

光纤磁场传感器研究进展与发展趋势

滕云田, 邱连松, 邱忠超, 王晓美, 林 薇

Research progress and development trends of fiber optic magnetic field sensors

Teng Yuntian, Qiu Liansong, Qiu Zhongchao, Wang Xiaomei, and Lin Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2024-082>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[全面禁止核试验条约 \(CTBT\) 科学技术大会 \(SnT\) 的科学议程和地震事件性质识别研究进展](#)

Scientific agenda and advances in seismic event discrimination research at the CTBT Science and Technology Conference
地震科学进展. 2022(10): 464–472

[徐州地震台伸缩仪观测干扰分析](#)

Interference analysis of the extensometer observation at Xuzhou seismic station
地震科学进展. 2022(12): 587–592

[地震地形变观测系统的组成、发展及应用](#)

The composition, development and application of crustal deformation observation system in earthquake monitoring and prediction
地震科学进展. 2020(10): 23–29

[地球物理探测卫星数据分析处理技术与地震预测应用研究项目及研究进展](#)

Project plan and research on data analysis and processing technology of geophysical exploration satellite and application research of earthquake prediction
地震科学进展. 2022(1): 1–25

[地幔柱研究进展](#)

Research progress of mantle plume
地震科学进展. 2021(6): 241–245, 251

[天津台网水温观测系统事件数据跟踪分析](#)

Data tracking analysis of water temperature observation system events in Tianjin network
地震科学进展. 2021(1): 7–14



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

滕云田, 邱连松, 邱忠超, 等. 光纤磁场传感器研究进展与发展趋势 [J]. 地震科学进展, 2024, 54(11): 759-767. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-082

Teng Y T, Qiu L S, Qiu Z C, et al. Research progress and development trends of fiber optic magnetic field sensors[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(11): 759-767. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-082

综述与评述

光纤磁场传感器研究进展与发展趋势

滕云田^{1,2)} 邱连松²⁾ 邱忠超^{1,2)*} 王晓美^{1,2)} 林 薇²⁾

1) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2) 防灾科技学院, 河北三河 065201

摘要 磁场传感器在资源勘探、工业生产及地磁检测等多个领域有着广泛的应用。传统电类磁场传感器稳定性好, 但存在易受化学腐蚀、成本高、体积大, 以及抗干扰能力差等缺点; 相比之下, 光纤磁场传感器具有结构紧凑、高精度、体积小和抗电磁干扰能力强等优点。现有的光纤磁场传感器根据基本原理主要包括以下 4 类: 基于磁致伸缩材料、基于磁流体材料、基于法拉第效应、基于光纤激光器。特别是基于磁致伸缩效应的光纤磁场传感器, 在制造工艺和应用方面具有更多优势。本文介绍了用于磁场测量的光纤传感技术的发展, 分析了 4 种不同类型传感器的原理、优缺点及研究现状。同时, 还介绍了光纤磁场传感器在地磁监测方面的应用。最后, 分析了光纤磁场传感器面临的挑战和未来发展趋势。

关键词 光纤传感器; 磁场测量; 磁致伸缩材料; 磁流体

中图分类号: P315.62 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2024)11-0759-09

doi: 10.19987/j.dzcxjz.2024-082

Research progress and development trends of fiber optic magnetic field sensors

Teng Yuntian^{1,2)}, Qiu Liansong²⁾, Qiu Zhongchao^{1,2)}, Wang Xiaomei^{1,2)}, Lin Wei²⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Institute of Disaster Prevention, Hebei Sanhe 065201, China

Abstract Magnetic field sensors have extensive applications in various fields such as resource exploration, industrial production, and geomagnetic detection. Traditional electric magnetic field sensors have good stability, but they have disadvantages such as susceptibility to chemical corrosion, high cost, large size, and poor resistance to electromagnetic interference. In contrast, fiber optic magnetic field sensors have advantages such as compact structure, high precision, small size, and strong resistance to electromagnetic interference. Existing fiber optic magnetic field sensors mainly include the following four categories based on basic principles: based on magnetostrictive materials, based on magnetic fluid materials, based on Faraday effect, and based on fiber lasers. Among these, fiber optic magnetic field sensors based on magnetostriction have more advantages in manufacturing processes and applications. This article

收稿日期: 2024-05-15; 采用日期: 2024-08-15。

基金项目: 地震动力学国家重点实验室开放基金项目(LED2024B11)资助。

第一作者: 滕云田(1966-), 男, 研究员, 主要从事地磁观测技术与仪器研究。E-mail: tengyt@cea-igp.ac.cn。

* 通信作者: 邱忠超(1986-), 男, 副研究员, 主要从事光纤传感技术研究。E-mail: qiuzc1987@163.com。



introduces the development of fiber optic sensing technology for magnetic field measurement, analyzes the principles, advantages and disadvantages, and research status of four different types of sensors. At the same time, the application of fiber optic magnetic field sensors in geomagnetic monitoring was also introduced. Finally, the challenges and future development trends faced by fiber optic magnetic field sensors were analyzed.

