

基于回音壁模式微泡腔的磁场传感研究

赵星昀^{1,2}, 宋继恩³, 段冰^{1,2}, 吴彦燃^{1,2}, 马春晖^{1,2}, 李贝贝⁴, 杨大全^{1,2*}, 黄善国^{1,5}

1. 北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876;
2. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876;
3. 江苏深远海洋信息技术与装备创新中心, 苏州 215000;
4. 北京凝聚态物理国家研究中心, 中国科学院物理研究所, 北京 100190;
5. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876

*联系人, E-mail: ydq@bupt.edu.cn

国家自然科学基金(编号: 11974058、62222515、12174438)、北京市自然科学基金(编号: Z210004)、北京市科技新星计划(编号: Z201100006820125)、北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室(编号: IPOC2021ZT01)项目资助

摘要 本文设计了一种基于磁流体的回音壁模式(Whispering Gallery Mode, WGM)微腔磁场传感方案, 并进行了实验验证. 利用 WGM 微泡腔天然的微流控通道, 可以直接向微腔中注入磁流体, 使磁流体与 WGM 倏逝场充分地相互作用. 我们通过仿真分析了注入磁流体前后 WGM 光场分布的变化以及微泡腔壁厚对传感灵敏度的影响; 实验上, 我们制备了微泡腔, 并进行了磁场传感实验研究. 当施加的外界磁场逐渐增大时, 磁流体的折射率随之增大, 导致微泡腔共振波长红移, 在 6-22 mT 的磁场强度范围内, 测得该磁场传感器的灵敏度为 2.15 pm/mT, 探测极限(即最小可探测的磁场变化量)约为 0.03 mT. 当磁场强度达到 22 mT 时, 磁流体折射率达到饱和值, 此时继续增大磁场强度, 谐振波长不再偏移. 本文制备的磁场传感器具有成本低、易于制备、可靠性高的优势, 在磁场检测领域具有重要的应用价值.

关键词: 回音壁模式, 微泡腔, 磁流体, 磁场传感

PACS: 07.55.Ge, 42.60.Da, 42.79.Pw

1 引言

弱磁场探测在医学诊断^[1-2]、工业生产^[3]、导航定位^[4]、资源勘探^[5]、军事工程^[6]等领域都发挥着至关重要的作用. 传统的磁场传感器主要是基于电磁效应的电传感器, 如磁通门计、基于微机电系统的磁传感器和霍尔磁力

仪等^[7]. 这些传感器容易受到电磁干扰, 且体积大、成本高, 应用范围受到限制^[8]. 而基于光学微腔、光纤等光学器件的磁场传感器通过光学特性的变化来检测磁场信号, 具有抗电磁干扰能力强、体积小和传感灵敏度相对较高的优势^[9]. 将磁性敏感材料注入或附着在光学谐振腔上, 可将磁场信号转换为光信号, 通过检测谐振腔光谱的变化来实现对磁场的检测. 磁流体是一种新型的磁敏材料, 其本质是一种黑棕色胶体溶液, 由基液、均匀分布在其中的磁性颗粒和防止磁性颗粒团聚的包裹在磁性颗粒表面的界面活性剂组成^[10]. 磁流体在外加磁场作用下具有折射率可调谐特性^[11], 且易于与微纳光学器件相结合, 因此被广泛应用于基于光学谐振腔的磁场传感中. 近年来, 各种与磁流体相结合的光学传感器在磁场传感方面的应用引起了人们的广泛关注. 例如, Yao 等人^[12]研究了多孔光纤磁场传感器, 向光纤的中心气孔内壁镀金从而形成表面等离子共振模式, 并将磁流体注入中心气孔中, 制备出具有表面等离子共振效应的高灵敏度多孔光纤磁场传感器. Xu 等人^[13]通过在多模光纤的两端各熔接一段单模光纤, 利用不同模式的光之间的干涉作用组成马赫-曾德尔干涉仪, 用玻璃管封装光纤并将磁流体填充在玻璃管中, 利用磁场强度变化时磁流体的折射率可调谐特性使透射谱谐振波长发生偏移, 从而实现对磁场强度的测量. Zhao 等人^[14]提出了基于游标效应的法珀(Fabry-Perot, FP)腔磁场传感器, 将毛细管与末端涂有金膜的单模光纤拼接在一起, 通过玻璃管封装该传感器以便注入磁流体, 组成了具有多个FP腔的复合光纤谐振器, 利用2个FP腔之间的游标效应, 实现了对磁场强度的测量. Zhu 等人^[15]将单模光纤弯曲成气球状结构, 该结构可以激发非中心对称分布的高阶包层模, 用磁流体包裹该结构, 利用磁流体的折射率可调谐特性和磁性粒子在磁场中的各向异性实现对磁场强度和磁场方向的传感. 这些传感器都是基于光纤结构实现的, 不易与磁流体相结合, 需要对光纤进行进一步加工, 制作额外的微流通道来填充磁流体, 这增加了制备成本和器件尺寸^[16]. 因此, 具有天然微流通道的微泡腔磁场传感器可以进一步减小器件尺寸和成本, 更易于实现器件的集成.

