光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.04.008

基于磁流体的干涉型光纤温度与磁场双测量传感器

温芳芳[1,2,3*]，李永倩[1,2,3]，王劭龙[1]，华子明[1]，王少康[1]

（华北电力大学 1. 电子与通信工程系；2. 河北省电力物联网技术重点实验室；
3. 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室，河北 保定 071003）

摘　要： 将一种基于磁流体包覆的单模-大芯径多模光纤-单模-单模错位熔接(SMSS)构成的马赫-曾德干涉仪(MZI)和光纤光栅(FBG)相结合，利用磁流体的磁致折变效应和光纤光栅的温度灵敏特性，实现了低成本的温度与磁场双测量。利用光束传播法模拟分析了传感结构的内部光场，确定多模光纤的选型，熔接并制作了传感结构，建立敏感矩阵，实现温度与磁场的同时测量。实验测试结果表明，该传感结构的磁场与温度灵敏度分别为 15.9 pm/Oe 和－161.7 pm/℃。

关键词： 马赫-曾德干涉仪；双参量测量；磁流体；敏感矩阵

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2021)04－0488－05

Interferometric Fiber Optic Temperature and Magnetic Field Measurement Sensor Based on Magnetic Fluid

WEN Fangfang[1,2,3], LI Yongqian[1,2,3], WANG Shaolong[1], HUA Ziming[1], WANG Shaokang[1]

(1. Dept. of Electronic and Communication Engin.; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology;
3. Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology,
North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN)

Abstract: In this paper, a Machzende interferometer (MZI) based on magnetic fluid coated single-mode-large-core multi-mode fiber-single-mode-single-mode dislocation fusion (SMSS) is combined with fiber grating (FBG). By taking advantage of the magnetorefractive effect of magnetic fluid and the temperature-sensitive property of fiber grating, the dual measurement of temperature and magnetic field is realized at low cost. The beam propagation method is used to simulate and analyze the internal light field of the sensing structure, determine the selection of multi-mode fiber, fuse and make the sensing structure, establish the sensitive matrix, and realize the simultaneous measurement of temperature and magnetic field. Experimental results show that the magnetic field sensitivity and temperature sensitivity of the sensor structure are 15.9 pm/Oe and －161.7 pm/℃, respectively.

Key words: Mach-zende interferometer; double parameter measurement; magnetofluid; sensitive matrix

0　引言

磁流体是一种由纳米磁性粒子、基液和表面活性剂组成的黑褐色胶体溶液。磁流体的磁光性质在光学和传感领域都有着广泛的应用[1]，如光调制器[2-3]、可调光学限幅器[4]、电流传感器[5]、磁场传感器[6-8]、微环光开关[9]等。将磁流体作为敏感材料用于磁场传感，设计传感器来探究温度与磁场的双测量，是近年来的研究热点。

2015 年，李超等将无芯光纤和光纤光栅级联，利用磁流体的磁致折射率可调特性和光纤光栅的温

收稿日期：2021－03－22.
基金项目：国家自然科学基金项目(61775057).
* 通信作者：温芳芳

度敏感特性实现了温度与磁场的双测量[10]。2017 年，Qin 等利用磁流体包覆细芯光纤与光纤光栅级联制成反射型多参量光纤磁场传感器[11]。2019 年，梁星等用磁流体代替腐蚀后的光纤光栅的部分包层，制成可实现温度补偿的光纤磁场传感器[12]。

由于腐蚀光纤光栅的危险系数较高，特种光纤的价格较为昂贵。本文采用大芯径的多模光纤与普通单模光纤熔接制成马赫-曾德干涉仪[13]，利用毛细管的毛细作用将磁流体封装在传感结构表面，通过在传感结构右侧级联一个光纤光栅，利用磁流体的磁致折变特性和光纤光栅的温度灵敏特性实现温度与磁场的双测量。实验测得，传感结构对外界磁场的灵敏度为 15.9 pm/Oe，其温度灵敏度为 −161.7 pm/℃。该传感结构具有成本低、结构紧凑且稳固、制作简单等优点，在需要同时测量温度与磁场的传感领域具有应用价值。

