用的单模光纤是 Corning 公司生产的 SMF-28, 纤芯、包层直径分别为 8.2 和 125 μm ; 所用空芯光纤外径 150 μm , 内径 50 μm . 中间段空芯光纤长度 46 mm, 未熔接前将其固定在载玻片上, 并在其一端处滴酒精. 将载玻片放置在显微镜下观察, 由于毛细现象, 酒精缓慢进入空芯光纤中, 如图 3(a) 所示. 由于酒精无色透明, 且折射率更接近空芯光纤壁, 因此在显微镜下观察到被填充的部分变为图中左侧透明状. 之后将填充酒精的光纤与两段单模光纤熔接, 所用熔接机型号为 FETEL178, 选择手动熔接程序, 调整错位量为 50 μm 左右, 如图 3(b). 电弧放电时, 放置在右侧的空芯光纤有轻微塌陷, 且两种光纤边缘处由于电弧高温而失去棱角, 融为一体形成圆滑的

类似于 S 形的流线, 将空芯光纤内的酒精牢牢密封住. 最后, 将内径为 1 mm 左右的毛细玻璃管套在单模-空芯-单模光纤结构外, 同样利用毛细现象将折射率为 1.43 左右的水基磁流体填充进管内. 由于水基磁流体黏度较小, 流动性大, 毛细管内填满之后迅速用热熔胶封住两端, 如图 3(c) 所示, 图 3(c) 下方插图是显微镜下观察到的毛细管局部放大图. 可以看出毛细管内均匀填充有黑红色磁流体, 而单模-空芯-单模光纤结构被包裹在磁流体中无法几乎无法分辨出来.

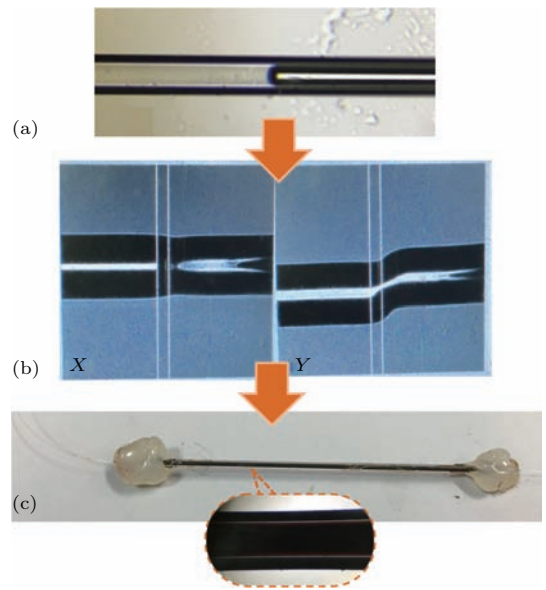


图 3 传感器制作过程 (a) 毛细作用将酒精填入空芯光纤局部图; (b) 错位熔接时 X 和 Y 方向显微图; (c) 封装后的传感器实物图

Fig. 3. Fabrication process of proposed sensor: (a) Local image of hollow core fiber filled with alcohol by capillary effect; (b) microscope images of offset splicing joint in X and Y directions; (c) photograph of packaged sensor.

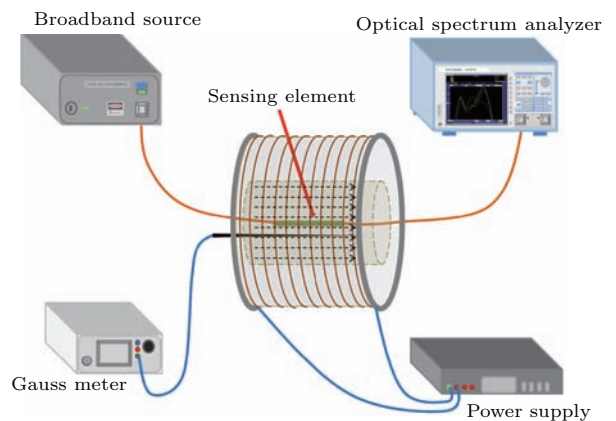


图 4 传感系统结构示意图
Fig. 4. Schematic diagram of sensing system.

接下来将传感器两端的单模光纤与C波段宽谱光源和光谱分析仪连接,如图4所示,传感器系统便初步搭建完毕.