中空的微泡腔是 WGM 光学微腔中的一种, 不仅有 WGM 微腔本身的高品质因子、低模式体积、高传感灵敏度等优点^[17], 还具有天然的微流控通道, 近年来被广泛应用于基于流体的传感研究中, 如气体传感^[18]、溶液 PH 值测量^[19]、溶液浓度传感^[20]、流速传感^[21]、水凝胶相位传感^[22]、压强传感^[23]等领域. 因此, 将磁流体直接注入到微泡腔微流通道中, 可以使光场与磁流体有效地相互作用, 实现对磁场强度的检测, 具有成本低、体积小、易制备的优势.

本文利用磁流体在磁场作用下折射率可调谐从而引起 WGM 微泡腔模式移动传感机制, 研究并制备了注入磁流体的微泡腔磁场传感器. 通过理论分析和仿真, 研究了微泡腔壁厚对磁场传感的影响; 并在实验研究了注入磁流体的微泡腔的磁场传感性能. 实验结果表明, 该磁场传感器能够实现对磁场强度的测量, 传感灵敏度达到 2.15 pm/mT, 探测极限约为 0.03 mT, 且具有体积小、易制备、易与功能材料结合、可靠性高等优点, 提供了一种简单高效的测量弱磁场的实验方案.

2 器件制备和传感原理

如图 1(a)所示, 该传感器由注入磁流体的微泡腔及其耦合光纤锥构成. 该传感系统的制备过程如下: 首先, 采用二氧化碳激光器加热法制备微泡腔, 对二氧化硅毛细管进行拉锥, 用注射器向拉锥后的毛细管内充气以增

加内部气压, 再通过二氧化碳激光器加热空心毛细管使得毛细管径向膨胀, 产生微泡腔, 制备的腔壁厚约为 2-5 μm ; 然后用注射器向微泡腔中注入磁流体, 由于选用的磁流体(Ferrotec EMG605, 磁性颗粒体积浓度 3.9%)初始浓度较高, 具有较强的吸光性, 注入前需要将磁流体和蒸馏水以 1:4 的体积比混合以稀释磁流体, 注入稀释的磁流体后, 再用紫外胶密封微泡腔的两端, 防止磁流体泄漏; 随后, 采用氢焰加热法制备单模光纤锥, 将光纤锥直径拉至为 1 μm 左右, 用于与微泡腔进行耦合; 最后, 将单模光纤锥与微泡腔分别放置在三维平移台上, 以精确控制二者的相对位置, 从而实现光纤锥与微泡腔的耦合.

当未施加磁场时, 磁流体中的磁性颗粒均匀散布其中, 如图 1(b)所示. 当施加外界磁场后, 磁性颗粒开始凝聚并沿磁场方向分布产生链^[24], 如图 1(c)所示. 这里, 施加的磁场方向与毛细管轴向垂直, 从图中可以清楚看到, 毛细管内形成了若干个沿垂直于毛细管轴方向排列的磁链. 磁性粒子的聚集导致磁流体发生固相、液相的分离, 使得磁流体的相对介电常数变化, 磁流体折射率也会随之发生改变. 磁流体折射率的变化与磁场强度的变化有关. 郎之万函数可以表征磁流体折射率与磁场强度和温度的关系^[25]:

$$n_{\text{MF}} = \begin{cases} n_0, & H < H_{\text{c,n}} \\ (n_s - n_0) \left[\coth \left(\alpha \frac{H - H_{\text{c,n}}}{T} \right) - \frac{T}{H - H_{\text{c,n}}} \right] + n_0, & H > H_{\text{c,n}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $H_{\text{c,n}}$ 为使磁流体折射率变化的最小磁场强度, n_0 是磁场强度小于 $H_{\text{c,n}}$ 时磁流体的折射率, n_s 是磁流体折射率的饱和值, H 是外界施加的磁场强度, T 是外界温度, α 是拟合参数. 当外界温度、磁流体中磁性粒子浓度不变时, 磁流体的折射率受到磁场强度的调控. 利用该特性可改变 WGM 的共振频率, 通过测量微泡腔透过率谱的变化来实现磁场传感. 微泡腔产生 WGM 的谐振条件为^[26]:

$$2\pi R n_{\text{eff}} = m\lambda \quad (2)$$

其中 R 为激发 WGM 处的微泡腔半径, n_{eff} 为 WGM 的有效折射率, m 为 WGM 的方位角模式数. 磁流体折射率的变化会引起 n_{eff} 的变化, 使得谐振波长 λ 发生移动, 通过测量磁场强度变化时谐振波长的移动量, 可以实现对磁场强度的检测.