1　传感原理

在传统的马赫-曾德干涉仪中，光束经过耦合器分为两路光传输，由于两路光的路径长度不一致，导致两路光束产生相位差，在耦合端形成干涉。由于光纤内部不同模式之间传播速度不同，光纤传感器利用这一原理使光束在光纤中的不同模式中传输，从而产生相位差，由于光束传播的路径长度一致，避免了外界环境对传感长度的干扰，具有较强的抗干扰性能。

单模-大芯径多模光纤-单模-单模错位熔接(SMSS)传感器的干涉光谱主要由基模和包层模中传输的光束干涉形成。假定经过传感长度 L 的传输后，芯模与高阶包层模干涉后的干涉光强表示为

$$I = I_{\text{core}} + \sum_m I^m_{\text{cladding}} + \sum_m 2\sqrt{I_{\text{core}} I^m_{\text{cladding}}} \cdot \cos\left(\frac{2\pi \Delta n^m_{\text{eff}} L}{\lambda}\right) \tag{1}$$

式中，L 是传感区域长度，λ 为光波长，Δn^m_{eff} 为光纤纤芯与包层的折射率差值，受外界环境折射率的影响，I_{core} 和 I^m_{cladding} 分别是芯模和 m 阶包层模的光强。

外界温度与磁场作用于该传感结构会引起纤芯模式与包层模式的传播光束相位发生变化，从而导致干涉光强和峰值波长发生相应的变化。因此，通过检测透射光谱的变化即可获得外界磁场或温度的信息。

本实验中将 SMSS 传感结构和 FBG 级联，当光传输到 FBG 时，满足谐振波长的光会发生反射，其他波长的光携带着调制信息进入光谱仪。当环境温度发生改变时，FBG 周期将随之发生改变，从而导致 FBG 的谐振波长发生偏移，因此，可由 FBG 的波长偏移量获得温度的变化量。

当传感系统所在环境的温度和磁场同时发生改变，且各自的变化量分别为 Δt 与 ΔH 时，SMSS 传感结构和 FBG 的波长偏移量可以表示为如下矩阵：

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{SMSS}} \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{H,\text{SMSS}} & K_{t,\text{SMSS}} \\ K_{H,\text{FBG}} & K_{t,\text{FBG}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta H \\ \Delta t \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中，$\Delta\lambda_{\text{SMSS}}$ 与 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 分别表示 SMSS 传感结构和 FBG 的波长偏移量，$K_{H,\text{SMSS}}$ 与 $K_{t,\text{SMSS}}$ 分别为 SMSS 传感结构的磁场与温度灵敏度，$K_{H,\text{FBG}}$ 与 $K_{t,\text{FBG}}$ 分别为 FBG 的磁场与温度灵敏度。

2　实验与结果分析

2.1　传感结构

本文采用的传感结构如图 1 所示，实验采用南京吉隆公司型号为 KL-260 的光纤熔接机和型号为 KL-21 的光纤切割刀将单模光纤和多模光纤熔接成图 1 所示结构。将 Ferrotec 公司型号为 EMG605 的水基磁流体和传感结构封装于内径为 500 μm 的毛细玻璃管中，使磁流体成为传感结构直接接触的外环境，最后在传感结构的右侧级联一个反射率为 87.754%、中心波长为 1 554.99 nm 的光纤光栅。