Keywords fiber optic sensors; magnetic field measurement; magnetostrictive materials; magnetic fluid

0 引言

光纤磁场传感器因其抗电磁干扰、高灵敏度、小型化等诸多优点在众多领域发挥着至关重要的作用^[1-3]。光纤磁场传感器主要分为功率型和非功率型两大类。功率型传感器中,光纤承担感测任务,其性质会随磁场的变化而变化,通过这种方式可以测定磁场强度。而非功率型传感器则使用光纤作为传递光信号的介质,并结合其他能够响应磁场的元件来感应磁场的变化。根据不同的感应机制,光纤磁场传感器可以进一步分为磁致伸缩型、磁流体型、法拉第型和洛伦兹力型4种^[4]。

光纤传感器相比传统传感器,具有抗电磁干扰、耐腐蚀、体积小、灵敏度高、响应速度快等优点。但光纤传感器成本较高,且对安装环境要求较为严格。传统传感器则具有成本低、易于安装和维护等优点,但在恶劣环境下其性能可能会受到影响。光纤传感器适用于需要高灵敏度、高精度、抗电磁干扰、耐腐蚀的测量环境。它们特别适合于极端环境下的参数监测,如温度、压力、湿度和振动等,以及在医药、航空航天、石油化工、电力系统、结构健康监测和国家安全等领域的应用。

本文针对基于磁致伸缩材料的光纤磁场传感器、基于磁流体的光纤磁场传感器、基于法拉第效应的光纤磁场传感器和基于光纤激光器的光纤磁场传感器的研究现状和进展进行阐述,并对光纤磁场传感器在地磁监测方面的发展以及应用进行了讨论。本文旨在探讨和总结光纤磁场传感技术,为地磁监测领域的专家学者和技术人员提供有价值的参考,并进一步推动该技术在地磁监测领域的广泛应用。

1 基于磁致伸缩材料的光纤磁场传感器

基于磁致伸缩效应的磁场传感器的主要传感元件是磁致伸缩材料。磁致伸缩材料在被磁化时,会导致磁致伸缩材料的体积或长度发生变化,这种现象被称为磁致伸缩效应^[5-6]。这种现象是焦耳在1842年发现的,因此也被称为焦耳效应。E. Villari 后来发现,当对磁致伸缩材料施加应力时,其原有的磁致伸

缩效应会表现出不同的响应或变化^[7]。

磁致伸缩效应可分为两种形式,即线性磁致伸缩和体积磁致伸缩^[8]。当磁场强度小于饱和磁场时,磁致伸缩材料主要发生长度变化,而体积几乎保持不变,因此称为线性磁致伸缩效应;当磁场强度大于饱和磁场强度时,磁致伸缩材料主要发生体积变化,而长度基本保持不变,因此称为体积磁致伸缩效应。线性磁致伸缩又可分为横向磁致伸缩和纵向磁致伸缩,不同之处在于垂直于磁场方向的长度相对变化的现象称为横向磁致伸缩效应,而沿所施加磁场方向的尺寸相对变化现象则称为纵向磁致伸缩效应。

1.1 光纤光栅型磁致伸缩磁场传感器

2012年,Liu等^[9]将 Terfenol-D 颗粒与环氧树脂混合,形成了一种复合磁致伸缩材料,并将这种材料与光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)结合,制作了一种光纤磁场传感器。这种传感器在1.46 T的磁场中展现出了0.68 nm的峰值波长位移,同时具有较小的滞后性。但是这种传感器的磁场灵敏度相对较低,实验表明该传感器的磁场灵敏度为 4.68×10^{-4} nm/mT。

2018年,Allsop等^[10]为了提升磁场灵敏度,将 Terfenol-D 材料与长周期 FBG 相结合,开发了一种新型的传感器。这种新型传感器的磁场灵敏度达到了0.543 nm/mT,并且能够在低于0.4 mT的静态磁场环境中实现 ± 50 μ T的探测极限。

2019年,马瑞等^[11]提出用 FBG-FP 腔和 Terfenol-D 材料的磁场传感器,通过使用磁铁提供偏置磁场,弹簧提供预应力等方法达到增加磁致伸缩材料应变量的目的,同时采用与 Terfenol-D 材料有相同热膨胀系数的非磁性 Monel-400 材料,通过测量粘贴在 Monel-400 材料上的 FBG 来测量温度变化,达到温度补偿的效果。实验表明,该传感器的磁场灵敏度为 1.5×10^{-3} nm/mT,分辨力为670 nT,并具有良好的指向性。

以上对基于磁致伸缩材料的光纤磁场传感器的工作原理、研究现状及其性能进行了论述。这些传感器使用 Terfenol-D 和不同的光纤结构,实现了不同程

度的磁场灵敏度。尽管在磁场测量方面取得了良好的进展,但也存在着相当多的问题,如磁致伸缩材料本身的磁滞现象以及使用 UV 胶带来的蠕变现象,这些问题影响了传感器的使用寿命,限制了传感器的使用范围。未来的研究可以探索新的磁致伸缩材料或改进现有材料的配方,以实现更高的灵敏度。使用与磁致伸缩材料热膨胀系数相同的非磁性材料进行温度补偿是一种有效的方法。未来的研究可以探索更多具有相似特性的材料,以进一步提高温度补偿的效果。