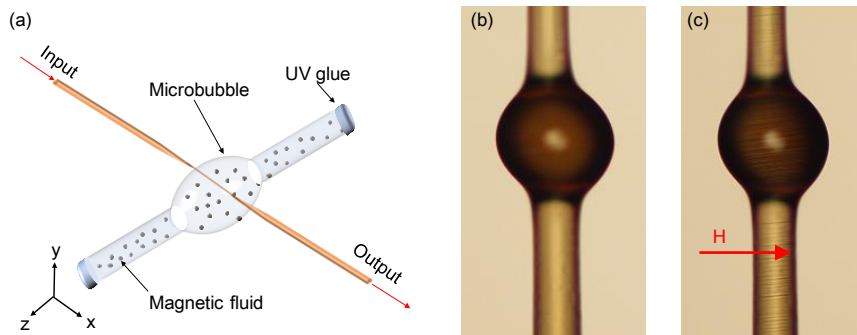


图 1 (a) 注入磁流体的微泡腔与光纤锥耦合的结构示意图; (b) 无外加磁场和(c) 外加 15 mT 磁场的注入磁流体的微泡腔光学显微图像

Figure 1 (a) Schematic diagram of the Hollow-core Microbubble Resonator (HMR) infiltrated with magnetic fluid (MF) coupled with a tapered fiber. (b) and (c) Optical microscopic images of the HMR infiltrated with MF without magnetic field and with the applied magnetic field intensity of 15 mT.

图 2 是注入磁流体前后的 WGM 赤道面模式的光场分布, 通过 COMSOL Multiphysics 5.6 软件仿真得到. 图 2(a)-(c)为注入磁流体前 WGM 的 3 个径向模式的光场分布(3 个模式从左到右径向模式数 q 分别为 1、2、3, 角向模式数 l 均为 1). 图 2(d)-(e)为注入磁流体后这 3 个径向模式的光场分布. 可以看到, 注入磁流体后, 更多光场进入腔内, 且径向模式数越高, 进入腔内的光场越多, 因此与腔内磁流体之间的有效相互作用越强. 因此, 在实验中应选择较高阶的径向模式进行磁场传感, 以提高传感灵敏度.

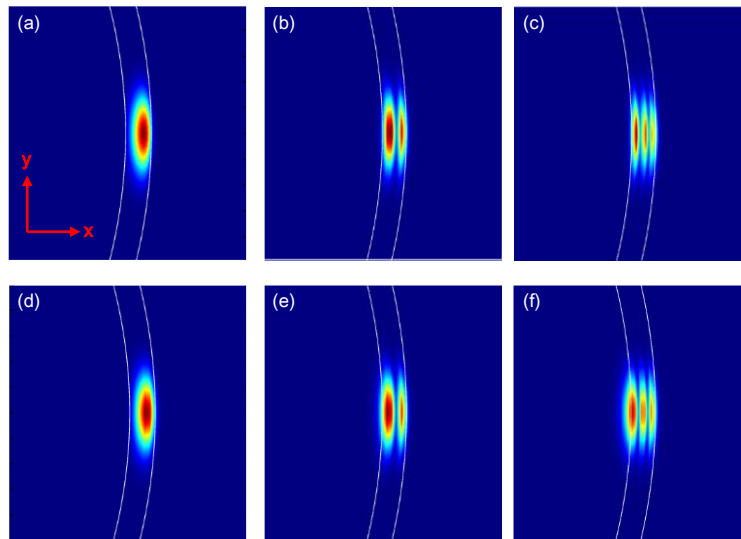


图 2 注入磁流体前后的微泡腔赤道面上(a)(d) 一阶径向模、(b)(e) 二阶径向模以及(c)(f) 三阶径向模的场分布

Figure 2 (a)-(c) Equatorial-plane optical field distributions of the first-, second-, and third order radial modes of the microbubble, before filling with MF. (d)-(f) Optical field distribution of the three modes of the microbubble, after filling with MF.

此外, 基于微泡腔的微流体传感灵敏度还与微泡腔的壁厚有关. 通过减小微泡腔壁厚, 可以有效增强溶液内光场强度, 从而提高磁场传感的灵敏度^[16]. 图 3 展示了不同壁厚下的赤道面径向高阶模的光场分布. 从图中可以看出, 当微泡腔壁厚减小时, 溶液内光场增强, 因此可以加强磁流体与光场的相互作用, 磁场传感的灵敏度也会随之提高. 因此, 本文选择壁厚 d 较小(2-3 μm)的微泡腔进行后续的磁场传感实验.

