先进光纤传感技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022073103

磁流体型光纤磁场传感研究进展：从标量到矢量

陈耀飞[1,2]，黄欢欢[1,2]，陈嘉尧[1,2]，罗云瀚[2,3]*，陈　哲[2,3]

（暨南大学 1. 理工学院 光电工程系；2. 光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室；
3. 广东省光纤传感与通信技术重点实验室，广州 510632）

摘　要： 磁流体具有优异的磁光特性，为光纤磁场传感器的实现提供了一种新途径，经过十多年发展，已经成为光纤磁传感领域的一个重要研究方向。目前，已有大量的基于不同结构和原理的磁流体型光纤磁场传感器被相继提出，且总体上经历了从标量到矢量磁场传感的发展，文章以该发展脉络为主线，对磁流体的磁光特性、传感器的实现方法进行梳理和总结，最后指出当前仍存在的一些问题并进行展望。

关键词： 光纤传感；磁场测量；磁流体

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0655－11

Research Progress of The Magnetic-Fluids-Based Optical Fiber Magnetic Field Sensing: From Scalar to Vector

CHEN Yaofei[1,2], HUANG Huanhuan[1,2], CHEN Jiayao[1,2], LUO Yunhan[2,3], CHEN Zhe[2,3]

(1. Dept. of Optoelectronic Engineering; 2. Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Educational Institutes; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Jinan University, Guangzhou 510632, CHN)

Abstract: Magnetic fluids (MF) feature various excellent magneto-optical properties, which provides a new way for the realization of optical fiber magnetic field sensors. After more than ten years of development, it has become an important research direction in the field of optical fiber magnetic sensing. A large number of MF based optical-fiber magnetic field sensors employing different structures and principles have been proposed so far, and in general they have experienced the development from scalar to vector magnetic field sensing. In this review, the magneto-optical properties of MF and realization methods of the MF-based magnetic sensors were sorted out and summarized. Finally, some problems that still exist at present were pointed out, and prospections were made about this field.

Key words: optical fiber sensing; magnetic field measurement; magnetic fluids

0　引言

磁场作为基本的物理量之一，对其进行准确的测量在军事、医疗、工业等领域具有重要意义，例如：对潜艇引起的地磁异常进行测量是对潜艇进行搜索、警戒和识别的有效途径之一[1]；对人体心脏磁场的检测可实现对某些疾病如冠心病的诊断[2]。传统的电学磁场传感器如霍尔磁强计、磁阻型磁强计和磁通门磁场传感器等，虽然已具备较为成熟的技术，但其使用有源金属线缆进行信号的传导，因此极易对被测磁场的分布情况产生干扰，同时电信号又易受到外界电磁噪音的影响。而光纤传感器则是以光波为信号载体、以光纤为信号的传输介质，具有不带电、抗电磁干扰、体积小、灵敏度高等特点，成为电学磁场传感器之外的有力补充，逐渐受到人们的青睐。

收稿日期：2022－07－31.
基金项目：国家自然科学基金项目(61805108,62175094)；广东省基础与应用基础研究项目(2020A1515011498).
* **通信作者：**罗云瀚　**E-mail：** yunhanluo@163.com

光纤本身对磁场的响应极其微弱，因而磁性材料是实现光纤磁场传感的必备条件。传统的磁性材料如磁致伸缩或磁光晶体材料等均为固体，需通过粘合[3]或空间耦合方式[4]来与光纤结合，存在非全光纤结构、校准困难等问题。随着纳米材料科学的发展，纳米磁流体（以下简称磁流体，MF）的出现[5]，因其优异的磁光特性且兼具液体的流动性，为新型光纤磁场传感器的研发注入了新的活力[6]。

本文以磁流体型光纤磁场传感器为主题，首先对磁流体的磁光特性进行介绍；然后按照传感器发展的两个重要阶段即从标量到矢量，分别对传感器的实现方法进行梳理和总结，阐明各类型传感器的特点；最后指出存在的问题并进行展望。

1 磁流体的磁光特性

磁流体是一种由纳米级（1～100 nm）的磁性颗粒借助于表面活性剂的作用而均匀分散于基液中的稳定的胶体溶液，如图 1(a)所示。它既有固态磁性物质的磁性，又具有液态物质的流动性，这种特殊的结构使其具备独特的磁光性质，主要包括磁致折射率（包括实部和虚部）变化效应、磁致双折射效应和法拉第旋光效应等[7]。其中在光纤磁场传感器中应用最多的是磁致折射率变化特性，接下来，结合磁流体的微观结构对该特性进行介绍。

1.1 磁流体的微观结构

磁流体的光学性质取决于其微观结构，因而研究磁场作用下的磁流体微观结构是理解磁流体磁光特性的基础。Chantrel 等[8]在二维尺度上首次利用 Monte-Carlo 方法模拟了磁流体中的磁性颗粒在外磁场下的聚集行为，预言了磁流体中磁性颗粒在外磁场作用下会形成有序结构。之后这种方法被广泛应用于磁流体微观结构的研究并取得了长足的进步，至今已能实现对三维且包含不同粒径的体系[9]、棒状磁粒体系等复杂情况的研究[10]。除此之外，基于分子动力学的模型由于其构型简单、能够模拟剪切流的作用等优点，同样在磁流体微结构的模拟方面得到广泛应用[11]。

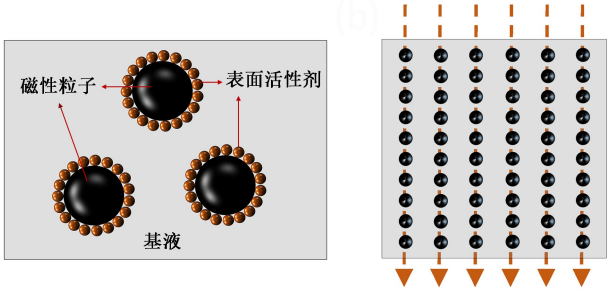
在磁场环境中，以分子动力学模型为例，磁流体中的磁性粒子在合外力和合转矩的作用下同时产生平动运动和转动运动，其满足的平动和转动运动方程均可由 Langevin 方程来描述[12]：

$$m_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}v_i}{\mathrm{d}t}+\xi_{\mathrm{t}}v_i=F_i \tag{1}$$

$$I\frac{\mathrm{d}\omega_i}{\mathrm{d}t}+\xi_{\mathrm{r}}\omega_i=T_i \tag{2}$$

式中，m_{p} 为粒子质量，v_i 为粒子的平动速度，ξ_{t} 为平动阻力系数，I 是粒子的转动惯量，ω_i 是粒子的转动角速度，ξ_{r} 是转动阻力系数，F_i 和 T_i 分别为粒子所受到的合力矩和合转矩。合力矩主要包括粒子间的磁偶作用力、粒子间的范德华吸引力、粒子间的排斥力以及因基液分子碰撞而产生的布朗力；合力矩则主要考虑粒子间的转矩以及外加磁场对粒子的转矩作用。在确定了 F_i 和 T_i 的具体形式后，便可通过以上两式并采用周期性边界条件，最终模拟计算得到磁流体的微观结构随时间的变化情况。

