光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250201001

基于MZI与OEO的高灵敏度光纤磁场传感器

田惠丽，杨张义，桂文竹，董　玮*

（吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学全国重点实验室，长春 130012）

摘　要： 提出一种基于马赫-曾德尔干涉仪（MZI）与光电振荡器（OEO）的高灵敏度光纤磁场传感器。基于光电振荡器的传感原理，建立了该MZI的波长灵敏度与OEO频率灵敏度之间的映射关系，揭示了OEO频率灵敏度随干涉仪波长灵敏度增加而提升的趋势。为制作马赫-曾德尔干涉仪，采用将两根单模光纤间错位拼接一段锥形光纤的方法，该结构可将宽带光源发出的光调制为正弦光谱。实验结果表明，在1.6～12.8 mT磁场范围内，该传感器的频率灵敏度达324 Hz/mT，对应的测量误差在±0.96 mT以内，验证了该传感器在磁场测量中具有高灵敏度和稳定性。

关键词： 光纤传感；光电振荡器；磁流体；磁场传感器；锥形光纤

中图分类号： TN958　**文章编号：** 1001－5868(2025)02－0189－06

A High-Sensitivity Fiber Optic Magnetic Field Sensor Based on a Mach-Zehnder Interferometer and a Photoelectric Oscillator

TIAN Huili, YANG Zhangyi, GUI Wenzhu, DONG Wei

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronics Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012)

Abstract: This paper proposes a high-sensitivity fiber magnetic field sensor based on a Mach-Zehnder interferometer and a photoelectric oscillator. According to the principle of the sensor based on the photoelectric oscillator, the relationship between the wavelength sensitivity of the designed Mach-Zehnder interferometer and the frequency sensitivity of the photoelectric oscillator is established, revealing that the frequency sensitivity of the photoelectric oscillator increases as the wavelength sensitivity increases. In this design, the Mach-Zehnder interferometer is constructed by splicing a tapered fiber between two single-mode fibers with an offset, which can split the light emitted by a broadband light source into sinusoidal-shaped waves. Experimental results show that within the magnetic field range of 1.6 mT to 12.8 mT, the frequency sensitivity of the sensor is 324 Hz/mT, with a corresponding measurement error within ±0.96 mT.

Key words: fiber optic sensing; photoelectric oscillator; magnetic fluid; magnetic field sensor; tapered fiber

0　引言

磁场测量在航空航天、生物医药、地质勘探和导航等领域发挥着重要应用价值[1]。传统的磁场传感器存在体积大、成本高、无法小型化和易受电磁干扰等问题，而光纤传感器因其抗电磁场干扰、体积小、灵敏度高、长距离传输和多路复用等优点在磁场检测领域更具优势。通过将光纤与磁敏感材

收稿日期：2025－02－01.

基金项目：吉林省科技发展计划项目（20220201061GX）.

* 通信作者：董　玮

料（如磁流体[2]、磁致伸缩材料[3]、磁致旋光材料[4]等）结合，可以构成光纤磁场传感器。目前，已有许多研究提出基于磁流体和各种光纤结构的光纤磁场传感器，涵盖了干涉测量[5]、光栅技术[6]和共振原理[7]等不同方法。然而，大多数光纤传感器仍依赖光谱仪进行波长解调，而光谱仪本身存在的低分辨率和扫描速度慢等问题，成为制约光纤传感器在某些应用领域广泛使用的瓶颈。