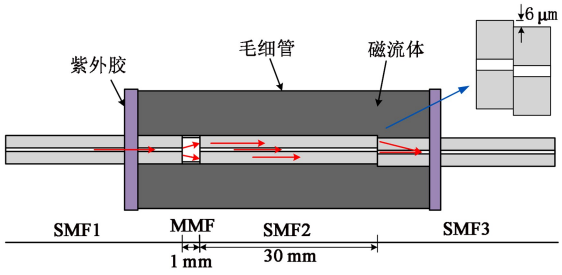


图 1　传感器结构示意图

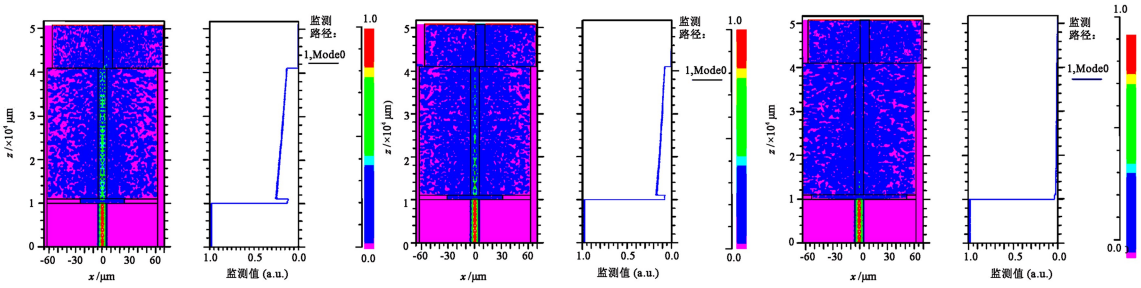
光源发出的光经输入光纤(SMF1)传输至多模光纤(MMF)时，由于 SMF1 与 MMF 芯径不匹配，激发多模光纤中的高阶模，光束经过 MMF 后，其中一部分光耦合入传感光纤(SMF2)的包层中传输，另一部分光留在纤芯中传输。由于纤芯和包层具有不同的折射率，两部分光在传输过程中将产生相位差，在错位熔接点耦合形成干涉峰，当外界参量作用在 SMF2 时，这些传输模式的相位将发生改变，通

过分析光谱中的干涉谷波长的变化最终实现对被测场的测量。

在 SMSS 传感结构中，多模光纤作为高阶模发生器，其选型决定了传感器的性能。利用光束传播法来对该传感结构进行数值仿真，分别设置多模光纤的纤芯直径 ϕ 为 50，62.5 和 105 μm 进行模拟仿真。图 2(a)，(b)，(c)中左侧为光束沿传感结构的光场分布图，右侧为传感结构纤芯中基模的能量曲线。

从图 2 可知，随着多模纤芯直径的增加，多模纤芯中的基模能量减小。当光束分别传输到纤芯直径为 50，62.5，105 μm 的多模光纤时，纤芯中的总能量不变，归一化基模能量减小，高阶模能量增加。从 MMF 传输到 SMF2 时，图 2(a)，(b)，(c)中的归一化基模能量分别为 0.25，0.17，0.016。由此可知，光束由多模传输至 SMF2 时，直径为 125 μm 的大芯径多模光纤激发 SMF2 包层模更充分[14]，更利于干涉的产生。

为了探究多模光纤长度对激发 SMF2 包层模的影响，将多模长度设置为 0.5～4 mm 进行仿真模拟，将 SMF1 中传输的基模能量与输入 SMF2 的基模能量作差，此能量差为光束通过多模光纤被激发的高阶模能量，经过数值模拟得到的多模光纤长度与能量差值关系如表 1 所示，能量差值越大说明激发高阶模越充分。从表 1 可知，多模光纤长度为 1 mm 时，能量差值最大。所以该 1 mm 长大芯径多模光纤可以有效激发 SMF2 的高阶模。因此，该传感结构选取长为 1 mm、纤芯直径为 105 μm 的多模光纤作为高阶模发生器，以充分激发 SMF2 的包层模。



(a) ϕ=50 μm (b) ϕ=62.5 μm (c) ϕ=105 μm

图 2 不同多模纤芯直径的传感结构光场分布和能量曲线图

表 1 多模光纤长度与基模归一化能量仿真值

多模长度/mm	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
能量差	0.968	0.969	0.870	0.867	0.955	0.951	0.845	0.835

2.2 磁场传感

磁场测量系统如图 3 所示，光源采用超辐射发光二极管(SLED)宽谱光源，传感器和光纤光栅放置在两个永久磁铁之间，通过调节磁铁之间的距离改变磁场强度，并保持光纤轴始终与磁场方向垂直。将特斯拉计的探头置于传感器附近，用以实时监测磁场强度。传感器的透射谱由光谱仪(AQ6370D)记录，其分辨率为 0.02 nm。