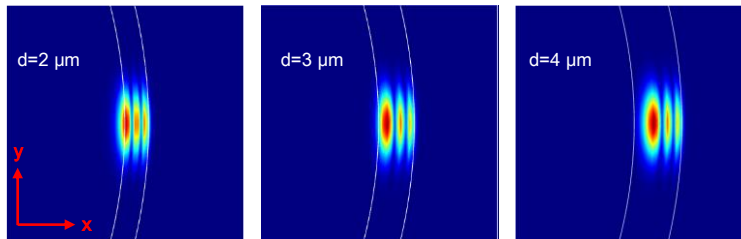


图 3 不同壁厚下的微泡腔赤道面径向三阶模式场分布

Figure 3 Optical field distribution of the equatorial-plane third order radial mode in the HMR with different wall thicknesses.

3 实验装置及结果分析

磁场传感实验装置如图4所示. 为了减小液体中光的吸收, 我们采用 780 nm 可调谐激光器作为光源, 来激发微泡腔的回音壁模式, 采用偏振控制器来调节激光的偏振状态, 从而与微泡腔的模式偏振匹配. 激光通过光纤锥与微泡腔发生倏逝场耦合从而激发微泡腔的 WGM, 然后输出光信号由光电探测器收集, 光电探测器可将光信号转化为电信号, 一路输入至示波器实时观测扫描范围内的光的透过率谱, 另一路输入至数据采集卡实时采集光谱数据, 来记录透射谱的实时变化情况. 在毛细管轴两侧加入永磁体(磁铁)以施加外界磁场, 通过移动磁铁来调节磁铁与毛细管轴之间的距离来改变磁场强度, 用高斯计实时测量微泡腔和光纤锥耦合位置附近的磁场强度.

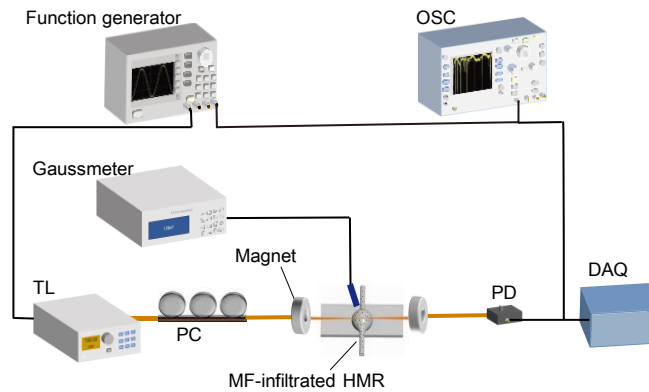


图4 实验装置示意图. TL: 可调谐激光器; PC: 偏振控制器; PD: 光电探测器; DAQ: 数据采集卡; OSC: 示波器

Figure 4 Schematic diagram of the experimental setup. TL: tunable laser; PC: polarization controller; PD: photodetector; DAQ: data acquisition board; OSC: oscilloscope.

实验中, 我们保持室温为 25 °C, 首先测量未注入磁流体时微泡腔的透过率谱, 然后向毛细管中注入磁流体, 记录注入磁流体前后透过率谱的变化, 结果如图5所示. 可以看出注入磁流体后, 整体的透过率谱高度降低, 且共振模式数量减少, 模式线宽展宽. 这是因为磁流体具有一定的光吸收性, 因此增加了透射光的损耗及微腔模式的损耗^[27].

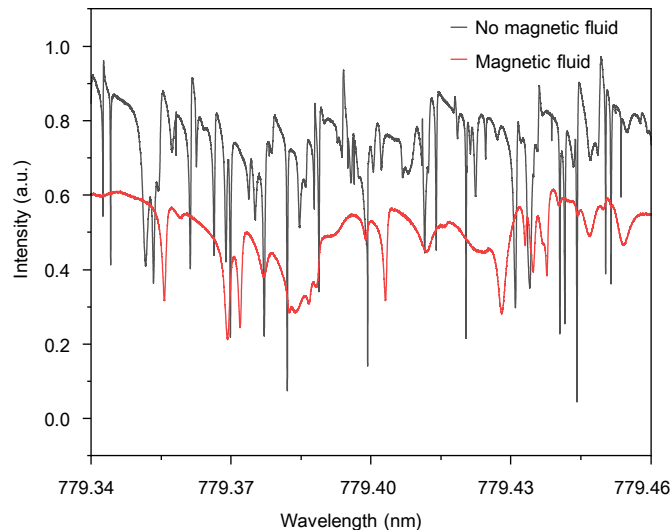


图5 微泡腔中注入磁流体前后的透射谱

Figure 5 Transmission spectra of the microbubble before and after filling with MF.

注入磁流体后, 我们选用毛细管上多个微泡腔分别于光纤锥进行耦合, 选出模式线宽较窄且耦合效率较高的微泡腔进行后续的磁场传感实验, 我们所选用的微泡腔的壁厚约为 $2.95 \mu\text{m}$, 测得的透射谱如图 6(a)所示, 对图中红色虚线框标出的谐振模式进行洛伦兹拟合, 拟合结果如图 6(b)所示, 从中得到模式的 Q 值约为 3.86×10^5 .