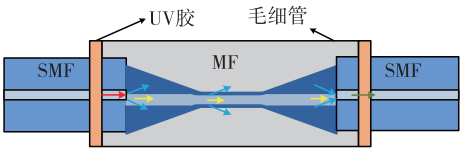
微波光子学[8]作为光学与电子学的一个交叉学科，结合了微波技术与光子技术的优势，具有带宽大、损耗低、重量轻、抗电磁干扰等优点。将光信号的改变映射到射频域内电信号的幅度或频率变化上[9]，可以显著提高传感器的解调速度和分辨率。光电振荡器（OEO）是微波光子技术中的重要组件，能产生低相位噪声和高质量微波信号。1996年，Yao和Maleki建立了OEO的理论基础，并通过实验验证了其有效性[10]。鉴于OEO本身的优势，目前已经报道了大量基于OEO的传感器，实现了对温度[11]、应变[12]、折射率[13]等参数的测量。在磁场测量方面，2020年，Zhang等验证了一种基于OEO的磁场传感器[14]，该传感器将双臂马赫-曾德尔干涉仪（MZI）和巨磁致伸缩材料结合，实现了高灵敏度磁场传感。尽管该传感器测量范围大且灵敏度高，但其复杂性较高，在实际应用中面临挑战。2021年，Feng等提出一种基于光纤布拉格光栅（FBG）和OEO的磁场传感器[15]，虽然该传感器灵敏度较高，但其传感探头尺寸较大，限制了其在有限空间内的潜在应用。2022年，Sun等提出一种将蚀刻FBG与OEO相结合的新型光纤磁场传感器[16]，通过将磁流体（MF）嵌入去除包层的FBG中以实现磁场测量，但由于光纤光栅腐蚀深度浅，其灵敏度相对较低。

针对以上问题，本文提出一种基于MZI和OEO的磁场传感器，MZI由两段单模光纤错位熔接一段锥形光纤构成。与普通光纤相比，锥形光纤的模场直径为微米或纳米量级，极大增强了光在光纤中传输时的倏逝场，从而显著提高了光纤传感器的灵敏度及响应速度。此外，相较于其他传感器，该结构设计简单、易于制作且体积小巧，便于应用于实际场景中。将所设计的光纤磁场探头连接到具有高信噪比的双环OEO中，可以使被测对象映射到微波域中的振荡频率，而非光学域中的波长变化。实验结果表明，在1.6～12.8 mT范围内，该传感器的频率灵敏度为324 Hz/mT，对应的测量误差在±0.96 mT以内。由于该方法将测量从光域转移到电域，显著提升了传感器的灵敏度和测量精度。

1 基本原理

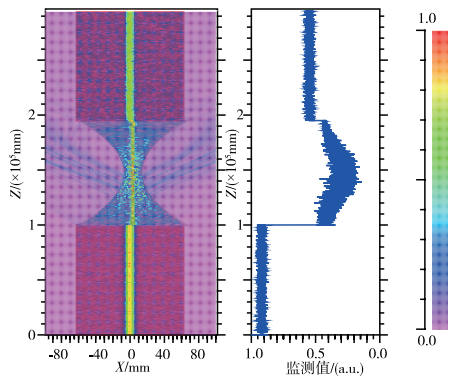
1.1 MZI传感结构

在以往基于MZI的微波光子滤波器（MPF）的研究中，常采用两条不同长度的光纤来制作MZI。然而，这种基于MPF的OEO只能用于感知温度、应力等变化，不能感知环境中的折射率变化。本研究提出一种改进方案，通过在两根单模光纤（SMF）之间拼接一段锥形光纤来构建MZI，该结构能有效感知环境中折射率的变化。图1（a）和（b）分别展示了MZI传感探头的结构图和封装后的实物图。光源发出的光经过干涉仪的第一个错位熔接点后，一部分光在纤芯中传输，另一部分光在包层中传输。当经过第二个错位熔接点后，包层中的光被部分耦合回纤芯。由于纤芯和包层中的光经历了不同的光程，进而产生干涉现象。其中，中间部分光纤是一段纤芯直径比较小的单模光纤（HI-1060），长度为9.5 cm，错位拼接的长度为5.5 μm。将熔接好的光纤放入熔融拉锥系统中进行拉锥，减小光纤的直径可以有效激发光纤高阶模式，使其对外界环境变化更加敏感，实现提高传感器灵敏度的目的。将熔接好的传感结构插入内径为1 mm、长度为10 cm的毛细管中，先将毛细管的一端用UV胶密封，用针管在其中的空气腔中注入MF后，将另一端口也密封起来。MF是一种稳定的胶体，主要由磁性纳米颗粒（Fe_3O_4和g-Fe_2O_3）、表面活性剂（羧基、胺、羟基和硫）和液体载体（碳氢化合物、水和液态金属）组成，具有固体磁性材料的磁性和液体的流动性[20]。实验中使用EMG705型号的磁流体，其磁性纳米颗粒直径为10.00 nm，饱和磁化率为110 emu/g，磁性颗粒密度为1.2 g/cm^3，表面张力为75 mN/m。