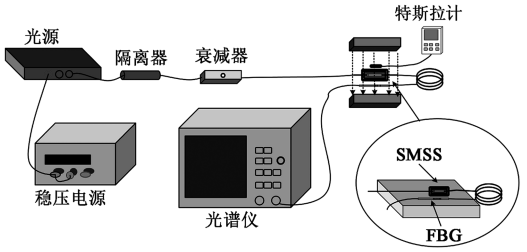


图 3 实验装置示意图

在磁场传感测量实验中，保持室温，将传感器放在两个磁铁中间，固定磁场探测器的位置。图 4 所示为 20～260 Oe 磁场范围内的透射光谱，可以看出，随着磁场强度的增加，SMSS 传感结构的干涉谷向长波长方向移动，而 FBG 透射波长不发生偏移。这是因为传感器由磁流体包覆，当外界磁场发生改变时，磁流体内部的纳米磁性粒子会发生重新排列[15]，磁流体的等效介电常数随之改变，从而导致磁流体的折射率发生变化。随着外界磁场增加，磁流体的折射率增加，导致倏逝场能量增加，能量更多地泄露到外界环境中。包层能量的减小使得包层的有效折射率不断减小，而纤芯折射率不变，因此有效折射率增加。干涉谱对应的波长将向长波长方向偏移。由于光栅的磁致双折射效应，FBG 透射谱在磁场环境下发生微弱的偏移[16]，其磁场灵敏度远小于 SMSS 传感结构。

干涉损耗峰的波长和 FBG 透射谷波长与磁场强度 H 的关系如图 5 所示，由图可知，FBG 透射波

长不随磁场增加而改变。当磁场强度在 20～260 Oe 范围时，干涉损耗峰波长的偏移量与磁场强度并不呈线性关系，在 220～260 Oe 范围时，干涉损耗峰的波长几乎不偏移，这是由于磁流体达到了磁饱和状态，磁流体的折射率不随外界磁场变化。在 20～220 Oe 范围时，干涉谱波长向长波长方向移动，经过线性拟合后，可获得 SMSS 传感结构的磁场灵敏度为 15.9 pm/Oe。

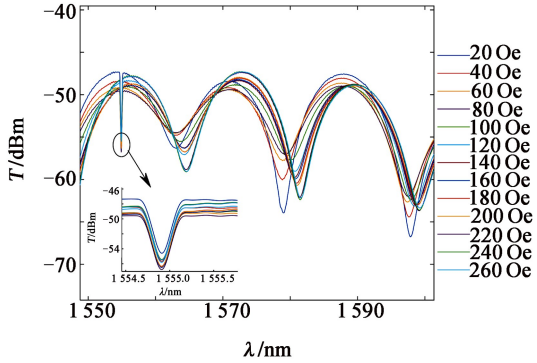


图 4　传感器在不同磁场强度下的透射光谱

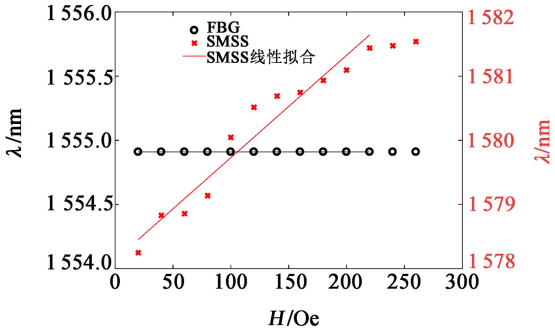
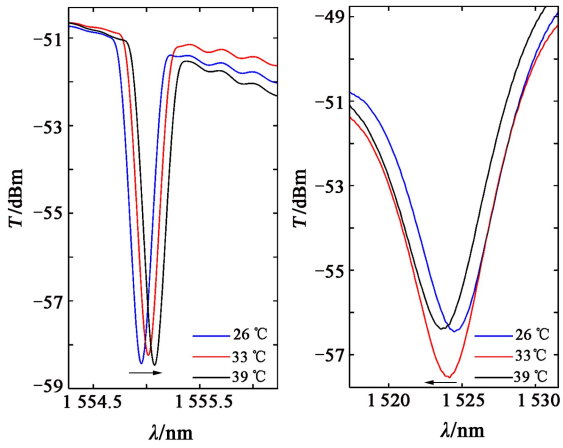