1.2 干涉型磁致伸缩磁场传感器

2019 年, Shi 等^[12]提出一种采用超磁致伸缩材料的光纤磁场传感器,传感器结构如图 1 所示。其工作原理为当传感器周围外加磁场后, Terfenol-D 随着外加磁场发生应变,从而带动光纤轴向伸长。此时,对比传感光纤和参考光纤中的两条传输光路的相干检测即可测得光的相移检测,最后将光信号转换为电信号来确定磁场强度。由实验可知,传感器在施加最佳预应力为 4 MPa 时,传感器的磁场灵敏度最大为 12 nm/mT。

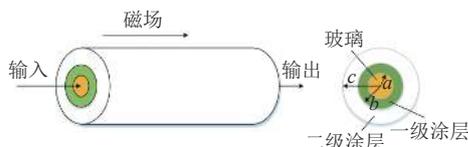


图 1 基于 Terfenol-D 双涂层光纤的结构

Fig. 1 Structure of Terfenol-D double coated fiber

Fabry-Perot 干涉仪是一种反射型的干涉仪,相比于其他类型的光纤干涉仪,它的结构更加简单,通常由一根光纤和两个具有高反射率反射镜组成的 F-P 腔构成。光束在通过 F-P 腔时,会在反射镜之间多次反射形成多光束干涉,最终引起干涉光谱的变化^[13]。2015 年, Zhang 等^[14]使用 Terfenol-D 材料,研制出一种非本征光纤 F-P 腔(Extrinsic Fabry-Perot Interferometer, EFPI)光纤磁场传感器,将两根切割良好的单模光纤以同轴心的方式粘贴在 Terfenol-D 板的表面,形成外部光纤法布里-珀罗干涉仪。外加磁场的变化会导致 Terfenol-D 板长度的变化从而引起 EFPI 腔长的变化。实验结果表明,传感器的最大灵敏度可达 8.5473 nm/mT。

2022 年, Sun 等^[15]设计了一种新型的高灵敏度传感器,它结合了巨磁致伸缩材料(Giant Magnetostrictive Material, GMM)和 F-P 结构。这种传感器的工作原理是,单模光纤插入石英毛细管中以形成 F-P 腔。

石英毛细管的末端被牢固的固定在单模光纤上,而单模光纤本身则分别固定在 GMM 棒的两端。这种设计使得单模光纤与石英毛细管之间的相互作用力最小化,从而极大地提高了 GMM 棒因磁场变化而产生的微小形变转化为 F-P 腔长变化的效率。通过实验验证,这种传感器的磁场灵敏度可达 18.67 nm/mT。

综上所述,干涉型光纤磁场传感器在磁场测量方面具有独特的优势,特别是在需要高精度和强抗干扰能力的环境中。但是从成本来说,干涉型光纤磁场传感器需要精确的光学组件和复杂的信号处理系统,成本较高。从环境变化灵敏来说,温度、压力的变化会影响传感器的精度。从信号处理复杂性来说,干涉型传感器产生的信号需要复杂的信号处理算法来提取信息。从智能化来说,结合人工智能和机器学习技术,可以提高传感器的自适应能力和诊断能力。从环境适应性来说,开发更有效的温度和压力补偿技术,可以提高传感器在不同环境条件下的稳定性和可靠性。

表 1 为基于磁致伸缩材料的光纤磁场传感器的性能比较。

表 1 传感器性能比较

Table 1 Comparison of sensor performance

传感器原理	灵敏度/(nm·mT ⁻¹)	文献来源
磁致伸缩材料	4.68×10^{-4}	[9]
磁致伸缩材料	0.543	[10]
磁致伸缩材料与 F-P 腔	1.5×10^{-3}	[11]
磁致伸缩材料	12	[12]
F-P 腔	8.5473	[14]
磁致伸缩材料	18.67	[15]

2 基于磁流体的光纤磁场传感器

磁流体(Magnetic Fluid, MF),也称为铁磁流体或磁性液体,是一种特殊的液体,由微小的磁性颗粒均匀悬浮在载液中形成^[16]。在光纤磁场传感器中,磁流体可以作为一种敏感介质,其磁性质使得它能够对外部磁场的变化做出响应。当磁流体受到磁场作用时,磁性颗粒会沿磁场方向排列,导致磁流体的磁导率发生变化^[17]。传感原理如图 2 所示。这种变化可以影响光在磁流体中的传播特性,例如速度和折射率。

2.1 光纤光栅型磁流体磁场传感器

2015 年, Wang 等^[18]研制了一种基于光纤环振荡光谱技术和蚀刻光纤与 MF 相互作用的磁场传感

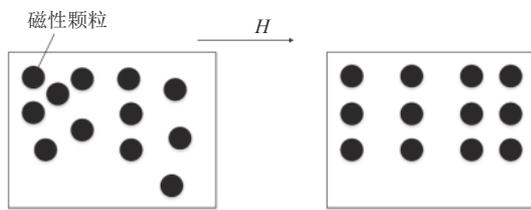


图2 基于磁流体型磁场传感器的传感原理图

Fig. 2 Sensing principle diagram based on magnetic fluid type magnetic field sensor

器,如图3所示。同时考虑光纤磁性可调谐折射率和吸收系数的传输特性,显著提高了传感器灵敏度和抗干扰能力。在65 mT的磁场作用下,传感器灵敏度为125.6 nm/mT,分辨力为 2.5×10^6 nT。虽然蚀刻处理提高了传感器的灵敏度,但它也会在光纤环路上引发相对较大的固有损耗,这会对光纤环振荡光谱的精度产生负面影响,并损害传感器的机械稳定性。