Li 等[13]基于分子动力学模拟得到的在竖直方向磁场的作用下磁流体微观结构的演化过程：在初始阶段，磁粒仍然杂乱无章地分散在基液中，但已经出现了沿磁场方向上聚集成链的趋势，随着时间的推移，粒子聚集现象更加明显而且磁链长度也随之增长，如图 1(b)所示。研究结果还表明[14]，磁链的长短和比例与磁粒的浓度和外界磁场的大小有密切关系：磁粒的浓度越高，在相同磁场作用下单位体积内的链状结构也越多，而且这些链状结构会相互吸引形成链状簇团；当外加磁场强度增大时，体系内链状结构增多，且链状结构变得更长、更直。



(a) 基本构造图 (b) 微观分布示意图

图 1 磁流体的基本构造及其在磁场作用下的微观分布示意图

1.2 磁致折射率变化效应

无磁场作用时，磁流体中的纳米磁粒在表面活性剂的辅助下均匀分散于基液中，没有沉淀或者明显的聚集发生。磁流体的复折射率 n^*_{MF} 可表示为

$$n^*_{\mathrm{MF}}=n_{\mathrm{MF}}+\mathrm{i}k_{\mathrm{MF}} \tag{3}$$

其中，n_{MF} 为复折射率的实部，即通常所说的折射率；k_{MF} 为复折射率的虚部，也称为消光系数（Extinction Coefficient），代表介质的损耗特性，其与磁流体的吸收系数 α_{MF}（Absorption Coefficient）

的关系为

$$\alpha_{\mathrm{MF}}=\frac{4\pi k_{\mathrm{MF}}}{\lambda} \tag{4}$$

当有磁场作用于磁流体时，根据 1.1 节中的描述，磁流体中的磁粒会聚集成链状结构，这种构型上的变化进而会影响到磁流体本身的折射率 n_{MF} 和吸收系数 α_{MF}[15-20]。Horng 等认为磁粒本身的磁能促使自身沿磁场的方向聚集排列，同时磁粒本身的热能（布朗运动）又阻止这种有规律的排列，因此磁流体的折射率 n_{MF} 同时受到外界磁场强度 H 和温度 T 的影响，且它们之间的关系可用 Langevin 函数来表达[15-16]：

$$n_{\mathrm{MF}}(H,T)=[n_{\mathrm{s}}-n_0]\left[\coth\left(\alpha\frac{H-H_{\mathrm{c},n}}{T}\right)\cdots-\frac{T}{\alpha(H-H_{\mathrm{c},n})}\right]+n_0 \tag{5}$$

其中，n_0 是无磁场时 MF 的折射率；$H_{\mathrm{c},n}$ 是临界磁场，只有当 $H>H_{\mathrm{c},n}$ 时外界 MF 的折射率才有变化，它的大小与温度、基液的类型和磁粒的浓度有关，且随着温度的增大而增大；n_{s} 代表磁流体在磁饱和状态下的折射率；α 为拟合系数。

图 2 展示了在不同温度环境下 MF 的折射率随外界磁场的变化情况，对于确定浓度和类型的磁流体，当温度一定且 $H>H_{\mathrm{c},n}$ 时，因磁粒在磁场的作用下发生聚集，折射率与 H 成正相关的非线性变化关系，并最终趋于饱和；当 H 一定时，折射率随 T 的增大而降低，从微观角度可理解为 T 的增大使磁粒本身的热能增大，从而降低了磁粒的聚集程度。此外，东北大学赵勇课题组通过简化实验方法，将光纤端面直接浸入磁流体中，用菲涅尔反射的方法进一步研究了磁场对磁流体折射率的影响[17]，结果表明磁场的施加方向不同会导致不同的折射率变化趋势，当磁场方向与光传输方向平行时，n_{MF} 随 H 的增大而增大，反之，n_{MF} 随 H 的增大而减小。

在磁场对磁流体吸收系数的影响方面，Fang 等[18]利用分子动力学和 T 矩阵法从理论上系统地进行了研究，结果表明吸收系数的变化趋势与磁场的施加方向密切相关：当光传输方向与磁场方向平行时，吸收系数随 H 的增大而减小；当两者垂直时，需要进一步考虑光的偏振方向与磁场方向的关系，当偏振方向与磁场方向垂直时，吸收系数随 H 的增大而减小，反之，则随 H 的增大而增大。以上结论在实验上也得到了验证[19-20]。

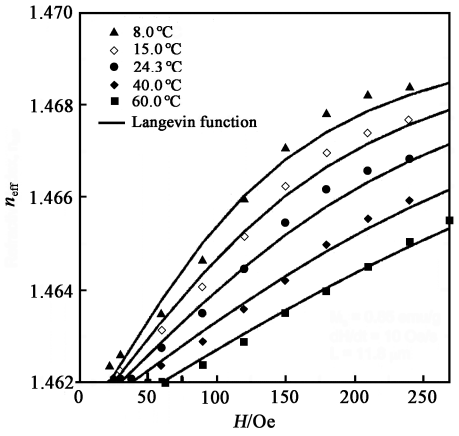


图 2　在不同温度环境下 MF 的折射率随外界磁场的变化[16]

2　标量磁场传感

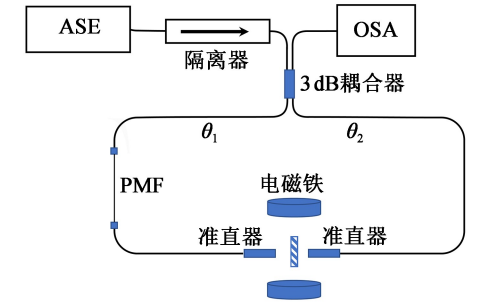
磁场包含强度和方向信息，前期工作主要集中于标量磁场传感的研究，确切地说，所提出的传感器本身对磁场方向不敏感，或即使敏感但只关注特定方向上的磁场响应，其中以第二种情况较为普遍。迄今已有诸多标量磁场传感器被提出，按照光与磁流体相互作用方式不同，主要可分为直接穿透式和倏逝场作用式两类。

2.1　直接穿透式

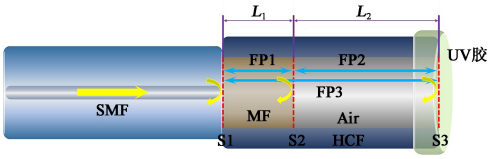
该类传感器中，光束直接穿过磁流体，利用磁流体的磁致折射率变化或双折射效应，磁场的改变导致光通过磁流体后的相位延迟的改变，从而实现对磁场的传感。Zu 等[21-22]将磁流体薄膜插入一个由偏振保持光纤构成的 Sagnac 干涉仪中，如图 3(a)，由于磁流体的磁致双折射效应，外界磁场的变化会引起干涉光谱的变化，通过监测干涉谱中的下陷峰的中心波长的位置实现了对外界磁场的测量，实验上得到了最高为 592.8 pm/Oe 的磁场灵敏度。该结构传感器的优点是能得到极其锐利的下陷峰，但是由于光束直接穿过磁流体薄膜而磁流体的透光性较差，因而存在着插入损耗高的缺点。例如在磁流体薄膜的厚度不大于 60 μm 时系统的损耗已经超过 40 dB[21]。另一个缺点是透射式的光路方式需要对光束进行空间耦合，这对于光路的精密程度以及系统的稳定性都提出了很高的要求，因而降低了传感器的实用性。