（a）MZI传感探头结构图


（b）MZI传感探头实物图



（c）MZI光场分布图　（d）MZI输出光强图

图1　MZI设计图

图1(c)和(d)为使用光束传播方法沿上述MZI模拟的光场和强度分布图，模拟中设置的参数如表1所示，其中背景折射率设置为1.405，恰好等于实验中所使用MF的折射率。纵轴Z代表所设置光纤的长度，蓝色曲线表示光强监测值，可以看出，由于模场失配，一部分光场从SMF耦合到HI-1060包层中，然后在锥区产生的强倏逝场泄漏到HI-1060包层外，与MF发生相互作用，导致光谱发生移动。

表1　MZI结构仿真参数

参数	SMF	HI-1060
纤芯折射率	1.448	1.48
包层折射率	1.444	1.47
纤芯直径/μm	9	5.3
包层直径/μm	125	125
SMF和HI-1060之间的偏移距离/μm	5.5	5.5
锥区长度/mm	—	17
锥区包层直径/μm	—	20

1.2　OEO传感原理

图2是磁场传感系统结构图，该系统由宽带光源（ASE）、偏振控制器（PC）、马赫-曾德尔调制器（MZM）、光耦合器（OC）、单模光纤（SMF）、掺铒光纤放大器（EDFA）、光电探测器（PD）、电滤波器（EBPF）、电放大器（EA）、功分器（Div）、频谱分析仪（ESA）等器件组成。其中，宽带光源、马赫-曾德尔调制器、并联的两盘光纤、光电探测器、电滤波器、电放大器、功分器以及耦合器构成完整的双环路OEO系统，而宽带光源、马赫-曾德尔调制器、光纤和光电探测器则构成一个单通带MPF。

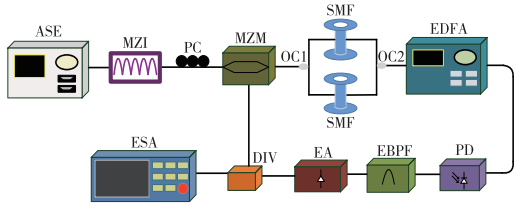


图2　OEO系统结构图

光纤MZI的自由光谱范围（FSR）决定MPF的中心频率，它受磁场强度的影响。具体而言，FSR的变化可以映射到微波频率的变化上。因此，通过监测微波频率的变化可以测量磁场强度。当ASE发出的光经过MZI时，在锥形区域一部分光会由纤芯泄漏到外部环境中。由MZI输出光的光强可表示为：

$$I = I_c + I_a + 2\sqrt{I_c I_a}\cos\Delta\Phi \tag{1}$$

式中，I_c和I_a分别是通过纤芯和空气腔的光强，Φ是它们之间的相位差，表示为：

$$\Phi = \frac{2\pi\Delta n_{eff} L}{\lambda} = \frac{2\pi\left|n_c - n_a\right| L}{\lambda} \tag{2}$$