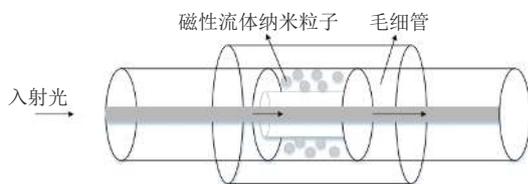


图3 充满磁流体的蚀刻光纤磁场传感器

Fig. 3 Etched fiber optic magnetic field sensor filled with magnetic fluid

2017年,Zheng等^[19]提出将单模光纤接合到石英毛细管(Silica Capillary Tube A, STC-A),然后具有劈裂端面的石英毛细管(Silica Capillary Tube B, STC-B)拼接到SCT-A上以提供反射表面,垂直于SCT-A的中心轴进行聚焦离子束(FIB)铣削,以形成一个通道侧孔。该通道侧孔允许磁流体渗透到F-P腔中,从而在施加外部磁场时在F-P腔中提供可调折射率调制。实验结果表明,传感器的最大灵敏度可达4.187 nm/mT。

2021年,Zhang等^[20]设计了一种矢量光纤磁场传感器。将磁流体涂覆在倾斜FBG表面,当光纤表面的磁场发生变化时,引起光纤包层内磁性纳米颗粒密度和散射空间的各向异性重新分布,进而改变光纤的有效折射率。此时,光纤有效折射率会随着波长漂移和幅度衰减而调制包层模式共振,通过检测包层模式的峰间强度,可以精准测量外界磁场。实验表明,传感器可以实现0.39 dB/mT的强度灵敏度和0.038 dB/rad的方向灵敏度。

以上这些研究展示了光纤光栅型磁流体磁场传

感器在提高灵敏度等方面的进步。蚀刻处理虽然提高了灵敏度,但也引入了较大的固有损耗,影响精度和机械稳定性,对于引入的损耗可以通过改进蚀刻技术或使用新型抗蚀材料来减少。而聚焦离子束铣削技术具有高精度和多功能性等优点,但也存在成本高、加工速度慢、表面损伤、粗糙化等缺点,在实际应用中需要根据具体需求进行权衡和选择。

2.2 干涉型磁流体磁场传感器

2016年,Li等^[21]通过在两个单模光纤之间拼接一个双芯光纤,用飞秒激光打通双芯光纤的一个通道,利用毛细管将磁流体填充到该通道,该通道的光受到磁流体的影响产生相移,从而在合成时发生干涉。实验结果表明,在0.5~9.5 mT范围内,传感器的最大灵敏度可达20.8 nm/mT。

2021年,Qin等^[22]开发了一种结合光纤耦合器干涉仪(Optical Microfiber Coupler Interferometer, OMCI)与磁流体的光纤磁场传感器。这种传感器的设计采用了覆盖有聚二甲基硅氧烷和磁流体的OMCI,通过磁流体的磁性折射率调整来响应磁场变化。实验表明,在OMC的腰长保持不变的情况下,减小OMC的腰半径可以提升传感器的灵敏度,当腰半径缩小到3.5 μm 时,传感器达到了最高的磁场灵敏度,即0.547 nm/mT。

2022年,Yu等^[23]提出了一种新型高灵敏度光纤磁场传感器,该传感器结合了Sagnac干涉仪(Sagnac Interferometer, SI)和马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)来改善温度补偿能力。这种传感器不仅展现了1.17 nm/mT的高灵敏度,而且在温度补偿方面也表现出优异的性能,同时还具有良好的稳定性和重复性。不过,这种传感器的测量范围相对较窄,这是其局限性。

以上这些研究展示了干涉型磁流体磁场传感器在提高灵敏度、改善温度补偿能力和提升稳定性等方面的进步。飞秒激光在磁场传感器测量中的应用带来了高精度和多功能等优点,但也带来了高成本、维护困难和技术复杂的挑战。未来可以尝试利用飞秒激光在单模光纤中精密加工微孔,形成法布里-珀罗干涉仪传感器,实现对环境参数的测量。也可以集成磁场传感器与其他类型的传感器(如温度、压力传感器),实现多物理参数的同时测量。而马赫-曾德尔干涉仪不仅需要设计温度补偿系统,还需要考虑环境噪声的影响,以及不同参数变化带来的交叉干扰。未来可以尝试使用稳定的光源,如单色仪或窄线宽

激光器, 以提高干涉仪的测量精度和重复性。也可以设计合适的温度补偿机制, 以减少温度变化对干涉仪性能的影响。

表 2 为基于磁流体型的光纤磁场传感器的性能比较。

表 2 传感器性能比较

Table 2 Comparison of sensor performance

传感器原理	灵敏度	文献来源
纤环振荡光谱技术和蚀刻光纤	125.6 nm/mT	[18]
单模光纤与FIB技术	4.187 nm/mT	[19]
磁流体涂覆光纤布拉格光栅	0.39 dB/mT	[20]
飞秒激光技术	20.8 nm/mT	[21]
光纤耦合器干涉仪与磁流体	0.547 nm/mT	[22]
Sagnac干涉仪和马赫-曾德尔干涉仪	1.17 nm/mT	[23]