将磁流体集成在全光纤结构中可有效改善上述不足，其中以法布里-珀罗（FP）腔结构最为常见[23-26]。Hu 等[23]首次采用该结构，在普通外腔光

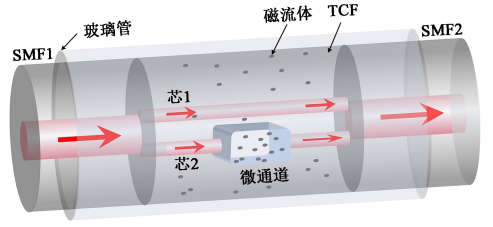
纤 FP 干涉仪的两光纤端面间充入磁流体，电流通过螺线管时产生的磁场会导致干涉信号的变化，实现对电流（磁场）的传感。随后研究人员在 FP 腔优化和灵敏度提升方面取得了成果。Zhang 等[24]利用激光直接技术在单模光纤端面制备微型 FP 干涉仪，长度仅为 100 μm，极大提升磁探测空间分辨率。Wang 等[25]基于空芯光纤制成双 FP 腔，如图 3(b)，利用游标效应将灵敏度提升至 4 219 pm/Oe 的极高水平。除 FP 结构外，深圳大学王义平课题组[7]提出一种由双芯光纤构成的马赫-增德尔（M-Z）干涉仪，利用飞秒激光对其中一芯开孔后将磁流体注入，如图 3(c)所示，传感臂光程在磁场作用下发生显著变化，也获得了 2 080 pm/Oe 的较高灵敏度。



（a） Sagnac 干涉仪结构



（b） 双 FP 腔结构



（c） 开孔双芯光纤 MZI 结构

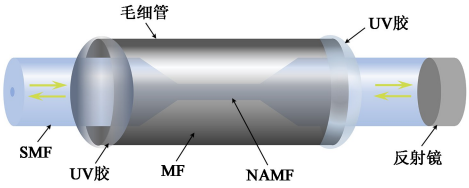
图 3 典型的几种直接穿透式传感器结构示意图[7,21,25]

2.2 倏逝场作用式

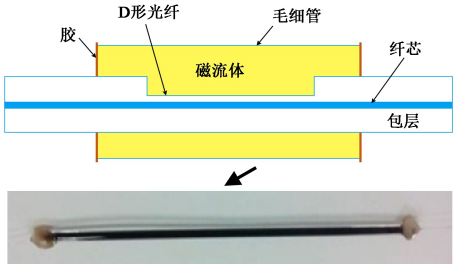
光在光纤里面传输是依靠从光密介质传播至光疏介质时所发生的全反射效应，与此同时会在光疏介质约一个波长的深度内存在着倏逝场。但是在通常情况下，这些倏逝场被限制在光纤的内部并不与外界的介质接触而产生影响。因此围绕着如何使倏逝场与磁流体发生作用，研究者们提出了多种方案，主要包括减小光纤直径、内孔填充、采用模式干涉仪、表面等离子体共振（SPR）等四种方法。

2.2.1 减小直径法

该方法是指通过化学腐蚀[27]、抛磨[28]或拉锥[29-33]等手段来减小光纤的直径，使倏逝场延伸至披覆于外部的磁流体中。Dai 等[27]用氢氟酸溶液将 FBG 的直径腐蚀至 10 μm 后在其外部披覆磁流体，直径的减小使栅区包层中的倏逝场进入磁流体中而受其影响，但是磁场灵敏度仅约为 0.344 pm/Oe。为了进一步增大倏逝场的作用，Layeghi 等[30]通过拉锥的方式将单模光纤的直径减小至 5 μm 形成非绝热的锥形光纤结构，将灵敏度提升至 71.7 pm/Oe。Luo 等[31]使用同样的方法，如图 4(a)所示，将光纤直径减少至 3.8 μm，采用反射型结构将灵敏度进一步提升至 174.4 pm/Oe。Ma 等[32]在用氢氧焰熔融拉锥过程中同时对光纤施加一个侧向应力，形成轴向非对称结构，该结构既保持了强耦合，又大大增加了锥区的长度，使得灵敏度达到 309.3 pm/Oe。Gao 等[33]则详细研究了非绝热锥形光纤的结构参数对灵敏度的影响，并得到相关结论，在最优条件下获得 656.7 pm/Oe 的灵敏度。Zhang 等[34]将蜘蛛丝缠绕在锥区表面，倏逝场与磁流体相互作用得到增强，灵敏度提升至 1 126.3 pm/Oe。然而以上锥形光纤的直径均在 10 μm 以下，过细的光纤直径也带来了不易操作、光纤易折断等问题。



（a） 拉锥[31]



（b） 侧抛成 D 型[35]

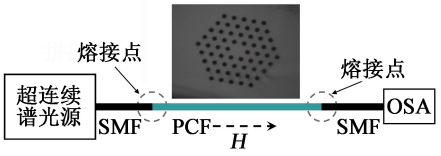
图 4 两种典型的光纤直径减小方法，以及与磁流体集成后的传感器示意图

除上述通过拉锥来实现倏逝场作用外，将光纤侧抛来暴露纤芯也是一种常用方法。Lei 等[35]将磁流体包裹的 D 型光纤，如图 4(b)，置于 Sagnac 环

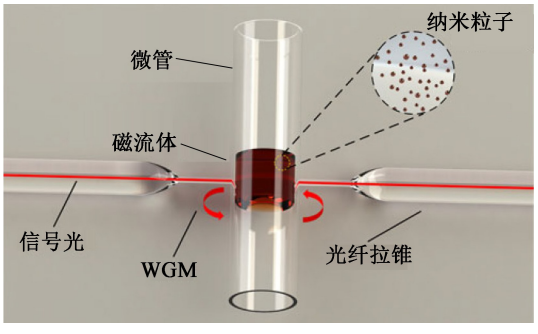
中，但因纤芯暴露少，灵敏度受到限制。Ou 等[36]则将多个 D 型光纤探头置于光纤环形腔中，基于频移光纤腔衰荡技术，将传统的单点磁场测量推广到准分布式测量，理论上可在 15.8 km 长度上布设 30 个传感单元。