3.2 温度特性

在未套入外层毛细管时,对单模-空芯-单模光纤结构进行了温度特性测试.将该结构放入恒温箱中,随着温度升高用光谱仪记录透射光谱的变化,并将特征波长的移动量记录下来,如图5所示.在26—56 °C的范围内,随着温度的升高,1540 nm附近的波谷向短波长方向移动,这是因为酒精的热光系数为负数,而空芯光纤管壁中的多模干涉光谱会随着其周围折射率的升高而向长波长移动.从图2中可以知道空芯光纤内、外折射率变化导致各模式有效折射率的变化趋势是一致的,因此为了验证这一解释,对单模-空芯-单模光纤错位熔接并填充酒精的结构进行折射率特性测试,如图6所

示.对1535 nm附近的波谷在折射率变化范围为1—1.4285内进行监测,波谷位置用黑色三角标出.

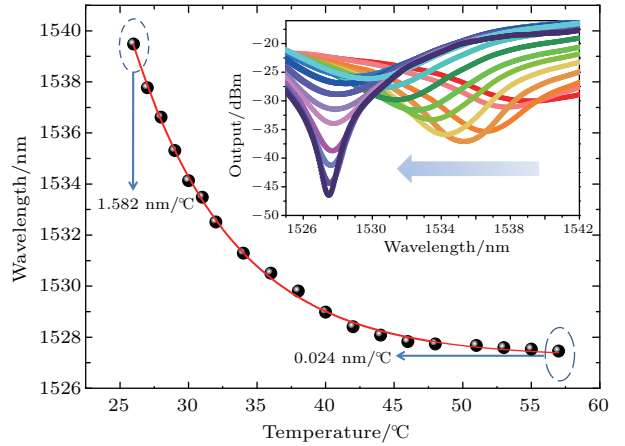


图5 单模-空芯-单模光纤错位熔接填充酒精结构的温度特性

Fig. 5. Temperature characteristic of single mode-hollow core-single mode fiber structure filled with alcohol.

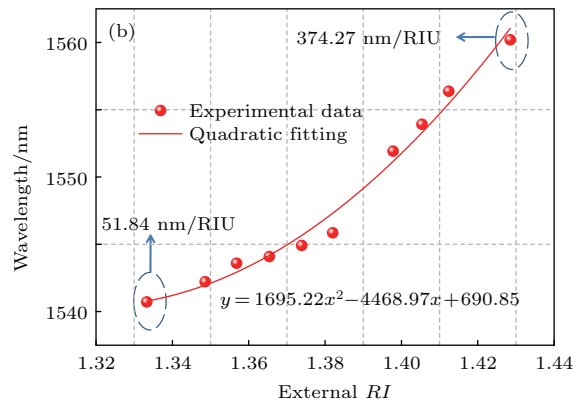
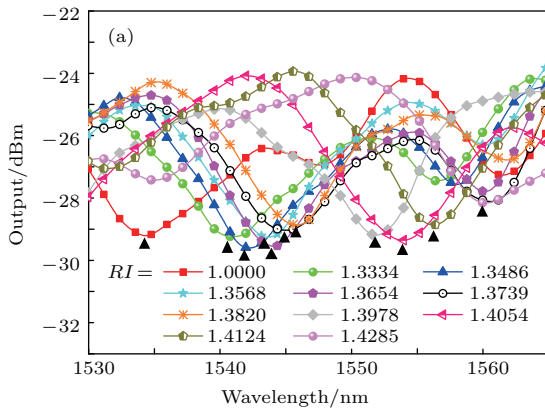


图6 单模-空芯-单模光纤错位熔接填充酒精结构的折射率特性

Fig. 6. Refractive index characteristic of single mode-hollow core-single mode fiber structure filled with alcohol.