我们在垂直于毛细管轴的方向上施加外界磁场, 并逐渐增大磁场强度(施加的磁场强度范围为 6 mT - 24 mT , 步进为 4 mT), 测得的透射谱随磁场强度增大时的演变情况如图 7(a)所示. 从图中可以看出, 在 6 mT - 22 mT 的磁场强度范围内, 共振模式的波长随着磁场强度增大而红移. 这是由于随着磁场增加, 磁流体的折射率增大, 从而造成 WGM 的有效折射率增大, 引起模式的红移. 当磁场强度大于 22 mT 时, 共振模式的波长基本不再移动, 这是因为我们所选用的磁流体(Ferrotec EMG605)对应的饱和磁场强度为 22 mT , 即当磁场强度达到 22 mT 时, 磁流体中的磁性粒子均有序排列形成磁链, 磁流体折射率达到饱和值 n_s ^[28], 此时继续增大磁场强度, 磁链不再增加, 磁流体的折射率不再变化, 因此共振波长不再移动. 为了进一步排除激光器噪声、空气流动、温度漂移等环境因素对传感实验的干扰, 我们测量了磁场强度不变(保持为 6 mT)时, 进行磁场传感实验的时间范围内共振模式波长的稳定性, 得到的结果如图 7(c)和(d)所示, 图 7(c)是透射谱随时间的演化结果. 取透射谱中的一个谐振波(波长为 778.57 nm)进行处理, 如图 7(d)所示, 在 290 s 左右的时间范围内, 该谐振波的最大波长偏移量为 0.7 pm . 而在相同的时间范围内, 磁场强度从 6 mT 增大到 22 mT 导致的模式偏移量为 39 pm . 环境噪声引起的模式偏移量远小于磁场强度变化引起的模式偏移量, 因此环境噪声因素对磁场传感的干扰较小, 该磁场传感系统具有较好的稳定性. 此外, 如图 7(d)插图中蓝色阴影区域所示, 微泡腔共振波长的短时噪声水平(即 1 s 内共振波长偏移量的标准差)大约在 0.07 pm 水平, 结合其传感灵敏度为 2.15 pm/mT , 可以得到该微泡腔磁场传感器的检测极限约为 0.03 mT .

作为对比, 表 1 列出了本文报道的 WGM 微泡腔磁场传感器和其他类型的 WGM 微腔磁场传感器的传感器结构、品质因子、传感灵敏度和检测极限. 与基于二氧化硅微球腔、侧边抛磨光纤结合微球腔、硼硅微球腔结构等磁场传感器相比, 该传感器所用的中空微泡腔具有天然的微流控通道, 具有制备工艺简单、成本低的优势. 与基于微毛细管结构的回音壁微腔磁场传感器相比, 本实验研制的传感器的品质因子较高, 检测极限更低, 更适用于弱磁场的测量. 与粘接磁致伸缩材料的微泡腔磁场传感器相比, 该传感器的磁场灵敏度更高. 因此, 该传感器在弱磁场检测领域具有一定的应用价值.

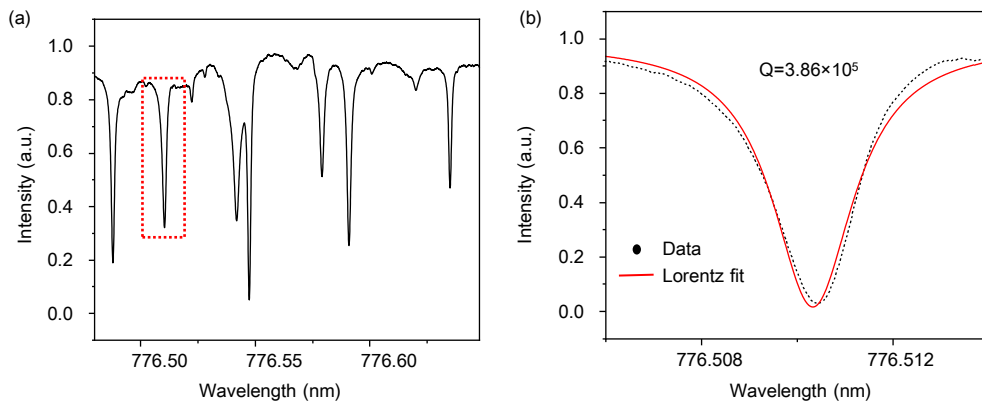
**图 6** (a) 壁厚为 $2.95 \mu\text{m}$ 的微泡腔在注入磁流体后的透射谱; (b) 对(a)图中框中所示模式进行洛伦兹拟合的结果

Figure 6 (a) Transmission spectrum for the HMR with a wall thickness of $2.95 \mu\text{m}$. (b) Lorentz fitting of the mode marked in the red dashed frame in (a).