式中，n_c和n_a分别是纤芯和包层的折射率，Δn_{eff}是它们之间的有效折射率差，L是锥形区域的长度，λ是入射光波长。通过在空气腔中注入MF，当外加磁场作用于MF时，磁性颗粒沿磁场方向形成链状结构。随着磁场强度的改变，MF也会发生移动，其折射率和折射率差发生变化，进而导致两条光路的相位差发生改变。MZI的FSR可表示为：

$$FSR = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{eff} L} \tag{3}$$

宽带光源发出的光经过MZI切割后进入MZM调制，调制后的光信号通过并联的两盘光纤和EDFA，然后进入PD拍频生成电信号。由两盘光纤构成的双环路OEO系统可以视为两个具有不同选模特性的谐振腔，只有满足两个环路同时起振的条件，振荡模式才能稳定起振。这种设计能够有效抑制边模，提高了系统的稳定性及解调性能。PD产生的电信号经过EBPF滤波和EA放大后由功分器分为两路，一路输入到ESA进行监测，另一路反馈到MZM中形成OEO闭合回路。其中MPF的中心频率由MZI的FSR决定，表示为：

$$f_0 = \frac{1}{D \times FSR} = \frac{\Delta n_{eff} L}{D\lambda^2} \tag{4}$$

式中，D为光纤的色散系数。由公式(4)可以看出，外加磁场的变化会引起折射率差的变化，进而会影响中心频率的变化。且传感器的灵敏度除了与两条光路的折射率差有关，与光纤的色散也有关系。

在该系统中，OEO产生的微波信号频率等于MPF的中心频率。由于环路的总色散是固定的，

OEO的振荡频率只受MZI的FSR影响，它与有效折射率差成线性比例。当磁场强度变化时，MZI的有效折射率差会发生变化，FSR也会发生变化，从而引起OEO输出微波信号频率的变化。

2 实验结果分析

2.1 MZI磁场响应特性实验

为验证传感器的响应特性，进行实验分析。实验装置图如图3所示，利用光谱分析仪（OSA）对MZI的输出光谱进行监测。

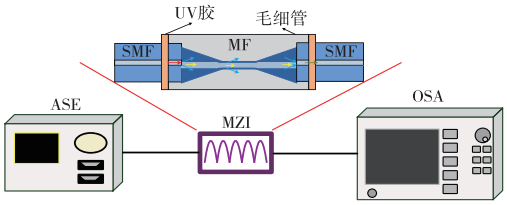


图3 磁场响应测试系统示意图

为粗略探究不同折射率环境对MZI输出光谱的影响，分别测量该传感结构置于水中与MF环境中MZI输出光谱图如图4。由图可知，在MF环境下该结构的FSR较大，但仍有较好的干涉对比度。

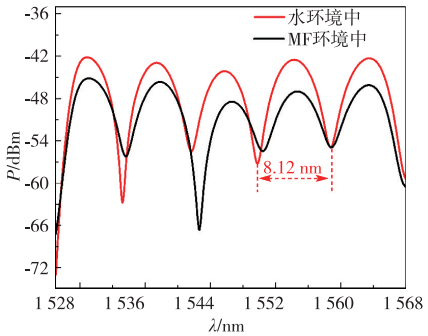
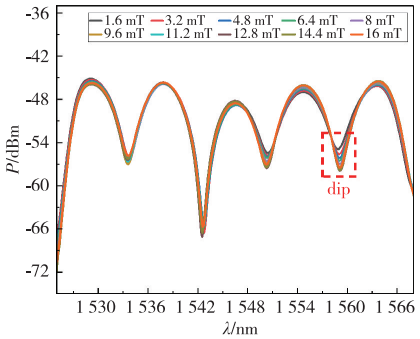