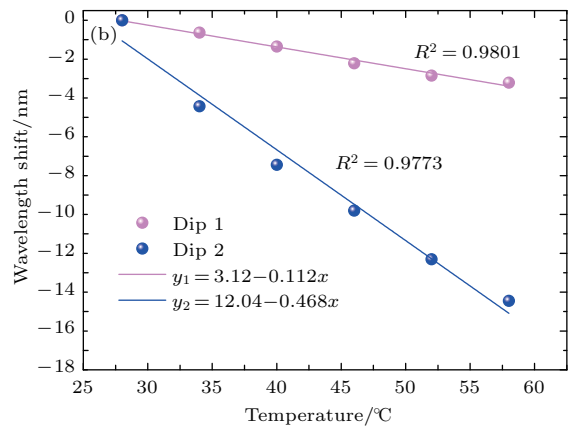
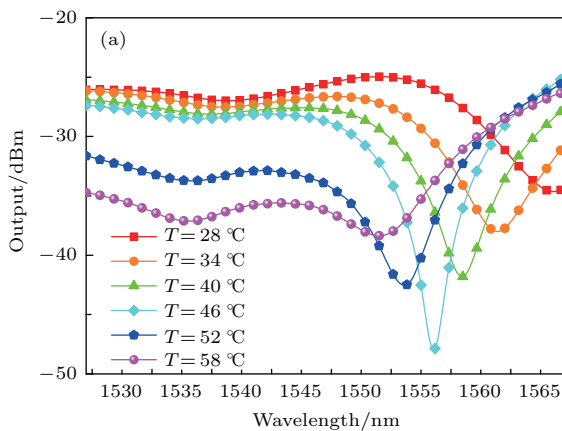


图7 单模-空芯-单模光纤错位熔接填充酒精外部封装磁流体结构的温度特性

Fig. 7. Temperature characteristic of MF packaged single mode-hollow core-single mode fiber structure filled with alcohol.

可以看出随着外界折射率的增加,图 6(a)中的光谱随之红移,且折射率越高,移动的灵敏度越高.根据图 6(b)中拟合曲线可知当折射率为 1.3334 时灵敏度为 51.84 nm/RIU,当折射率为 1.4285 时灵敏度为 374.27 nm/RIU.因此,对于图 5 中的温度特性曲线,当温度升高时,酒精折射率降低,干涉谱发生蓝移,而酒精折射率降低将使干涉谱的移动灵敏度降低,对应图 6(b)中的二次拟合曲线,造成特征波长随温度升高而移动的曲线斜率降低.图 5 中的温度灵敏度在温度为 26 °C 时为 -1.582 nm/°C,56 °C 时灵敏度为 -0.024 nm/°C.

接下来在单模-空芯-单模光纤结构的基础上外加毛细玻璃管并填充磁流体后进行封装.对此结构进行温度特性测试,同样将其放入恒温箱,控制恒温箱的温度在 28—58 °C 之间变化,其透射谱移动情况如图 7(a)所示.由于填充了磁流体,原先的纤芯-包层-空气三层波导结构折射率分布改变,各模式有效折射率发生变化,因此干涉谱形貌有所改变.光谱中出现了波谷 1 和波谷 2 两个波谷,分别在 1540 和 1565 nm 附近,从图中可以看到波谷 1 较浅,消光比只有 3 dB 左右,而波谷 2 的消光比明显高于波谷 1,最高时可达 20 dB.这是由于光从单模光纤到空芯光纤中传播时激发出多个传导模式,而这些模式的传播常数和激励系数不同,也就是说它们的有效折射率和能量强度不同.这导致发生干涉时的相位和干涉强度都有所差异,表现在干涉谱中就是不同位置的波谷是由不同的模式参与干涉形成的.而且如图 2 中所描述的,各模式间对环境介质折射率变化的敏感程度有很大差异,各模式的热光系数也不尽相同,所以波谷 1 和波谷 2 的温度特性有较大差异.如图 7(b)所示,可以看出,波谷 1 和波谷 2 在 28—58 °C 范围内的温度灵敏度分别为 -0.112 nm/°C 和 -0.468 nm/°C,波谷 2 的灵敏度是波谷 1 的 4 倍,而我们知道灵敏度相差较大更有利于对双参数同时解调.实验中只将传感器加热至 60 °C 左右是因为更高的温度容易引起酒精沸腾(沸点 70°左右),且有可能改变磁流体的性质.