3 基于法拉第效应的光纤磁场传感器和光纤激光磁场传感器

3.1 基于法拉第效应的光纤磁场传感器

基于法拉第效应的微型光纤激光磁场传感器是一种利用非旋光性介质(如光纤)中的法拉第效应来检测磁场的传感器^[24]。法拉第效应是指当线性偏振光通过置于磁场中的介质时, 光的偏振面会发生旋转的现象。这种旋转的角度与磁场强度、介质长度以及介质本身的法拉第旋转系数有关^[25]。

2007 年, 杨泗杰等^[26]提出了一种新型的三维光纤磁场传感器, 该传感器通过在空间直角坐标系上的 x, y, z 轴上分别放一个传感器, 3 个传感器采用同一个光源, 按分光比 1 : 1 : 1 分到传感器上, 传感器如图 4 所示。当外界有磁场时, 磁场在 3 个传感器光的传播方向的分量使偏振面发生旋转, 通过测量偏振光偏振态的旋转角度, 可以得到磁场的大小和方向。实验表明, 该传感器分辨力为 3.16×10^{-2} nT。

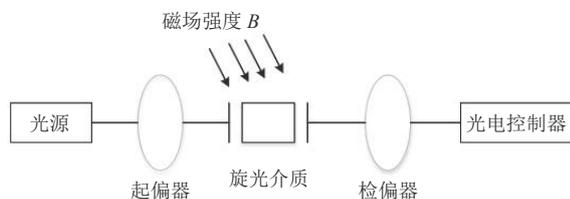


图 4 基于法拉第效应光纤传感器原理图

Fig. 4 Schematic diagram of fiber optic sensor based on Faraday effect

2014 年, 韩建磊^[27]开发了一种基于法拉第效

应的光纤激光磁场传感器, 传感器如图 5 所示。该传感器使用掺杂铒离子的光纤制造了一个短腔分布式布拉格反射光纤光栅激光器, 该激光器可以产生 2 个频率不同的正交偏振光。当置于磁场中时, 法拉第效应引起圆偏振双折射现象, 导致偏振光的频率差随磁场变化。输出光通过偏振器后, 光电探测器检测到的频率差值变化与磁场强度成正比, 从而实现了对磁场的测量。实验表明, 该光纤磁场传感器灵敏度的最大值为 76.33 nm/mT。

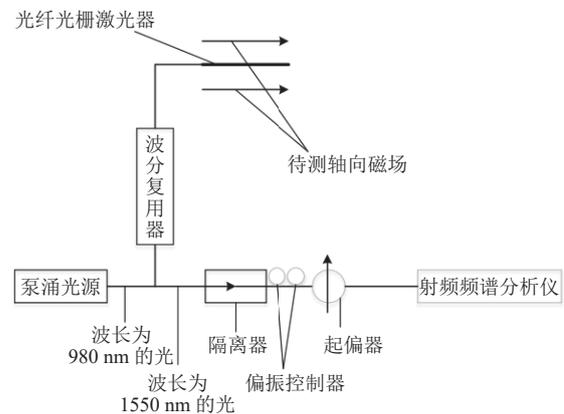


图 5 基于法拉第效应的微型光纤激光磁场传感器原理图

Fig. 5 Principle diagram of micro fiber laser magnetic field sensor based on Faraday effect

2017 年, Zamani 和 Ghanaatshoar^[28]设计了一种基于薄透射型一维磁光子晶体 (Magneto Photonic Crystals, MPCs) 的磁光磁场传感器。传感器的灵敏度取决于传感膜的厚度, 通过调整 MPCs 的膜层提高法拉第旋转角度, MPCs 层数越少, 传感器的灵敏度、空间分辨率等性能更佳。经实验测试, 表明引入 MPC 的磁光磁场传感器要比单层的 BIYIG(具有高法拉第旋转的石榴石薄膜)的磁光磁场传感器灵敏度高达 11 倍, 其灵敏度值约为 0.057 °/G。

综上所述, 基于法拉第效应的光纤磁场传感器的发展展示了从基本原理到技术革新的显著进步。基于法拉第效应的光纤磁场传感器逐渐实现了与其他传感器或系统的集成, 形成了多功能化的测量系统。这种集成不仅提高了测量的准确性和可靠性, 还扩展了光纤磁场传感器的应用领域。对于法拉第效应的光纤磁场传感器未来的发展, 可以考虑进一步缩小传感器尺寸, 实现更紧凑的系统集成, 以适应更多应用场景的需求。开发能够同时测量磁场、温度、压力等多个物理量的传感器, 以提供更全面的测量数据。探索新型材料, 如稀土掺杂光纤、光子晶体光纤等, 以提高传感器的性能和测量范围。

3.2 光纤激光磁场传感器

光纤激光器的工作原理是基于掺杂光纤的特性。当通过光纤的光能激活掺杂元素时，它们就会发出不同波长的激光，通过波分复用技术将不同波长的光从不同的光通道分离并射入对应的光电转换器中进行光电转换，然后利用数据采集平台对数据进行采集^[21]。通过特定的算法还原波长的变化。光纤激光器的优势在于它的高光束质量和效率，同时还具有结构紧凑、耐用、维护便捷等优点^[29]。