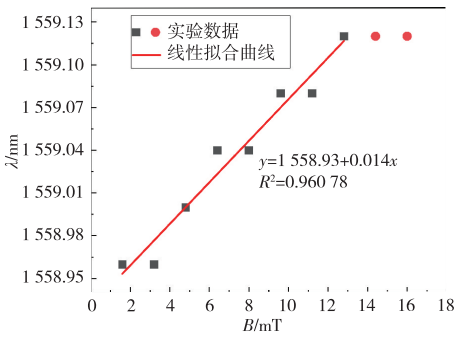
图4 MZI输出光谱图

水环境中MZI的FSR测量值为8.12 nm，由于MZI的FSR较大，可能使OEO不稳定。因此，在OEO环路中放置EBPF来提高稳定性，通过EBPF和MPF相结合来实现振荡模式选择。EBPF的中心频率为2 GHz，带宽为25 MHz，振荡频率将被限制在这个频率范围内。该频率范围内振荡模式的增益由MPF调节，MPF的频率响应由磁场强度决定。由于模态竞争，增益最大的模式会产生振荡。

通过测量MZI透射光谱的中心波长来检测磁场的变化，如图5为不同磁场强度下的实测光谱图。从图5(a)可以看出，随着磁场强度的增加，MZI的共振波长向长波方向发生移动，但当磁场强度增大到一定值时，光谱不再发生移动，这是因为磁流体的折射率存在饱和[17]。随着磁场强度的增大，当达到阈值时，磁流体的折射率将不再改变，因此在进行中心波长与磁场强度的线性拟合时，并未将最后两组数据拟合。通过对图5(a)中dip处的波长进行线性拟合，该系统最终测得的波长灵敏度为14 pm/mT。这表明在此分辨率下，光谱分析仪很难区分其变化。因此，传统的光纤干涉传感器在进行高精度测量时存在分辨率差的缺点。



(a) 不同磁场下的实测光谱图



(b) 波长与磁场的关系图

图5 不同磁场强度下的实测光谱图

2.2 基于OEO系统的磁场传感实验

为测量磁场强度的变化，利用图2所示的装置，MZM的带宽为10 GHz，半波电压为5.7 V，PD的带宽为15 GHz，EBPF的中心频率和带宽分别为2 GHz和25 MHz，使用一个5 km的单模光纤和1 km的单模光纤组成双环路作为色散源，其中1 km单模光纤色散系数为17 ps/nm，5 km单模光纤色散系数为85 ps/nm。

通过调整EDFA和EA的放大倍数，使环路增益大于1，OEO开始起振。首先对该系统边模抑制比进行测量，图6展示了生成的2.005 88 GHz信号的频谱，模式间隔为42.291 kHz，与理论值吻合，其边模抑制比高达49.5 dB，可满足精确传感应用。

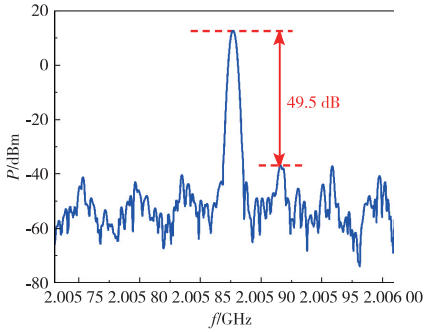
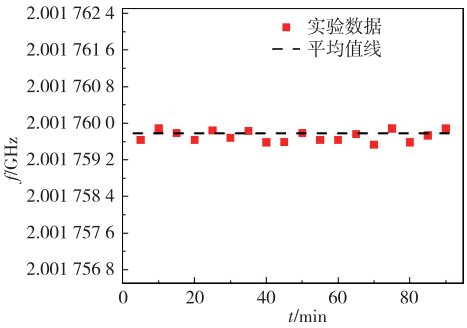
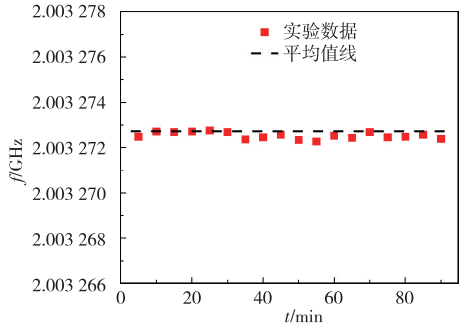