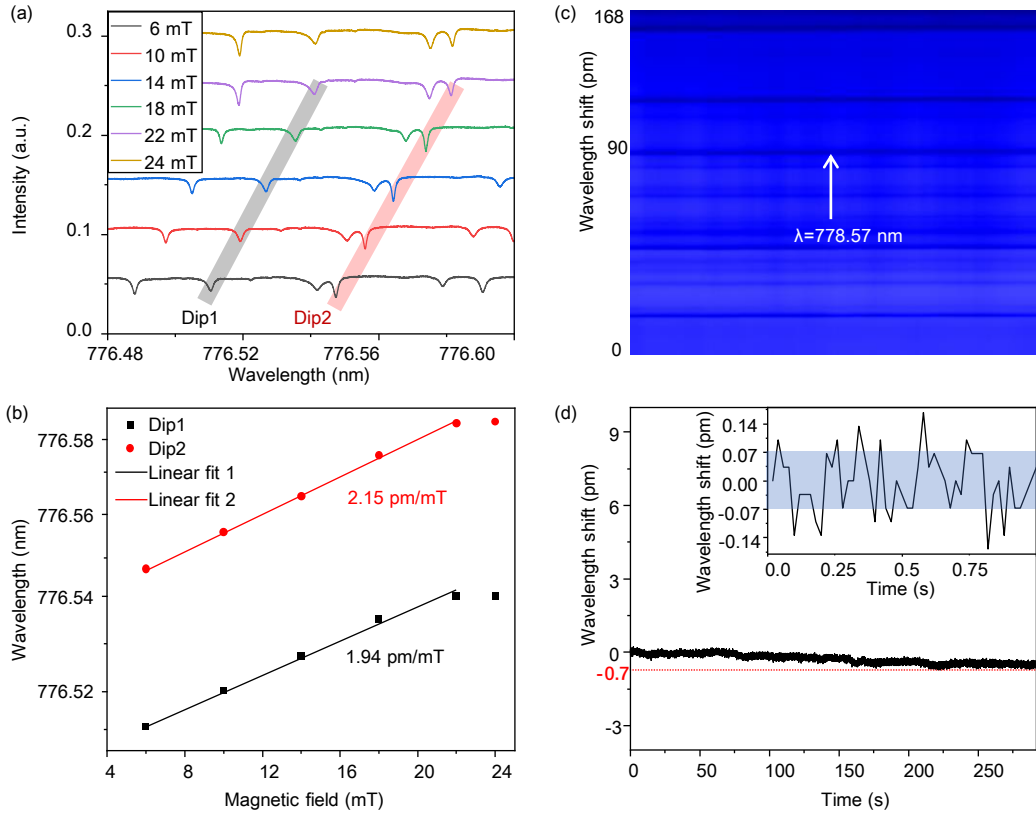


图 7 (a) 不同磁场强度下的微泡腔的透射谱的变化; (b) 共振波长与磁场强度的关系; (c) 磁场强度不变(恒定为 6 mT)时透射谱在 290 s 时间范围内的变化情况和(d) 778.57 nm 处的共振波长在 290 s 时间范围内的变化情况

Figure 7 (a) Transmission spectra of the microbubble under different magnetic field intensities. (b) Resonance wavelengths of the two modes marked in (a), as a function of the applied magnetic field intensity. (c) Transmission spectra evolution in 290 seconds. (d) Resonance wavelength of the 778.57 nm mode as a function of time for 290 seconds, with a constant magnetic field intensity of 6 mT.

表 1 不同类型的回音壁微腔磁场传感器性能对比

Table 1 Performance comparison of various WGM magnetic field sensors

传感器结构	品质因子	最大传感灵敏度	检测极限	参考文献
二氧化硅微球腔	7.8×10^4	5.036 pm/mT	—	[29]
可拉伸二氧化硅微球腔	6×10^7	7.73 pm/mT	1 μ T	[30]
侧边抛光光纤结合微球腔	2.4×10^4	-108 pm/mT	—	[31]
硼硅微球腔	1.1×10^7	4.0 pm/mT	—	[32]
微毛细管	2.58×10^3	75.7 pm/mT	2.2mT	[33]
微泡腔	2×10^4	0.081 pm/mT	—	[34]
微泡腔	3.86×10^5	2.15 pm/mT	0.03 mT	本文

4 结论

本文制备了基于注入磁流体的 WGM 微泡腔的磁场传感器, 在外加磁场的调节下, 磁流体折射率会发生变化, 引起 WGM 共振波长的移动, 从而实现磁场传感. 我们通过仿真研究了不同阶数的模式及微泡腔壁厚对 WGM 光场分布的影响, 仿真结果表明径向模式阶数越高, 微泡腔壁厚越小, 溶液内光场强度越强, 从而能够提高磁场传感灵敏度. 进一步, 我们采用薄壁(壁厚约 2.95 μm)的微泡腔进行磁场传感实验. 实验结果表明, 当磁场强度在 6-22 mT 的范围内变化时, 共振波长移动与磁场强度的变化呈线性关系, 该磁场传感器对磁场的灵敏度为 2.15 pm/mT, 探测极限约为 0.03 mT. 该传感器具有成本低、制备简单、易与功能材料相结合的优点, 在工业生产、国防建设等领域的磁场检测方面具有广阔的应用前景.