3.3 磁场特性

将设计的传感结构沿平行磁场强度的方向放入图 4 所示的线圈中,高斯计探针与传感结构平行,实时检测线圈内磁场强度.为防止线圈通电后发热

使周围介质温度升高,线圈与水冷装置连接,保证其温度始终保持在室温(28 °C).实验中,通过调节电源电压和电流来改变由电生磁效应而在线圈中产生的磁场,线圈内磁场从 0 Oe 变化到 169 Oe,每间隔 42 Oe 变化一次,每次稳定 30 min,用光谱仪记录下光谱的变化,如图 8(a)所示.可以看到,波谷 1 和波谷 2 都随着磁场强度的增加而向长波长方向移动,但是波谷 2 的移动量明显大于波谷 1.这是因为当传感器平行于磁场方向时,磁流体的折射率会随着外界磁场的增加而增大^[27],由图 6 的结论可知,当折射率增大时,光谱会发生红移,所以外界磁场强度与干涉波谷的波长之间存在正比例关系.又由于波谷 1 和波谷 2 是不同阶模式参与而形成的,他们在光纤横截面方向的能量分布不同,有效折射率也不同,因此对外界折射率变化的敏感程度不同.将这两个波谷的移动量记录下来绘制成图 8(b),由此可知波谷 1 与波谷 2 的磁场灵敏度分别为 0.082 nm/Oe 和 0.037 nm/Oe.

4 温度与磁场双参数解调

目前为止,通过对单模-空芯-单模光纤错位熔接结构内部填充酒精外部封装磁流体的结构分别进行温度特性和磁场特性的实验测试,我们可以获得(2)式灵敏度系数矩阵中的四个参数 $a_1k_1 + a_2k_2 + a_{01}$, a_2k_4 , $a_3k_1 + a_4k_2 + a_{02}$, a_4k_4 , 它们分别是 -0.112, -0.468, 0.082 和 0.037.对该矩阵求逆矩阵,代入(2)式可得

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta G \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -0.112 & -0.468 \\ 0.082 & 0.037 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1.081 & 13.671 \\ -2.395 & -3.272 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

因此,当环境的温度和磁场强度同时变化时,只要从光谱中读出波谷 1 和波谷 2 的移动量 $\Delta \lambda_1$ 和 $\Delta \lambda_2$,就可以通过(3)式分别求出温度和磁场强度的变化量^[25].从表 1 列出的各传感器性能参数可以看出,与此前的报道相比^[11,18-26],该传感器结构具有较好的温度和磁场灵敏度,并且在额外增加 FBG、长周期光纤光栅等器件的情况下解决了交叉敏感问题,结构简单,易于实现.

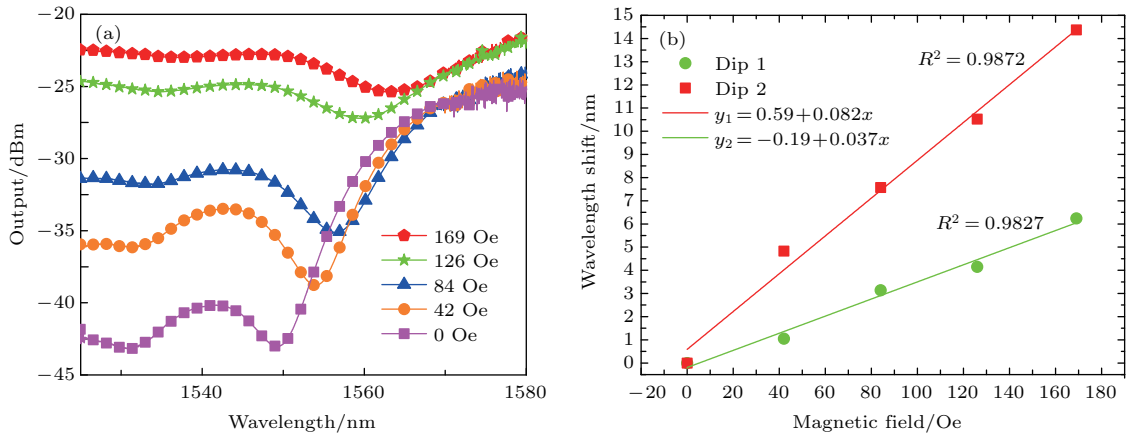


图8 单模-空芯-单模光纤错位熔接填充酒精外部封装磁流体结构磁场特性

Fig. 8. Magnetic field characteristic of MF packaged single mode-hollow core-single mode fiber structure filled with alcohol.