图 5　干涉谱损耗峰的波长偏移量与磁场强度的关系

2.3　温度传感

为了研究该传感结构对温度的敏感特性，本次实验将 SMSS 传感器和 FBG 平行放置在型号为 JF-956S 的加热台上。实验记录 20～45 ℃温度范围内的透射谱，其中温度在 26，33，39 ℃状态下 FBG 和 SMSS 传感器的透射谱分别如图 6(a)和(b)所示。

从图 6 可以看出，温度升高，干涉损耗峰的波长向短波长方向偏移，而 FBG 的透射谷波长向长波长偏移。这是因为温度升高，磁流体的折射率减小，使干涉损耗峰的波长向短波长方向偏移。而光纤的热膨胀效应和热光效应使得光栅透射谷波长向长波长方向偏移。图 7 为 SMSS 传感结构、FBG 的透射谷波长与外界温度的关系。由图可知，SMSS 和 FBG 损耗峰波长的偏移量与温度呈线性关系。其中 SMSS 损耗峰的波长偏移－4.668 nm，FBG 透射谷的波长偏移了 0.284 nm。将数据进行线性拟合可得，SMSS 传感结构的温度灵敏度为－161.7 pm/℃，FBG 的温度灵敏度为 11 pm/℃。



(a)　FBG　　(b)　SMSS

图 6　FBG 与 SMSS 传感器在不同温度下的透射谱

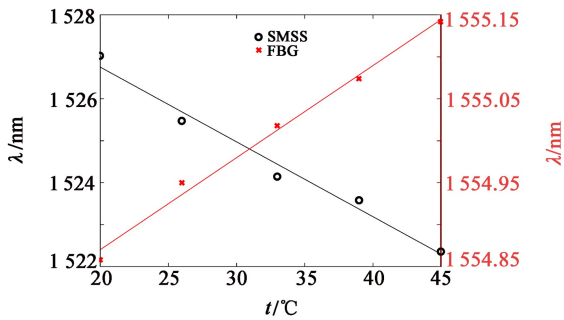


图 7　SMSS 传感结构、FBG 的损耗峰波长与温度的关系

由实验结果可知，无论温度还是磁场发生改变时，该传感器的透射谱都会发生波长偏移。在实际应用中，温度与磁场同时发生变化时，将 SMSS 传感结构和 FBG 级联可以实现温度与磁场的同时测量。将测得的 SMSS 传感结构和 FBG 的磁场、温度灵敏度系数代入式(2)，可得

$$\begin{bmatrix}\Delta H\\ \Delta t\end{bmatrix}=\frac{1}{174.9}\begin{bmatrix}11 & 161.7\\ 0 & 15.9\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\lambda_{SMSS}\\ \Delta\lambda_{FBG}\end{bmatrix} \tag{3}$$

因此，只要知道 SMSS 传感结构和 FBG 透射谱的波长偏移量，代入式(3)即可得到外界温度与磁场的变化量，实现传感的作用。

3　结论

为了实现低成本的温度与磁场同时测量，本文在普通单模多模-单模传感光纤的基础上进行改进，运用光束传播法建模仿真传感结构，通过其内部光

场分布，确定多模光纤的选型，制作单模-大芯径多模-单模-单模错位熔接的传感结构。将磁流体包覆着的传感结构封装在毛细管中，利用磁流体的磁致折射率可调特性，制成磁场传感器。同时在传感系统中级联一个光栅，利用光栅对温度敏感、对磁场敏感度极低的特性，实现对温度的传感。实验测得SMSS传感结构的磁场灵敏度为15.9 pm/Oe，温度灵敏度为－161.7 pm/℃。利用实验结果建立敏感矩阵，实现对外界温度与磁场的同时测量。该传感器结构简单，采用的普通单模光纤和大芯径多模光纤成本低、结构稳固且具有良好的温度、磁场灵敏响应以及较高的测量精度，在需要温度与磁场双测量的传感领域有较高的应用价值。

参考文献：

[1] 李德才. 磁性液体理论与应用[M]. 北京：科学出版社，2003.
Li D C. Magnetic Liquid Theory and Application[M]. Beijing: Science Press, 2003.