2.2.2　内孔填充法

利用近年来兴起的微结构光纤所特有的空气孔，将磁流体填入其中可实现倏逝场与磁流体的作用[37-45]。Thakur 等[37]采用此方案将磁流体充入偏振保持的光子晶体光纤中，基于波长解调法得到了最大为 24.2 pm/Oe 的灵敏度。Zu 等[38]将光纤改变为实芯折射率引导型光子晶体光纤，如图 5(a)所示，将灵敏度提升为 1 500 pm/Oe。Gao 等[39]同样将磁流体充入折射率引导型光子晶体光纤中，采用强度解调方式得到了 0.011 μW/Oe 的灵敏度。Candiani 等[40]在磁流体填充的聚合物光子晶体光纤中发现了偏振相关损耗的现象，这为磁场的强度和方向同时测量提供了思路。除此之外，还有选择性填充高双折射光纤[42-43]、侧孔注入[44]、光横向耦合[45]等方案被提出。此类传感器的特点是：倏逝场与磁流体的作用强烈，因而灵敏度较高；但是由于磁流体强烈的光吸收作用，此类器件的插损较大(30 dB 以上)；另外，制作中需要将磁流体充入直径为微米级别的空气孔中，制作难度较大。为降低磁流体的填充难度，可采用空气孔直径更大的微管[46]，如图 5(b)所示，但该方案需精密控制锥形光纤和微管的距离来激发出回音壁模式，且集成性尚需进一步提高。



(a)　磁流体填充入光子晶体光纤中



(b)　磁流体填充入微管中

图 5　基于内孔填充法的传感器示意图[38,46]

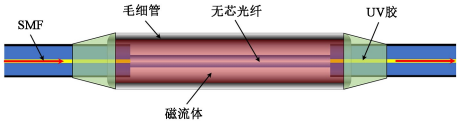
2.2.3　模式干涉法

利用大多数模式干涉型光纤传感器对外部介质的折射率敏感的特性，将磁流体披覆于传感器的表面来作为外部介质，从而实现对磁场的传感。基于此方法的传感器具有插入损耗低、全光纤结构、易制备、机械强度高等优点，成为研究最多的方法。已报道的此类传感器主要集中于多模(纤芯模)干涉型[47-52]和纤芯-包层模干涉型[53-71]两类，其中以第二种类型最为常见。

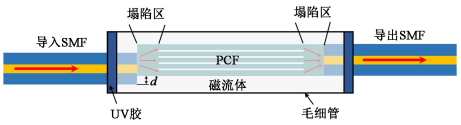
Chen 等[47]基于多模干涉原理将一段无芯光纤的两端熔接单模光纤，构成单模-无芯-单模的“三明治”光纤结构，外部披覆磁流体后，如图 6(a)所示，获得 90.5 pm/Oe 和 0.07 dB/Oe 的磁场灵敏度。将无芯光纤用阶跃型多模光纤替代，然后对其进行腐蚀[48]、拉锥[49,51]或侧抛[52]处理，使倏逝场与外部磁流体接触，也可实现对磁场的传感。此外，将磁流体披覆的多模干涉结构内嵌在光纤环腔中，利用光纤环形衰荡技术，可将传统的强度解调转换为弛豫时间解调，从而避免光源不稳定所带来的影响[50]。

相比多模干涉，基于纤芯-包层模干涉光纤结构的磁场传感器有更加多样的实现方法。Zu 等[53]将一段光子晶体光纤熔接入两根单模光纤中并将磁流体披覆于外面，利用熔接形成的塌陷区来激发出光子晶体光纤的包层模，通过其倏逝场与外面的磁流体作用而进行磁场传感，但因作用有限，得到的磁场灵敏度仅为 2.36 pm/Oe。Chen 等[69]在单模与光子晶体光纤熔接时引入横向偏移来增强倏逝场，进而提升灵敏度。此外，Zhao 等[54]通过对光子晶体光纤进行拉锥来减小其直径，进而将灵敏度提升至 16.04 pm/Oe。Dong 等[55]通过特殊的熔接技术在一段单模光纤中引入错位和锥形熔点从而实现包层模的激发和耦合，实验上分别以波长和强度解调方式得到了 26 pm/Oe 和 −0.024 dB/Oe 的磁场灵敏度。Liu 等[70]仅用一根单模光纤，通过机械弯曲的方法来激发出包层模，经弯曲半径优化后获得 374 pm/Oe 和 −0.482 1 dB/Oe 的灵敏度。Miao 等[64]提出一种基于多维度全固态波导阵列光纤的模式干涉仪，通过电弧放电法对一段全固态光子晶体光纤沿轴向进行周期性的直径调制而形成，披覆磁流体后实现温度不敏感的磁场传感。已报道的基于磁流体和纤芯-包层模干涉仪的磁场传感器的具体结构还有：锥形-错位熔点结构[56]、双直径增大型熔点结构[57-58]、基于细芯光纤的结构[59-60]、S 形熔点

结构[61]、S形的锥状结构[62-63]、多模-拉锥单模-多模光纤结构[67-68]等。此类传感器的特点是倏逝场与外界磁流体的作用适中，因而灵敏度适中且插损较小，器件的结构和制作都较为简单。



(a) 单模-无芯-单模光纤结构



(b) 错位熔接型单模-光子晶体光纤-单模光纤结构

图 6 模式干涉型磁流体光纤传感器示意图[47,69]

2.2.4 表面等离子体共振法

倏逝场作用式传感器灵敏度取决于倏逝场与磁流体的作用程度，在特殊设计的光纤结构表面镀制金属膜层来激发出SPR，可获得增强的倏逝场。早期研究主要采用模拟手段证明SPR结构结合磁流体后用于磁场传感的可行性[74-75]。Schwendtner等[72,76]则在实验上进行了证明，他们对一段拉锥光纤的双面镀制金属膜层来激发SPR，并将磁流体披覆在外部，如图7所示，实验测得灵敏度可到1 000 pm/Oe。此外，随着微纳加工技术的发展，在光纤端面制备出各种纳米光子结构的“Lab on A Fiber”已经实现，Liu等[73]则利用该方法在多模光纤端面制备出金属孔洞阵列，产生局域表面等离子体共振(LSPR)，在外部披覆磁流体后实现磁场传感，但因LSPR的倏逝场深度小，灵敏度仅为53.2 pm/Oe。

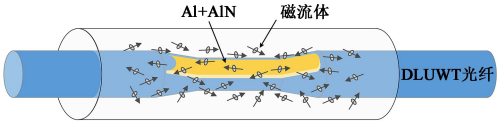


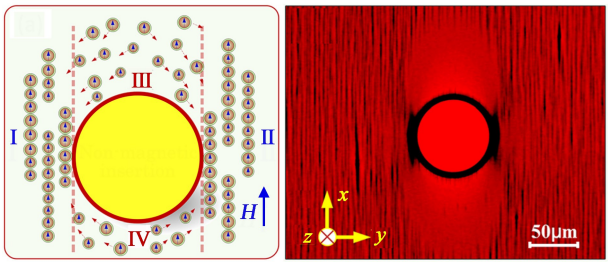
图 7 基于SPR和磁流体的光纤磁场传感器[72-73]