2006年，美国海军实验室 Cranch 等^[30]制作了基于安培力效应的光纤激光磁场传感器，通过将金涂覆的光纤激光器粘贴在金属薄片上，当薄片通电后，在施加电流和与电流方向垂直的磁场的作用下，金属薄片会受到洛伦兹力，产生形变，带动光纤激光器产生形变进而影响光纤的中心波长值，传感器如图6所示。实验表明，在25 mA的电流条件下该传感器的分辨力达到 $5 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ 。

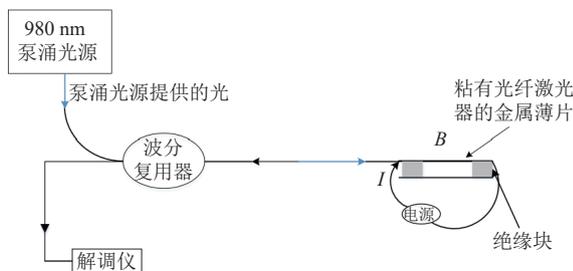


图6 光纤激光传感器结构原理图

Fig. 6 Schematic diagram of fiber laser sensor structure

2017年，王兆刚^[31]设计了一种双端固定型的光纤磁场传感器。传感器整体由有机玻璃构成，顶端采用垫片、螺钉将金属梁固定。传感器下方还装有中空螺钉使得光纤激光器可以穿过支架和金属梁并进行点胶。实验表明，在100 mA的电流条件下，磁场灵敏度可达 $1 \times 10^{-9} \text{ nm/mT}$ 。

2018年，张军^[32]将正交双频光纤激光器置于镀膜机内，在真空环境中，对激光器表层溅镀金膜。然后将镀膜后的激光器两端连接电极，并通过外部电源给电极通电。这样，电流被加载到光纤激光器表面。在外界磁场的作用下，电流产生安培力，这种力施加到光纤激光器上。光纤激光器的激光腔内双折射受到安培力的调制，并反映在激光器的最终输出的频率上。通过这种方式，实现对磁场的测量。

光纤激光磁场传感器的研究主要集中在提高分辨率、增强传感器的稳定性和可靠性，以及改进传感器的设计和制作工艺。对于光纤激光磁场传感器未

来的发展，可以考虑从降低磁场传感器工作环境的噪声出发。比如采用石墨烯等新型材料、使用光电供电模式来代替传统电源等方法来提高传感器的灵敏度。降低环境噪声，研究如何通过材料选择和系统设计来减少外部噪声对传感器性能的影响。利用集成光学技术，实现传感器的微型化和集成化，提高系统的便携性和可靠性。

表3为基于法拉第效应的光纤磁场传感器和光纤激光磁场传感器的性能比较。

表3 传感器性能比较

Table 3 Comparison of sensor performance

传感器原理	灵敏度/分辨力	文献来源
法拉第效应	$3.16 \times 10^{-2} \text{ nT}$	[26]
法拉第效应	76.33 nm/mT	[27]
基于薄透射型一维磁光子晶体	$0.057 \text{ }^\circ/\text{G}$	[28]
法拉第效应	$5 \text{ nT/Hz}^{1/2}$	[30]
法拉第效应	$1 \times 10^{-9} \text{ nm/mT}$	[31]

4 光纤磁场传感器的应用

地磁场的研究是地球科学的一个基本领域，它涉及整个地球以及近地空间的磁性现象。地磁场的测量对于多个领域至关重要，包括航空航天、地质勘探、国防安全、交通运输、通信以及地震预警等^[33]。随着技术的进步，利用磁效应的各种磁测量设备被开发出来，例如超导量子干涉仪(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID)和光泵磁强计(Optically Pumped Magnetometer, OPM)。这些先进的仪器在地磁测量领域得到了广泛的应用。光纤磁场传感器是另一种在地磁测量系统中得到应用的设备，它利用光纤的物理特性来检测磁场的变化。光纤传感器因其稳定性强、灵敏度高、抗电磁干扰能力强等特点，在地磁场测量中显示出独特的优势^[34]。这些传感器可以用于精确测量地磁场的变化，从而为上述提到的多个领域提供重要的数据支持。

2005年，张学亮等^[35]进行了一项创新性研究，他们将磁致伸缩材料粘接到光纤上，通过磁致伸缩效应使光纤产生相位变化，并利用光纤干涉仪来检测这些变化，从而实现了对地磁场的传感。实验结果显示，这个光纤磁场传感系统的相位灵敏度高达 $9 \times 10^{-6} \text{ rad/nT}$ ，能够测量到纳米级的交流磁场信号位移。实验测试数据与理论预测吻合，表明该系统适合于高灵敏度的地磁场测量。

2018 年, Zhao 等^[36]报道了一种接近量子噪声极限、具有绝对频率稳定性的 1083 nm 单频光纤激光器。这种光纤激光器在低频时具有低强度的相对噪声和卓越的频率稳定性, 使其成为高精度磁强计的理想选择。

2021 年, Li 等^[37]开发了一种新型的微型三轴矢量原子磁强计, 这种磁强计能够在自旋交换无松弛状态下工作, 并具有宽范围的灵敏度。通过现场可编程门阵列和直接数字合成技术, 在垂直于激光传播方向的平面上产生一个旋转场, 并在泵浦方向上产生另一个调制场, 从而实现了同时对磁场 3 个分量的同时测量。在 60 μT 的范围内, 其横向磁场测量达到了 $3.5 \times 10^5 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ 的灵敏度, 在纵向磁场测量达到了 $3 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ 的灵敏度。