图 6　2.005 8 GHz信号下的频谱图

同时，振荡频率的稳定性是高精度测量的关键因素。图 7(a)和(b)展示了该系统在温度为 19℃和 24℃下，运行 90 分钟内的中心频率，测试间隔为 5 min。当温度为 19℃时，其频率漂移不超过 454 Hz，该组数据平均值 μ_1 为 2.001 759 8 GHz，标准差 σ_1 为 3.411×10^{-5}，约 90% 的数据落在 $(\mu_1-\sigma_1,\mu_1+\sigma_1)$ 区间内。当温度为 24℃时，其频率漂移不超过 471 Hz，该组数据平均值 μ_2 为 2.003 272 7 GHz，标准差 σ_2 为 1.033×10^{-5}，约 95% 的数据落在 $(\mu_2-\sigma_2,\mu_2+\sigma_2)$ 区间内。实验数据表明，两组测量结果均表现出极小的波动范围，这一结果充分证明了该系统在不同温度条件下仍能保持优异的稳定性。



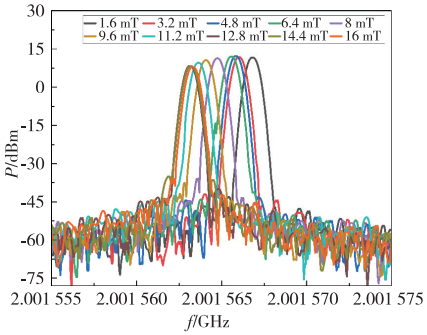
(a) 19 ℃时 90 分钟内 OEO 的稳定性



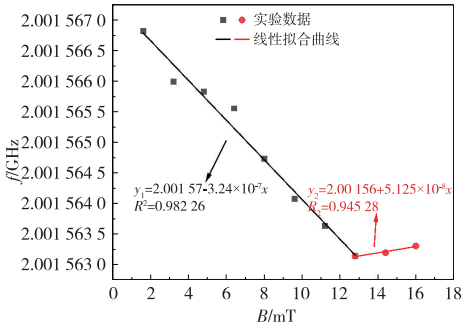
(b) 24 ℃时 90 分钟内 OEO 的稳定性

图 7　不同温度下 OEO 的稳定性

在基于该双环 OEO 的磁场探测实验中，磁场强度范围为 1.6～16 mT，测试间隔为 1.6 mT。图 8(a)为不同磁场强度下 OEO 的测量频率响应。在磁场强度为 1.6～12.8 mT 范围内，随着磁场强度的增加，振荡频率向低频偏移，这主要是因为随着磁场强度的增大，磁流体的折射率增大，有效折射率差减小。但在磁场强度为 12.8～16 mT 范围内，随着磁场强度的增加，振荡频率向高频发生微小移动，说明当磁场强度增大到一定值时，磁流体的折射率将达到饱和。由图 8(b)可知，在磁场强度为 1.6～12.8 mT 范围内，该传感器灵敏度为 324 Hz/mT。



(a) 不同磁场下的频谱图



(b) 振荡频率和磁场的关系图

图 8　不同磁场强度下的频谱图

此外还测量了该系统的测量误差，使用高斯计(TM5100)对磁场进行测量，其探头最小分辨率为 0.01 mT，测量结果如图 9。测量误差定义为施加磁场与灵敏度拟合曲线得出的测量值之间的差值。由图 9 可知，测量的磁场误差在 ±0.96 mT 以内。