3 矢量磁场传感

3.1 磁流体在光纤周围的各向异性分布

回顾可发现，前期报道的大多数传感器仅关注对磁场强度的测量，属于标量磁场传感的范畴，究其原因是将光纤周围的磁流体近似为均匀介质而忽略了磁粒的非均匀聚集现象。

2016年，研究人员发现，在磁场作用下磁流体中的磁粒会在光纤周围产生非均匀的聚集现象[77-78]。具体表现如图8所示，在面向和背向磁场方向的光纤两侧区域即图中的Ⅲ和Ⅳ区，磁粒的聚集程度低；反之，磁粒则大量聚集在平行于磁场方向的光纤两侧区域(Ⅰ和Ⅱ区)。由于磁流体的折射率与磁粒的聚集程度成正相关关系，因而磁粒的非均匀聚集分布必然造成光纤周围的折射率分布的非均匀性，且随着磁场的强度和方向而变化。这为发展矢量磁场光纤传感器提供了契机，成为近年来该领域的研究热点。



(a) 示意图 (b) 显微镜图

图 8 磁场作用下的磁流体在光纤周围的各向异性分布示意图和显微镜图[78]

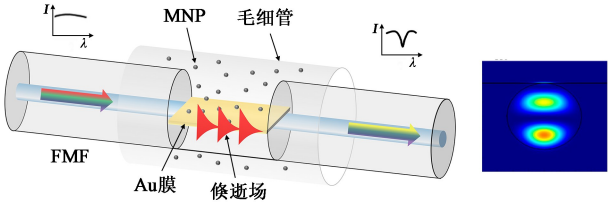
3.2 矢量磁场传感的实现

为实现矢量磁场传感，除利用上述磁流体在光纤周围的各向异性分布特性外，还要采取措施在光纤中产生非圆对称的光场分布。至今研究人员已经提出多种方案，总体上可概括为减材方式[79-86]、增材方式[87-89]、改善光激发条件[78,90-94]、在光纤中产生非对称折射率调制[95-101]等四种方法。其中前两种指的是对光纤进行削减或增加，通过光纤本身横截面的改变，破坏其形状上的圆对称性，来产生非圆对称的光场分布。后两种则不会破坏光纤横截面形状。

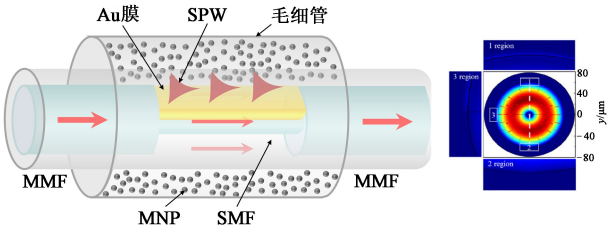
对光纤进行侧边抛磨来产生非圆对称光场分布，是减材方式中最常采用的一种。磁场方向改变导致侧抛面附近折射率改变，进而产生磁场方向相关的光信号变化。对于侧抛光纤矢量磁场传感器，磁场方向的解调不仅可以通过直接检测输出光强度来实现[79,86]，也可以在侧抛表面镀制金膜后激发出SPR，如图9(a)所示[81-82,85]，或者将侧抛光纤制备成模式干涉仪[80,83]，通过对共振波长的追踪来实现。除侧边抛磨外，Lin等[84]还采用HF腐蚀法来制备开孔的C形光纤，该光纤本身的非对称形状为矢量磁场传感提供了条件，并由实验得到证实。

Lin等[89]则采用增材方式在多模-单模-多模光纤结构的单侧镀制金膜，因而仅在光纤的半边产生SPR，如图9(b)所示。利用该方法及其所产生的非圆对称光场分布和增强的倏逝场，实现了对矢量磁

场的高灵敏度传感，磁场强度和方向灵敏度分别为 1 008 pm/Oe 和 988 pm/°。此外，研究人员还提出将单模光纤和毛细管并行放置后进行熔融拉锥，结果相当于在拉锥单模光纤侧边增加一个微流通道，微流道内磁流体在磁场作用下同样表现出类似的各向异性分布，因而传感器也表现出矢量磁场感知特性[87-88]。



（a）　减材方式-侧抛光纤结构[85]

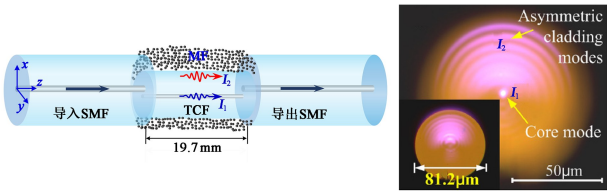


（b）　增材方式-光纤表面半镀膜[89]

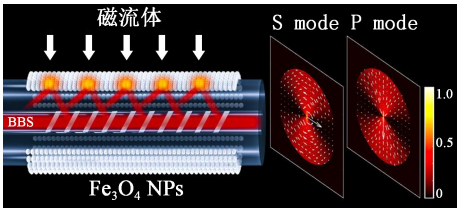
图 9　通过改变光纤剖面形状来实现矢量磁场传感的典型方案

通过偏芯熔接或弯曲光纤等手段来改善光激发条件，也被证实为简单有效的非圆对称光场分布的产生方法。Yin 等[78,94]采用偏芯熔接的方法，如图 10(a)所示，在细心光纤和光子晶体光纤中均得到了应用，并结合磁流体后实现对矢量磁场传感，实验得到 22.2 pm/Oe 的磁场强度测量灵敏度和±1.9°的方向测量误差。Li 等[91]将单模光纤弯曲成 U 形结构，光纤的弯曲使原本在纤芯的基模耦合进包层中，同时形成非对称的模场分布，获得对磁矢量的传感。Zhu 等采用同样的方案，进一步验证了 U 形弯曲单模光纤在矢量磁场传感中的应用[90]，还将单模光纤弯曲为气球形结构[93]，将磁流体包裹在该结构周围后也具备矢量磁场传感能力。

第四种方法是在光纤拉制中或后期引入非对称的折射率分布，而光纤形状仍然保持其圆对称性。研究人员后期利用紫外曝光法在单模光纤纤芯刻制倾斜光栅[77,98,101]，如图 10(b)所示，利用光栅包层中光场分布的非中心对称分布特性，结合磁流体在光纤表面的非均匀聚集效应，同样也实现了高灵敏度的矢量磁场传感。Qiao 等利用飞秒激光直写技术在光纤包层的单侧写入 FBG 结构[96-97]，使原本在纤芯且对称分布的模式耦合入包层模中，因 FBG 结构仅存在于部分包层中，因而包层中光场也呈非圆对称分布，为矢量磁场传感提供了条件；此外，他们还用该技术在锥形双模光纤的傍轴位置引入非对称折射率调制[99]，从而造成光场的非圆对称分布，将磁流体披覆外部后也实现了矢量磁场测量。上述方案均需在后期用专业设备对光纤进行二次加工，而直接采用特种光纤来制备传感器可以降低成本。例如 Layeghi 等[95]直接采用高双折射光纤，将其进行拉锥并在外部披覆磁流体，然后置于 Sagnac 环中，因光纤具有非圆对称的折射率分布，该传感器表现出明显的磁场方向敏感性。