[2] Pu S L, Chen X F, Di Z Y, et al. Relaxation property of the magnetic-fluid-based fiber-optic evanescent field modulator [J]. J. of Appl. Phys., 2007, 101(5): 053532(1-5).

[3] Horng H E, Chieh J J, Chao Y H. Designing optical-fiber modulators by using magnetic fluids[J]. Opt. Lett., 2005, 30(5): 543-545.

[4] 王昊天，卜胜利，王 宁. 基于磁流体热透镜效应的阈值可调光学限幅器的理论设计[J]. 光子学报，2012，41(9)：1009-1014.
Wang H T, Pu S L, Wang N. Theoretical design of threshold adjustable optical limiter based on magnetic fluid thermal lens effect[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(9): 1009-1014.

[5] 张荣香，韩 群，刘铁根，等. 宽带光源入射下单模-多模-单模全光纤电流传感器特性研究[J]. 中国激光，2014，41(7)：149-155.
Zhang R X, Han Q, Liu T G, et al. Research on the characteristics of single-mode-multi-mode-single-mode all-fiber current sensor under the incident broadband light source[J]. Chinese J. of Lasers, 2014, 41(7): 149-155.

[6] Zhao Y, Wu D, Lv R Q, et al. Tunable characteristics and mechanism analysis of the magnetic fluid refractive index with applied magnetic field[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2014, 50(8 Pt. 2): 4600205-1-4600205-5.

[7] Lu Z X, Chen S F, Wang Z L. Magnetic field and current sensing by reflection on fiber-optic end face in ferro fluids[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6): 1482-1486.

[8] Ji H Z, Pu S L, Wang X, et al. Magnetic field sensing based on capillary filled with magnetic fluids[J]. Appl. Opt., 2012, 51(27): 6528-6538.

[9] 刘亚文，武保剑，文 峰. 微带线控制的磁流体微环光开关结构、原理与设计[J]. 磁性材料及器件，2020，51(4)：29-33.
Liu Yawen, Wu Baojian, Wen Feng. Silicon-based magnetic fluid optical switch with micro-ring resonator controlled by micro-strip circuit[J]. J. of Magnetic Materials and Devices, 2020, 51(4): 29-33.

[10] Li C, Ning T G, Wen X D, et al. Magnetic field and temperature sensor based on a no-core fiber combined with a fiber Bragg grating[J]. Opt. & Laser Technol., 2015, 72: 104-107.

[11] Qin T, Feng Z Y, Rong Q Z, et al. A temperature-independent fibre-optic magnetic-field sensor using thin core fibre tailored fibre Bragg grating[J]. Opt. Communications, 2017, 393: 169-172.

[12] 梁 星，杨武海，刘 鑫，等. 磁流体包覆薄包层光纤光栅磁场传感研究[J]. 压电与声光，2019，41(1)：34-39.
Liang X, Yang W H, Liu X, et al. Research on magnetic field sensing of thin cladding fiber grating with magnetofluid cladding [J]. Piezoelectricity & Acoustooptics, 2019, 41(1): 34-39.

[13] Luo L F, Pu S L, Dong S H, et al. Fiber-optic magnetic field sensor using magnetic fluid as the cladding[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 236: 67-72.

[14] 赵丽娟，赵海英，徐志钮. 基于布里渊动态光栅的高灵敏度静压力传感器设计[J]. 光子学报，2021，50(2)：206001.
Zhao L J, Zhao H Y, Xu Z N. Design of high-sensitivity hydrostatic pressure sensor based on Brilliouin dynamic grating [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(2): 206001.

[15] Zhao Y, Lv R Q, Li H, et al. Simulation and experimental measurement of magnetic fluid transmission characteristics subjected to the magnetic field [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2014, 50(5): 4600107-1-4600107-7.

[16] Alan D K, Michael J M. Fiber Bragg grating high-magnetic-field probe[C]// Proc. of Tenth Inter. Conf. on Optical Fibre Sensors, 1994: 53-56.

作者简介：

温芳芳(1996－)，女，重庆綦江人，硕士研究生，主要从事磁流体、光纤传感技术等方向的研究。