表1 不同结构传感器的磁场、温度传感器灵敏度对比

Table 1. Comparison among magnetic field and temperature sensitivities for different structures of sensors.

磁场传感			温度传感		
参考文献	传感结构	灵敏度/ $\text{pm}\cdot\text{Oe}^{-1}$	参考文献	传感结构	灵敏度/ $\text{pm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$
[11]	被腐蚀的无芯光纤	16.86	[22]	多模光纤-细芯光纤	61.5
[18]	FP腔	11.73 (117.3 pm/mT)	[23]	双凸锥级联	70
[19]	双凸锥级联	32.53 (325.3 pm/mT)	[24]	多模-单模-多模光纤结构	88
[20]	S形拉锥	16.2 (162.06 pm/mT)	[25]	单模-多模-单模光纤反射式外加套管	92.6
[21]	方形无芯光纤	-18.7	[26]	单模-空芯-单模光纤锥形熔接	9.3
本文	空芯光纤错位熔接 内外填充不同液体	82			486

5 结 论

本文提出一种能够同时测量环境温度和磁场的高灵敏度光纤传感器, 温度和磁场强度的传感灵敏度最高可达 $-468 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 与 $82 \text{ pm}/\text{Oe}$. 该传感器分别利用空芯光纤内、外填充的酒精与磁流体折射率受温度和磁场调谐的性质来实现高灵敏度的传感. 与此同时, 空芯光纤的特殊结构使得所激励的多种模式模场分布不对称, 不同模式对外界环境变化的灵敏度不同. 这一特点使得在干涉谱中找到两个灵敏度不同的波谷成为可能, 进而可以通过建立灵敏度矩阵解调出双参数. 与已有的模间干涉传感器相比, 本文提出的传感器具有两个突出优点: 首先, 它表现出更高的温度和磁场灵敏度, 这是由所填充液体的热光效应和磁调谐效应带来的, 是光纤本身的热光效应与热膨胀效应不能比拟的; 其次, 它在不增加其他光纤器件的前提下实现温度、

磁场双参数的解调, 为将来在实际应用中解决温度交叉敏感问题提供了很好的思路.

参考文献

- [1] Zhao Y, Hu T 2010 *Sensors and Detection Technology* (Beijing: China Machine Press) p106 (in Chinese) [赵勇, 胡涛 2010 传感器与检测技术 (北京: 机械工业出版社) 第106页]
- [2] Zhao Y, Lü R Q, Wang D, Wang Q 2014 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **63** 9
- [3] Layeghi A, Latifi H, Frazao O 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 19
- [4] Zhao Y, Wu D, Lü R Q 2015 *IEEE Photon. Techn. Lett.* **27** 1
- [5] Lin W, Miao Y, Zhang H, Liu B, Liu Y, Song B 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 15
- [6] Tripathi S M, Kumar A, Varshney R K, Kumar Y B P, Marin E, Meunier J P 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 13
- [7] Li E, Wang X, Zhang C 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 9

- [8] Wu Q, Semenova Y, Wang P, Farrell G 2011 *Opt. Express* **19** 9
- [9] Liu Y, Liu Z, Chen S, Han M 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 4
- [10] Yang R, Yu Y S, Chen C, Xue Y, Zhang X, Guo J, Wang C, Zhu F, Zhang B, Chen Q, Sun H 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 19
- [11] Wang H, Pu S, Wang N, Dong S, Huang J 2013 *Opt. Lett.* **38** 19
- [12] Dong S, Pu S, Wang H 2014 *Opt. Express* **22** 16
- [13] Song B, Miao Y, Lin W, Zhang H, Liu B, Wu J, Liu H, Yan D 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 22
- [14] Liu T, Chen Y, Han Q, Lu X 2014 *IEEE Photon. J.* **6** 6
- [15] Zhao Z, Tang M, Gao F, Zhang P, Duan L, Zhu B, Fu S, Ouyang J, Wei H, Li J, Shum P P, Liu D 2014 *Opt. Express* **22** 22
- [16] Wu J, Miao Y, Song B, Lin W, Zhang H, Zhang K, Liu B, Yao J 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 25
- [17] Zu P, Chan C C, Wen S L, Hu L, Jin Y, Liew H F, Chen L H, Wong W C, Dong X 2012 *IEEE Photon. J.* **4** 2
- [18] Dong S, Pu S, Huang J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 11
- [19] Pu S, Dong S 2014 *IEEE Photon. J.* **6** 4
- [20] Deng M, Liu D, Li D 2014 *Sens. Actuat. A: Phys.* **211** 5
- [21] Miao Y, Wu J, Lin W, Song B, Zhang H, Zhang K, Liu B, Yao J 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 23
- [22] Li L, Li X, Xie Z, Liu D 2012 *Opt. Express* **20** 10
- [23] Geng Y, Li X, Tan X, Deng Y, Yu Y 2011 *IEEE Sens. J.* **11** 11
- [24] Nguyen L V, Hwang D, Moon S, Moon D S, Chung Y 2008 *Opt. Express* **16** 15
- [25] Zhao Y, Cai L, Li X G 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 12
- [26] Coelho L, Frazão O, Kobelke J, Schuster K, Santos J L 2011 *Opt. Eng.* **50** 10
- [27] Zhao Y, Wu D, Lv R Q, Ying Y 2014 *IEEE Trans. Magn.* **50** 8