（a）　改善光激发条件-错位熔接[78]



（b）　产生非对称的折射率调制-倾斜光纤光栅[101]

图 10　另外两种实现矢量磁场传感的典型方案

4　总结和展望

综上所述，磁流体型光纤磁场传感器在近年来受到了研究人员的极大关注，总体上经历了从标量到矢量磁场传感的发展过程，基于不同光纤结构和原理的传感器被不断提出，在传感性能方面不断取得进步。然而，磁流体型光纤磁场传感器当前仍处于实验室研究阶段，在实用化前还需克服诸多问题，主要包括：传感器响应速度问题，磁流体的磁光特性来源于磁场作用下磁粒的定向排列，导致磁场变化后传感器输出光信号达到稳定需要一定时间，而稳定所需时间一般处于秒量级[89,102]，致使该类传感器难以测量时变磁场；稳定性问题，当前主要采用的毛细管封装方式无法保证密闭性，传感器长期放置会伴随磁流体基液的挥发，最终造成器件失效。这些问题的解决需要在材料、工艺、设计等方面的综合改进，一旦完成，必将打破应用壁垒，在军事、工业、医

学等领域发挥重要应用价值。

参考文献：

[1] 张朝阳，刘济民，杨 林. 磁探潜关键技术现状及发展趋势[J]. 科学技术与工程，2022，22(1)：18-27.
Zhang Chaoyang, Liu Jimin, Yang Lin. Situation and development trend of the key technology of magnetic submarine exploration[J]. Science Tchnology and Engineering, 2022, 22(1): 18-27.

[2] 刘 星，吴 浩. 心磁图在心脏病诊断检查技术中的研究进展[J]. 心电与循环，2019，38(5)：438-441.
Liu Xing, Wu Hao. Research progress of cardiac magnetography in diagnostic examination techniques for heart disease[J]. J. of Electrocardiology and Circulation, 2019, 38(5): 438-441.

[3] Nascimento I M, Baptista J M, Jorge P A S, et al. Intensity-modulated optical fiber sensor for AC magnetic field detection [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2015, 27(23): 2461-2464.

[4] Liu T, Han J, Hu H. Optical current sensor with dual-wavelength configuration for improving temperature robustness[J]. IEEE Photonics J., 2017, 9(1): 6800210.

[5] Clark N A. Soft-matter physics: ferromagnetic ferrofluids[J]. Nature, 2013, 504(7479): 229.

[6] Torres-Díaz I, Rinaldi C. Recent progress in ferrofluids research: novel applications of magnetically controllable and tunable fluids[J]. Soft Matter, 2014, 10(43): 8584.

[7] Li Z, Liao C, 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.

[8] Chantrell R, Bradbury A, Popplewell J, et al. Particle cluster configuration in magnetic fluids[J]. J. of Phys. D: Appl. Phys., 1980, 13(7): L119.

[9] Kruse T, Spanoudaki A, Pelster R. Monte Carlo simulations of polydisperse ferrofluids: Cluster formation and field-dependent microstructure[J]. Physical Rev. B, 2003, 68(5): 054208.

[10] Aoshima M, Satoh A. Two-dimensional Monte Carlo simulations of a colloidal dispersion composed of rod-like ferromagnetic particles in an applied magnetic field[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2007, 16(1): 015004.

[11] Satoh A, Coverdale G N, Chantrell R W. Stokesian dynamics simulations of ferromagnetic colloidal dispersions subjected to a sinusoidal shear flow[J]. J. of Colloid and Interface Science, 2000, 231(2): 238-246.

[12] Satoh A, Chantrell R W, Coverdale G N. Brownian dynamics simulations of ferromagnetic colloidal dispersions in a simple shear flow[J]. J. of Colloid and Interface Science, 1999, 209(1): 44-59.

[13] Li Q, Xuan Y, Li B. Simulation and control scheme of microstructure in magnetic fluids[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2007, 50(3): 371-379.

[14] 方晓鹏. 纳米流体热质传递机理及光学特性研究[D]. 南京：南京理工大学，2013.
Fang Xiaopeng. Research on heat and mass transfer mechanisms and optical character of nanofluids[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.

[15] Yang S, Chieh J, Horng H, et al. Origin and applications of magnetically tunable refractive index of magnetic fluid films [J]. Appl. Phys. Lett., 2004, 84(25): 5204-5206.

[16] Chen Y, Yang S, Tse W, et al. Thermal effect on the field-dependent refractive index of the magnetic fluid film[J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 82(20): 3481-3483.

[17] Zhao Y, Wu D, Lv R, 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): 1-5.

[18] Fang X, Xuan Y, Li Q. Theoretical investigation of the extinction coefficient of magnetic fluid[J]. J. of Nanoparticle Research, 2013, 15(5): 1-12.

[19] Inaba N, Miyajima H, Takahashi H, et al. Magneto-optical absorption in infrared region for magnetic fluid thin film[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1989, 25(5): 3866-3868.

[20] Martin J E, Hill K M, Tigges C P. Magnetic-field-induced optical transmittance in colloidal suspensions[J]. Phys. Rev. E, 1999, 59(5): 5676.

[21] Zu P, Chan C C, Lew W S, et al. Magneto-optical fiber sensor based on magnetic fluid[J]. Opt. Lett., 2012, 37(3): 398-400.

[22] Zu P, Chan C C, Koh G W, et al. Enhancement of the sensitivity of magneto-optical fiber sensor by magnifying the birefringence of magnetic fluid film with Loyt-Sagnac interferometer[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 191: 19-23.

[23] Hu T, Zhao Y, Li X, et al. Novel optical fiber current sensor based on magnetic fluid[J]. Chinese Opt. Lett., 2010, 8(4): 392-394.

[24] Zhang D, Wei H, Hu H, et al. Highly sensitive magnetic field microsensor based on direct laser writing of fiber-tip optofluidic Fabry-Pérot cavity[J]. APL Photon., 2020, 5(7): 076112.

[25] Wang X, Zhao Y, Lv R, et al. Magnetic field measurement method based on the magneto-volume effect of hollow core fiber filled with magnetic fluid[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9513708. 1-9513708. 8.

[26] Sun B, Bai M, Ma X, et al. Magnetic-based polydimethylsiloxane cap for simultaneous measurement of magnetic field and temperature[J]. J. of Lightwave Technol., 2022, 40(8): 2625-2630.

[27] Dai J, Yang M, Li X, et al. Magnetic field sensor based on magnetic fluid clad etched fiber Bragg grating[J]. Optical Fiber Technol., 2011, 17(3): 210-213.