以上是对光纤磁场传感器的工作原理、研究现状和性能进行了论述。从多通道光纤磁强计系统到微型三轴矢量原子磁强计的发展, 体现了传感器设计、材料科学和精密测量技术的综合进步。这些系统不仅提高了测量的灵敏度和稳定性, 还实现了对磁场多分量的同时测量。但技术的发展也导致了更复杂的系统、更高的研发成本和维护费用。未来光纤磁场传感器的发展可以考虑提高测量精度、降低系统复杂性和成本、无线和远程监测、标准化和模块化设计, 以及开发更加智能和集成化的测量台。

表 4 为光纤磁场传感器的性能比较。

表 4 传感器性能比较

Table 4 Comparison of sensor performance

传感器原理	灵敏度	文献来源
磁致伸缩材料	$9 \times 10^{-6} \text{ rad/nT}$	[35]
微型三轴矢量原子磁强计	$3 \text{ pT/Hz}^{1/2}$	[37]

5 结论与展望

本文探讨了不同类型的光纤磁场传感器, 包括它们的设计结构、工作原理、性能指标以及目前的研究进展。基于磁致伸缩材料的光纤磁场传感器结合了磁致伸缩效应和光纤技术, 展现出高灵敏度和潜在的应用前景。然而, 仍面临灵敏度、稳定性和成本等方面的挑战。基于磁流体的光纤磁场传感器具有高灵敏度和易于集成的优势, 但是其受温度影响大, 如何提高磁流体的稳定性、扩大检测范围是该类型传感器的发展方向。基于法拉第效应的光纤磁场传感器的灵敏度通常较低, 因此改善其性能是主要的研究方向。而光纤激光磁场传感器利用电流与磁场的相互作用, 通过测量光纤激光器的形变来测量磁场, 具有独特优势。而如何进一步提高灵敏度和稳定性、降低制作成本等仍需要科研人员不断探索解决。

综上所述, 光纤磁场传感器作为一种新型的磁场测量技术, 具有广阔的应用前景和巨大的发展潜力。在未来的研究中, 我们应继续深入探索其设计原理、优化性能, 并推动其在各个领域的应用, 以更好地服务于科学技术进步和社会发展。

参考文献

- [1] Wang H J, Guo J K, Mo H, et al. Fiber optic sensing technology and vision sensing technology for structural health monitoring[J]. *Sensors*, 2023, 23(9): 4334
- [2] Zhao X Y, Li C X, Qi H C, et al. Integrated near-infrared fiber-optic photoacoustic sensing demodulator for ultra-high sensitivity gas detection[J]. *Photoacoustics*, 2023, 33: 100560
- [3] Gong Z D, Xiang Z Y, Ouyang X, et al. Wearable fiber optic technology based on smart textile: A review[J]. *Materials*, 2019, 12(20): 3311
- [4] 段沐森, 李鹏, 刘盛春. 光纤磁场传感器[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2020, 37(4): 477-483
Duan M S, Li P, Liu S C. Optical fiber magnetic field sensors[J]. *Journal of Natural Science of Heilongjiang University*, 2020, 37(4): 477-483
- [5] 贾灵艳, 梁丽丽, 谢飞, 等. 基于磁致伸缩棒的干涉型微纳光纤磁场传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(7): 0728003
Jia L Y, Liang L L, Xie F, et al. Interferometric optical microfiber magnetic field sensor based on magnetostrictive rod[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(7): 0728003
- [6] 覃尚鹏. 基于折射率调控及磁致伸缩效应的光纤磁场传感器[D]. 南宁: 广西大学, 2022
Qin S P. Optic fiber magnetic field sensor based on refractive index regulation and magnetostrictive effect[D]. Nanning: Guangxi