致谢 感谢北京师范大学俞晓舫老师的指导和帮助, 感谢评审人的批评指正.

参考文献

- 1 Ripka P. Magnetic sensors and magnetometers. *Meas Sci Technol*, 2002, 13(4): 645
- 2 Man J D, Chen G Y, Chen J M. Recent Progress of Biomimetic Tactile Sensing Technology Based on Magnetic Sensors. *Biosensors-Basel*, 2022, 12(11): 1054
- 3 Li Z B, Li G, Wen G J, et al. Intermittent magnetic field monitoring system based on passive RFID sensor tags. *IEEE Sens J*, 2022, 22(1): 819-831
- 4 Talor B K, Lohmann K J, Havens L T, et al. Long-distance transequatorial navigation using sequential measurements of magnetic inclination angle. *J R Soc Interface*, 2021, 18(174): 20200887
- 5 Hojjati-Najafabadi A, Mansoorianfar M, Liang T X, et al. A review on magnetic sensors for monitoring of hazardous pollutants in water resources. *Sci Total Environ*, 2022, 824: 153844
- 6 Grudzinski E, Szczepaniak M. Magnetic field detector to investigations of high magnetic field which influences on electronic equipment uses in military technique. *Przeł Elektrotech*, 2008, 84(27): 266-269
- 7 Lenz J, Edelstein A S. Magnetic sensors and their applications. *IEEE Sens J*, 2006, 6(3): 631-649
- 8 Alberto N, Domingues M F, Marques C, et al. Optical Fiber Magnetic Field Sensors Based on Magnetic Fluid: A Review. *Sensors*, 2018, 18(12): 4325

- 9 Liu C, Shen T, Wu H B, et al. Applications of magneto-strictive, magneto-optical, magnetic fluid materials in optical fiber current sensors and optical fiber magnetic field sensors: A review. *Opt Fiber Technol*, 2021, 65: 102634
- 10 Zhao Y, Liu X, Lv R Q, et al. Review on optical fiber sensors based on the refractive index tunability of ferrofluid. *J Lightwave Technol*, 2017, 35(16): 3406-3412
- 11 Tao Y, Li T, Feng W L. Reflective fiber-optic magnetic field sensor based on a magnetic-fluid-filled capillary probe structure. *Meas Sci Technol*, 2021, 32(9): 095117
- 12 Yao S Y, Yu Y, Qin S P, et al. Research on optimization of magnetic field sensing characteristics of PCF sensor based on SPR. *Opt Express*, 2022, 30(10): 16405-16418
- 13 Fu X H, Wang Y F, Ran R, et al. A multi-directional magnetic field sensor based on tapered few mode fiber and magnetic fluid. *Optik*, 2021, 240: 166817
- 14 Zhao Y, Wang X X, Lv R Q, et al. Highly sensitive reflective Fabry-Perot magnetic field sensor using magnetic fluid based on vernier effect. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2021, 70: 7000808
- 15 Zhu L Q, Lin Q J, Yao K, et al. Fiber vector magnetometer based on ballon-like fiber structure and magnetic fluid. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2021, 71: 6011509
- 16 Zhao S C, Zhang X B, Zhang Q, et al. Packaged optofluidic microbottle resonator for high-sensitivity bidirectional magnetic field sensing. *Opt Lett*, 2022, 47(11): 2766-2769
- 17 Liu J, Bo F, Dong C H, et al. Emerging material platforms for integrated microcavity photonics. *Sci China Phys Mech Astron*, 2022, 65(10): 104201
- 18 Peng Z D, Yu C Q, Ren H L, et al. Gas identification in high-Q microbubble resonators. *Opt Lett*, 2020, 45(16): 4440-4443
- 19 Stoian R I, Lavine B K, Rosenberger A T. pH sensing using whispering gallery modes of a silica hollow bottle resonator. *Talanta*, 2019, 194: 585-590
- 20 Li Z H, Zhu C G, Guo Z H, et al. Highly sensitive label-free detection of small molecules with an optofluidic microbubble resonator. *Micromachines*, 2018, 9(6): 274
- 21 Wang Z J, Zhang X B, Zhao S C, et al. High-sensitivity flow rate sensor enabled by higher order modes of packaged microbottle resonator. *IEEE Photonics J*, 2021, 33(12): 599-602