[28] Gao L, Zhu T, Deng M, et al. Long-period fiber grating D-shaped fiber using magnetic fluid for magnetic-field detection [J]. IEEE Photon. J., 2012, 4: 2094-2105.

[29] Pu S, Chen X, Chen Y, et al. Fiber-optic evanescent field modulator using a magnetic fluid as the cladding[J]. J. of Appl. Phys., 2006, 99(9): 093516.

[30] Layeghi A, Latifi H, Frazao O. Magnetic field sensor based on nonadiabatic tapered optical fiber with magnetic fluid[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2014, 26(19): 1904-1907.

[31] Luo L, Pu S, Tang J, et al. Reflective all-fiber magnetic field sensor based on microfiber and magnetic fluid[J]. Opt. Express, 2015, 23(14): 18133-18142.

[32] Ma Z, Miao Y, Li Y, et al. A highly sensitive magnetic field sensor based on a tapered microfiber[J]. IEEE Photon. J., 2018, 10(4): 1-8.

[33] Gao T Y, Ma G M, Wang Y K, et al. Effect of structure on sensitivity of magnetic field sensor based on non-adiabatic tapered optical fiber with magnetic fluid[J]. IEEE Sensors J., 2022, 22(5): 4022-4027.

[34] Zhang Y, Ning Y, Zhang M, et al. Spider silk-based fiber magnetic field sensor[J]. J. of Lightwave Technol., 2021, 39(20): 6631-6636.

[35] Lei X, Chen J, Shi F, et al. Magnetic field fiber sensor based on the magneto-birefringence effect of magnetic fluid [J]. Opt. Communications, 2016, 374: 76-79.

[36] Ou Y, Chen J, Chen W, et al. A quasi-distributed fiber magnetic field sensor based on frequency-shifted interferometry fiber cavity ringdown technique[J]. Optics & Laser Technol., 2022, 146: 107607.

[37] Thakur H V, Nalawade S M, Gupta S, et al. Photonic crystal fiber injected with Fe_3O_4 nanofluid for magnetic field detection[J]. Appl. Phys. Lett., 2011, 99: 161101.

[38] Zu P, Chan C C, Gong T, et al. Magneto-optical fiber sensor based on bandgap effect of photonic crystal fiber infiltrated with magnetic fluid[J]. Appl. Phys. Lett., 2012, 101(24): 241118.

[39] Gao R, Jiang Y, Abdelaziz S. All-fiber magnetic field sensors based on magnetic fluid-filled photonic crystal fibers [J]. Opt. Lett., 2013, 38(9): 1539-1541.

[40] Candiani A, Argyros A, Leon-Saval S, et al. A loss-based, magnetic field sensor implemented in a ferrofluid infiltrated microstructured polymer optical fiber [J]. Appl. Phys. Lett., 2014, 104(11): 111106.

[41] Liu Q, Li S, Wang X. Sensing characteristics of a MF-filled photonic crystal fiber Sagnac interferometer for magnetic field detecting[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 242: 949-955.

[42] Wang W, Miao Y, Li Z, et al. Tunability of Hi-Bi photonic crystal fiber integrated with selectively filled magnetic fluid and microfluidic manipulation[J]. Appl. Opt., 2019, 58 (4): 979-983.

[43] Liang H, Liu Y, Li H, et al. Magnetic-ionic-liquid-functionalized photonic crystal fiber for magnetic field detection[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2018, 30(4): 359-362.

[44] Ding X Z, Yang H Z, Qiao X G, et al. Mach-Zehnder interferometric magnetic field sensor based on a photonic crystal fiber and magnetic fluid[J]. Appl. Opt., 2018, 57 (9): 2050-2056.

[45] Zhang C, Pu S, Hao Z, et al. Magnetic field sensing based on whispering gallery mode with nanostructured magnetic fluid-infiltrated photonic crystal fiber [J]. Nanomaterials, 2022, 12(5): 862.

[46] Yu Z, Jiang J, Zhang X, et al. Fiber optic magnetic field sensor based on magnetic nanoparticle assembly in microcapillary ring resonator[J]. IEEE Photon. J., 2017, PP(99): 1-1.

[47] Chen Y, Han Q, Liu T, et al. Optical fiber magnetic field sensor based on single-mode-multimode-single-mode structure and magnetic fluid[J]. Opt. Lett., 2013, 38(20): 3999-4001.

[48] Wang H, Pu S, Wang N, et al. Magnetic field sensing based on singlemode-multimode-singlemode fiber structures using magnetic fluids as cladding[J]. Opt. Lett., 2013, 38(19): 3765-3768.

[49] Yue C, Ding H, Liu X. Magnetic-field measurement based on multicore fiber taper and magnetic fluid[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2018, 99: 1-12.

[50] Chen Y, Han Q, Yan W, et al. Magnetic field sensing based on a ferrofluid-coated multimode interferometer in a fiber-loop ring-down cavity[J]. IEEE Sensors J., 2018, 18(8): 3206-3210.

[51] Sun B, Fang F, Zhang Z, et al. High-sensitivity and low-temperature magnetic field sensor based on tapered two-mode fiber interference[J]. Opt. Lett., 2018, 43(6): 1311-1314.

[52] Chen Y, Hu Y, Cheng H, et al. Side-polished single-mode-multimode-single-mode fiber structure for the vector magnetic field sensing[J]. J. of Lightwave Technol., 2020, 38(20): 5837-5843.

[53] Zu P, Chan C C, Lew W S, et al. Temperature-insensitive magnetic field sensor based on nanoparticle magnetic fluid and photonic crystal fiber[J]. IEEE Photon. J., 2012, 4(2): 491-498.

[54] Zhao Y, Wu D, Lv R Q. Magnetic field sensor based on photonic crystal fiber taper coated with ferrofluid[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2015, 27(1): 26-29.

[55] Dong S, Pu S, Wang H. Magnetic field sensing based on magnetic-fluid-clad fiber-optic structure with taper-like and lateral-offset fusion splicing[J]. Opt. Express, 2014, 22

(16): 19108-19116.

[56] Wu J, Miao Y, Lin W, et al. Dual-direction magnetic field sensor based on core-offset microfiber and ferrofluid[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2014, 26(15): 1581-1584.

[57] Pu S, Dong S. Magnetic field sensing based on magnetic-fluid-clad fiber-optic structure with up-tapered joints[J]. IEEE Photon. J., 2014, 6(4): 1-6.

[58] Zheng Y, Dong X, Yang R, et al. Magnetic field sensor with optical fiber bitaper-based interferometer coated by magnetic fluid[J]. IEEE Sensors J., 2014, 14(9): 3148-3151.

[59] Wu J, Miao Y, Song B, et al. Low temperature sensitive intensity-interrogated magnetic field sensor based on modal interference in thin-core fiber and magnetic fluid[J]. Appl. Phys. Lett., 2014, 104(25): 252402.

[60] Huang G, Zhou B, Chen Z, et al. Magnetic-field sensor utilizing the ferrofluid and thin-core fiber modal interferometer[J]. IEEE Sensors J., 2015, 15(1): 333-336.