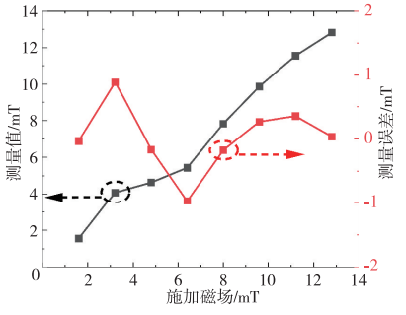


图 9　施加磁场与测量值的误差关系图

3 结论

本文提出一种基于MZI与OEO结构相结合的光纤磁场传感系统,并进行实验研究。其中宽带光源、马赫-曾德尔调制器、并联的两盘光纤、光电探测器、电滤波器、电放大器、功分器以及耦合器构成了完整的双环路OEO系统。而宽带光源、马赫-曾德尔调制器、光纤和光电探测器组成了一个单通带MPF,其中心频率受磁场的影响,中心频率变化可以转换为OEO的振荡频移。因此,可以通过测量频率变化来测量磁场强度。实验结果表明,在1.6~12.8 mT范围内,频率灵敏度为324 Hz/mT,对应的测量误差在±0.96 mT以内。该传感器具有较高的灵敏度和稳定性。

参考文献:

[1] Lenz J, Edelstein S. Magnetic sensors and their applications [J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(3): 631-649.

[2] Alberto N, Domingues M F, Marques C, et al. Optical fiber magnetic field sensors based on magnetic fluid: A review[J]. Sensors, 2018, 18(12): 4325.

[3] Zhan B, Ning T, Pei L, et al. Terfenol-D based magnetic field sensor with temperature independence incorporating dual fiber Bragg gratings structure[J]. IEEE Access, 2021, 9: 32713-32720.

[4] Amirsolaimani B, Gangopadhyay P, Persoons A P, et al. High sensitivity magnetometer using nanocomposite polymers with large magneto-optic response: Retraction[J]. Optics Letters, 2020, 45(20): 5879.

[5] Xu J, Huang K, Zheng J, et al. Sensitivity enhanced magnetic field sensor based on hollow core fiber Fabry-Perot interferometer and vernier effect[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(4): 6841205.

[6] Liu H, 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.

[7] Wang J, Pu S, Hao Z, et al. Comparative study of lab-on-fiber vector magnetic field sensor based on multimode and few-mode fiber[J]. Measurement, 2023, 207: 112441.

[8] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.

[9] 李 明, 郝腾飞, 李 伟. 微波光子与多学科交叉融合的前景展望(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(7): 8-11.
Li Ming, Hao Tengfei, Li Wei. Prospects of cross research between microwave photonics and multidiscipline(Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(7): 8-11.

[10] Yao X S, Maleki L. Optoelectronic microwave oscillator[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1996, 13(8): 1725.

[11] Wang Y, Zhang J, Yao J. An optoelectronic oscillator for high sensitivity temperature sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(13): 1458-1461.

[12] Xu O, Zhang J, Deng H, et al. Dual-frequency optoelectronic oscillator for thermal-insensitive interrogation of a FBG strain sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(4): 357-360.

[13] Nguyen L D, Nakatani K, Journet B. Refractive index measurement by using an optoelectronic oscillator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(12): 857-859.

[14] Zhang N, Wang M, Wu B, et al. Temperature-insensitive magnetic field sensor based on an optoelectronic oscillator merging a Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(13): 7053-7059.

[15] Feng D, Gao Y, Zhu T, et al. High-precision temperature-compensated magnetic field sensor based on optoelectronic oscillator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(8): 2559-2564.

[16] Sun W, Liu X, Deng M. High-precision magnetic field sensor based on fiber Bragg grating and dual-loop optoelectronic oscillator[J]. Photonic Sensors, 2022, 12(4): 220419.

[17] Yang S Y, Chen Y F, Horng H E, et al. Magnetically-modulated refractive index of magnetic fluid films[J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(26): 4931.

作者简介:

田惠丽(2000—),女,河南省开封市人,硕士研究生,主要研究方向为基于光电振荡器的光纤传感;

董 玮(1973—),女,黑龙江省富锦市人,教授,博士生导师,主要研究方向为微波光子学和分布式光纤传感。