- 22 Yang D Q, Duan B, Wang A Q, et al. Packaged microbubble resonator for versatile optical sensing. *J Lightwave Technol*, 2020, 38(16): 4555-4559
- 23 Duan B, Zou H Y, Chen J H, et al. High-precision whispering gallery microsensors with ergodic spectra empowered by machine learning. *Photonics Res*, 2022, 10(10): 2343-2348
- 24 Hou F Y, Zhang X B, Wang Z J, et al. Magnetic fluid infiltrated microbottle resonator sensor with axial confined mode. *IEEE Photonics J*, 2020, 12(5): 6802709
- 25 Liu W Y, Li W, Wang R, et al. Magnetic sensor based on WGM hollow microbubble resonator filled with magnetic fluid. *Optics Commun*, 2021, 497: 127148
- 26 Liu Y L, Zhang H, Fan M S, et al. Bidirectional tuning of whispering gallery modes in a silica microbubble infiltrated with magnetic fluids. *Applied Optics*, 2020, 59(1): 1-8
- 27 Zhang Y N, Zhu N S, Gao P, et al. Magnetic field sensor based on ring WGM resonator infiltrated with magnetic fluid. *J Magn Magn Mater*, 2020, 493: 165701
- 28 Zhu R Z, Wan S J, Xiong T F, et al. Magnetic Field Sensing Based on Multimode Fiber Specklegrams. *J Lightwave Technol*, 2021, 39(11): 3614-3619
- 29 Xia J, Wang F Y, Xiong S D, et al. Novel Magnetometer Based on Magnetic Fluid Coated Whispering Gallery Mode Resonator. In: *Proceedings of the 2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks*. Huangshan, China, 2019. 1-3
- 30 Eyal Y, Yekutieli M, Yosef L. Magnetic sensor based on a Whispering Gallery Mode double-tailed silica microsphere. *Opt Laser Technol*, 2022, 151: 108019
- 31 Huang H M, Yu Y, Zhou L J, et al. Whispering gallery modes in a microsphere attached to a side-polished fiber and their application for Magnetic field sensing. *Optics Commun*, 2021, 478: 126366
- 32 Freeman E, Wang C Y, Sumaria V, et al. Chip-scale high Q-factor glassblown microspherical shells for magnetic sensing. *AIP Adv*, 2018, 8: 065214
- 33 Zhu S, Shi L, Liu N Y, Magnetic field sensing using magnetic-fluid-filled optofluidic ring resonator. *Microfluid Nanofluid*, 2017, 21: 156
- 34 Guo Y, Zhang Y D, Su H Y, et al. Magnetic-field tuning whispering gallery mode based on hollow microbubble resonator with Terfenol-D-fixed. *Appl Opt*, 2019, 58(32): 8889-8893

Research on magnetic field sensing based on whispering gallery modes microbubble resonator

ZHAO XingYun^{1,2}, SONG JiEn³, DUAN Bing^{1,2}, WU YanRan^{1,2}, MA ChunHui^{1,2}, LI BeiBei⁴,
YANG DaQuan^{1,2*}, HUANG ShanGuo^{1,5}

¹State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

²School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

³Jiangsu Shenyuan Marine Information Technology and Equipment Innovation Center Co., Ltd, Suzhou 215000, China;

⁴Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

⁵School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

In this paper, we design a magnetic field sensing scheme based on whispering gallery mode (WGM) microbubble resonator infiltrated with magnetic fluid (MF) and experimentally verify this scheme. MF can be injected directly into the natural microfluidic channel of the microbubble to interact with the evanescent field effectively. We analyze the optical field distribution of WGMs before and after filling with MF and the influence of the wall thickness of the microbubble on the magnetic sensing sensitivity by COMSOL simulation. The microbubble cavities with thin wall thicknesses ranging from 2 μm to 3 μm are fabricated using CO₂ laser heating method. The magnetic field sensing performance of the microbubble resonator filled with MF is researched experimentally. With the growth of the applied magnetic field intensity, the refractive index of MF increases, which contributes to the redshift of the resonant wavelength. In the magnetic field range from 6 to 22 mT, the magnetic field intensity sensitivity is 2.15 pm/mT and the detection limit is 0.03mT. When the magnetic field intensity exceeds 22 mT, the refractive index of MF reaches a saturation value, thus the resonance wavelength no longer shifts as the magnetic field intensity increases. Furthermore, the stability of this sensing system is verified experimentally by monitoring the variation of resonant wavelength in 290 seconds with the constant magnetic field intensity of 6mT. This work proposes a novel magnetic sensing scheme based on WGM microbubble and demonstrated the feasibility of this scheme. Compared with existing optical fiber magnetic sensors, our proposed sensor reduces the preparation cost and simplifies the fabrication process by taking full advantage of the natural microfluidic channel of the microbubble. Besides, it has other advantages of small volume, high reliability and low detection limit, which has great value of application in the field of weak magnetic sensing.

whispering gallery mode, microbubble, magnetic fluid, magnetic field sensing

PACS: 07.55.Ge, 42.60.Da, 42.79.Pw