SPECIAL TOPIC — Optical Fiber Sensor

A modal interferometer based on single mode fiber-hollow core fiber-single mode fiber structure filled with alcohol and magnetic fluid for simultaneously measuring magnetic field and temperature*

Zhao Yong^{1)2)†} Cai Lu¹⁾ Li Xue-Gang¹⁾ Lü Ri-Qing¹⁾

1) (School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

2) (State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

(Received 9 September 2016; revised manuscript received 7 December 2016)

Abstract

In many fields, such as aerospace and marine environmental monitoring, magnetic field measurement is an important link. In recent years, optical fiber magnetic field sensor has received much attention because of its advantages such as small size, electromagnetic immunity, resistance to erosion and capability of remote sensing. In that case, magnetic fluid as a kind of medium between photons and magnetic field is widely used in optical fiber magnetic field sensors. Moreover, in the process of magnetic field measurement, disturbance introduced by temperature fluctuation always happens and brings uncertainty to the sensor. Temperature is also an important parameter in production process and needs to be measured. Therefore, designing a high-sensitive optical fiber sensor for simultaneously measuring magnetic field and temperature is a valuable work. In this paper, we present a high-sensitive hollow core fiber (HCF) interferometer for simultaneously measuring magnetic field and temperature. A segment of HCF filled with alcohol is inserted into single mode fiber (SMF) with 50 μm offset at two splicing joints to guide light into the wall of HCF. And then this SMF-HCF-SMF structure is packaged by a capillary tube with full magnetic fluid (MF) inside it. Since the modal field area is large enough, the silica wall can support a series of guiding modes among which modal interference occurs and the interference spectrum can be recorded by an optical spectrum analyzer. Besides thermo-optic effect and thermal expansion effect of silica itself, the RI variations caused by thermo-optic effect of alcohol and MF as well as the magneto-optic effect of MF can also cause the phase difference of the guiding modes to change, thereby rendering interference dips movable. Thus, the sensitivity of temperature or magnetic field is higher than those given in some other previous studies. In addition, it is calculated that the effective RI sensitivities of guiding modes for inside and outside liquid are different because of the peculiar non-circular symmetry structure of HCF. So there is a possibility to find two dips in interference spectrum, which are formed with different modes and have various sensitivities to the variations of temperature and magnetic field. Finally, a sensitivity matrix can be built to demodulate those two parameters simultaneously. Experimental results show that within 20–58 $^{\circ}\text{C}$, the temperature sensitivities are 112 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ and 468 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ for dip1 and dip 2 whose magnetic field sensitivities are 37 pm/Oe and 82 pm/Oe within 0–169 Oe, respectively. The proposed sensor possesses high sensitivity and good mechanical strength, and can effectively eliminate the cross disturbances between temperature and magnetic field.

Keywords: magnetic fluid, hollow core fiber, modal interference, optical fiber sensing**PACS:** 06.30.Ka, 07.05.Fb, 07.07.Df, 07.55.Ge**DOI:** 10.7498/aps.66.070601

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 61425003, 61273059, 51607028).

† Corresponding author. E-mail: zhaoyong@ise.neu.edu.cn