- University, 2022
- [7] Chen G Y, Jin Z H, Chen J M. A review: Magneto-optical sensor based on magnetostrictive materials and magneto-optical material[J]. *Sensors and Actuators Reports*, 2023, 5: 100152
- [8] 吕晓宇. 考虑磁致伸缩效应影响的结构振动抑制方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020
Lü X Y. Research on structural vibration suppression technology with considering of magnetostriction[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020
- [9] Liu H L, Or S W, Tam H Y. Magnetostrictive composite-fiber Bragg grating (MC-FBG) magnetic field sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 173(1): 122-126
- [10] Allsop T, Lee G B, Wang C L, et al. Laser-sculpted hybrid photonic magnetometer with nanoscale magnetostrictive interaction[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 269: 545-555
- [11] 马瑞, 张文涛, 李芳. 基于超磁致伸缩材料的光纤磁场传感器[J]. 郑州大学学报(工学版), 2019, 40(6): 6-10
Ma R, Zhang W T, Li F. A fiber optic magnetic sensor utilizing giant magnetostrictive materials and fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2019, 40(6): 6-10
- [12] Shi Y, Ma Y Q, Wang Y K. Magneto-elastic-optical coupling of Terfenol-D based optical fiber magnetic field sensors[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(8): 086106
- [13] Yoshino T, Kurosawa K, Itoh K, et al. Fiber-optic Fabry-Perot interferometer and its sensor applications[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1982, 30(10): 1612-1621
- [14] Zhang P, Tang M, Gao F, et al. An ultra-sensitive magnetic field sensor based on extrinsic fiber-optic Fabry-Perot interferometer and Terfenol-D[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(15): 3332-3337
- [15] Sun H Z, Jiang C Q, Tang J R, et al. High sensitivity optical fiber magnetic field sensor based on semi fixed extrinsic Fabry-Perot interferometer[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 70: 102890
- [16] Li Z K, Li D C, Dong J H, et al. Study of temperature influence on the rheological behavior of magnetic fluids[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 545: 168757
- [17] Yerin C V, Vivchar V I. Ellipsometry of magnetic fluid in a magnetic field[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 498: 166144
- [18] Wang Q, Liu X, Zhao Y, et al. Magnetic field sensing based on fiber loop ring-down spectroscopy and etched fiber interacting with magnetic fluid[J]. *Optics Communications*, 2015, 356: 628-633
- [19] Zheng Y Z, Chen L H, Yang J Y, et al. Fiber optic Fabry-Perot optofluidic sensor with a focused ion beam ablated microslot for fast refractive index and magnetic field measurement[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(2): 5601905
- [20] Zhang Z C, Liu F, Ma Q, et al. Vector magnetometer based on localized scattering between optical fiber spectral combs and magnetic nanoparticles[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(20): 6599-6605
- [21] Li Z Y, Liao C R, Song J, et al. Ultrasensitive magnetic field sensor based on an in-fiber Mach-Zehnder interferometer with a magnetic fluid component[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(5): 197-201
- [22] Qin S P, Lu J Y, Li M W, et al. Magnetic field sensing characteristics based on optical microfiber coupler interferometer and magnetic fluid[J]. *Photonics*, 2021, 8(9): 364
- [23] Yu Q, Li X G, Zhou X, et al. Temperature compensated fiber optic magnetic sensor based on the combination interference principle[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(10): 2558-2561
- [24] 曾嘉伟, 文建湘, 时昊, 等. 法拉第旋转镜对旋转光纤磁光性能测量的影响[J]. *光学学报*, 2023, 43(3): 0312003
Zeng J W, Wen J X, Shi H, et al. Influence of Faraday rotator mirror on measurement of magneto-optical properties of spun fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(3): 0312003
- [25] 王泽清. 偏振光在一维磁光光子晶体中的传输特性[D]. 赣州: 赣南师范大学, 2019
Wang Z Q. The propagation properties of polarized light in one-dimensional magneto-optic photonic crystals[D]. Ganzhou: Gannan Normal University, 2019
- [26] 杨泗杰, 周学军, 李光, 等. 基于法拉第效应的三维光纤磁场传感器的设计[J]. *舰船电子工程*, 2007, 27(5): 153-154, 182
Yang S J, Zhou X J, Li G, et al. Design of three-dimensional magnetic-field sensor based on the Faraday effect[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2007, 27(5): 153-154, 182
- [27] 韩建磊. 基于法拉第效应的微型光纤激光磁场传感器[D]. 广州: 暨南大学, 2014
Han J L. Miniature fiber-laser magnetic-field sensor based on Faraday effect[D]. Guangzhou: Jinan University, 2014

- [28] Zamani M, Ghanaatshoar M. Highly-sensitive magneto-optical sensors based on thin transmission-type one-dimensional magneto-phonic crystals for the visualization of magnetic fields[J]. *Chinese Journal of Physics*, 2017, 55(4): 1181-1188
- [29] 余霞, 罗佳琪, 肖晓晟, 等. 高功率超快光纤激光器研究进展 [J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508007
Yu X, Luo J Q, Xiao X S, et al. Research progress of high-power ultrafast fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508007
- [30] Cranch G A, Flockhart G M H, Kirkendall C K. High-resolution distributed-feedback fiber laser dc magnetometer based on the Lorentzian force[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(3): 034023
- [31] 王兆刚. 面向海底长期观测应用的震磁类光纤激光传感器研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2017
Wang Z G. Research on seismic and magnetic fiber optic laser sensors for long-term underwater observation applications[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017
- [32] 张军. 基于安培力原理与溅射金膜的光纤激光磁场传感器 [D]. 广州: 暨南大学, 2018
Zhang J. Fiber laser magnetic field sensor based on ampere force and Au sputter coating[D]. Guangzhou: Jinan University, 2018
- [33] 陈卓琳. 埋式磁通门磁力仪观测技术研究 [D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2023
Chen Z L. Research on observation technology of buried fluxgate magnetometer[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2023
- [34] 贾灵艳. 新型光纤磁场传感器研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2022
Jia L Y. Research on novel optical fiber magnetic field sensor[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2022
- [35] 张学亮, 周晓军, 胡永明, 等. 全保偏光纤地磁传感器 [J]. *中国激光*, 2005, 32(11): 1515-1518
Zhang X L, Zhou X J, Hu Y M, et al. All polarization-maintaining fiber earth magnetic field sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(11): 1515-1518
- [36] Zhao Q L, Zhou K J, Wu Z S, et al. Near quantum-noise limited and absolute frequency stabilized 1083 nm single-frequency fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(1): 42-45
- [37] Li J J, Deng Y C, Wang X F, et al. Miniature wide-range three-axis vector atomic magnetometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(21): 23943-23948