[61] Peng B. An all-fiber magnetic field sensor based on dual-S-shaped optic fiber integrated with magnetic fluid[J]. IEEE Sensors J., 2016, 16(4): 958-964.

[62] Miao Y, Wu J, Lin W, et al. Magnetic field tunability of optical microfiber taper integrated with ferrofluid[J]. Opt. Express, 2013, 21(24): 29914-29920.

[63] Deng M, Liu D, Li D. Magnetic field sensor based on asymmetric optical fiber taper and magnetic fluid[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 211: 55-59.

[64] Miao Y, Ma X, He Y, et al. Multidimensional microstructured photonic device based on all-solid waveguide array fiber and magnetic fluid[J]. Nanophotonics, 2017, 6(1): 357-363.

[65] Wu W, Cao Y, Zhang H, et al. Compact magnetic field sensor based on a magnetic-fluid-integrated fiber interferometer[J]. IEEE Magnetics Lett., 2019, 10: 8103605.

[66] Taghizadeh M, Bozorgzadeh F, Ghorbani M. Designing magnetic field sensor based on tapered photonic crystal fibre assisted by a ferrofluid[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1-9.

[67] Chen H, Shao Z, Zhang X, et al. Highly sensitive magnetic field sensor using tapered Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 107: 78-82.

[68] Zhang S, Li X, Liu Y, et al. A MMF-TSMF-MMF structure coated magnetic fluid for magnetic field measurement[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2021, 33(19): 1105-1108.

[69] Chen Y, Han Q, Liu T, et al. Magnetic field sensor based on ferrofluid and photonic crystal fiber with offset fusion splicing[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2016, 28(19): 2043-2046.

[70] Liu T, Chen Y, Han Q, et al. Magnetic field sensor based on U-bent single-mode fiber and magnetic fluid[J]. IEEE Photon. J., 2014, 6(6): 1-7.

[71] Chen Y, Liu T, Han Q, et al. Fiber loop ring-down cavity integrated U-bent single-mode-fiber for magnetic field sensing [J]. Photon. Research, 2016, 4(6): 322-326.

[72] Rodríguez-Schwendtner E, Navarrete M, Díaz-Herrera N, et al. Advanced plasmonic fiber-optic sensor for high sensitivity measurement of magnetic field[J]. IEEE Sensors J., 2019, 19(17): 7355-7364.

[73] Liu Y, Liao Q, Wang Z, et al. Compact magnetic field sensor based on plasmonic fiber-tip[J]. Opt. Express, 2021, 29(23): 38904-38914.

[74] Weng S, Pei L, Wang J, et al. High sensitivity side-hole fiber magnetic field sensor based on surface plasmon resonance[J]. Chinese Opt. Lett., 2016, 14(11): 19-22.

[75] Ying Y, Zhao Y, Lv R Q, et al. Magnetic field measurement using surface plasmon resonance sensing technology combined with magnetic fluid photonic crystal[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(1): 170-176.

[76] Rodríguez-Schwendtner E, Díaz-Herrera N, Navarrete M, et al. Plasmonic sensor based on tapered optical fibers and magnetic fluids for measuring magnetic fields[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 264: 58-62.

[77] Zhang Z, Guo T, Zhang X, et al. Plasmonic fiber-optic vector magnetometer[J]. Appl. Phys. Lett., 2016, 108(10): 289.

[78] Yin J, Yan P, Chen H, et al. All-fiber-optic vector magnetometer based on anisotropic magnetism-manipulation of ferromagnetism nanoparticles[J]. Appl. Phys. Lett., 2017, 110(23): 231104.

[79] Violakis G, Korakas N, Pissadakis S. Differential loss magnetic field sensor using a ferrofluid encapsulated D-shaped optical fiber[J]. Opt. Lett., 2018, 43(1): 142-145.

[80] Li Y, Pu S, Zhao Y, et al. All-fiber-optic vector magnetic field sensor based on side-polished fiber and magnetic fluid [J]. Opt. Express, 2019, 27(24): 35182-35188.

[81] Hao Z, Li Y, Pu S, et al. Ultrahigh-performance vector magnetic field sensor with wedge-shaped fiber tip based on surface plasmon resonance and magnetic fluid [J]. Nanophotonics, 2022.

[82] Jiang Z, Dong J, Hu S, et al. High-sensitivity vector magnetic field sensor based on side-polished fiber plasmon and ferrofluid[J]. Opt. Lett., 2018, 43(19): 4743-4746.

[83] Xu R, Niu G, Xue Y, et al. An all-optical vector magnetic field sensor based on magnetic fluid and side-polished hollow-core optical fiber[J]. IEEE Sensors J., 2021, 21(19): 21410-21416.

[84] Lin Zt, Zhao Y, Zhao R, et al. High sensitivity and low loss vector magnetic field sensor based on the C-type optical fiber [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2021, 57(11): 4002308.1-4002308.8.

[85] Chen Y, Sun W, Zhang Y, et al. Magnetic nanoparticles functionalized few-mode-fiber-based plasmonic vector

magnetometer[J]. Nanomaterials, 2019, 9(5): 785.

[86] Chen Y, Hu Y, Zhang Y, et al. A portable smartphone-based vector-magnetometer illuminated and imaged via a side-polished-fiber functionalized with magnetic fluid[J]. IEEE Sensors J., 2019, 20(3): 1283-1289.

[87] Tian H, Song Y, Li Y, et al. Fiber-optic vector magnetic field sensor based on mode interference and magnetic fluid in a two-channel tapered structure[J]. IEEE Photon. J., 2019, 11(6): 1-9.

[88] Cui J, Qi D, Tian H, et al. Vector optical fiber magnetometer based on capillaries filled with magnetic fluid [J]. Appl. Opt., 2019, 58(10): 2754-2760.

[89] Lin Q, Hu Y, Yan F, et al. Half-side gold-coated hetero-core fiber for highly sensitive measurement of a vector magnetic field[J]. Opt. Lett., 2020, 45(17): 4746-4749.

[90] Zhu L, Lin Q, Yao K, et al. Intensity-demodulated fiber-optic vector magnetic field sensor based on fiber-optic evanescent field[J]. Opt. & Laser Technol., 2022, 152: 108087.

[91] Li Y, Pu S, Hao Z, et al. Vector magnetic field sensor based on U-bent single-mode fiber and magnetic fluid[J]. Opt. Express, 2021, 29(4): 5236-5246.

[92] Xiong Z, Guan C, Duan Z, et al. All-optical vector magnetic field sensor based on a side-polished two-core fiber Michelson interferometer[J]. Opt. Express, 2022, 30(13): 22746-22754.

[93] Zhu L, Lin Q, Yao K, et al. Fiber vector magnetometer based on balloon-like fiber structure and magnetic fluid[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-9.

[94] Yin J, Ruan S, Liu T, et al. All-fiber-optic vector magnetometer based on nano-magnetic fluids filled double-clad photonic crystal fiber[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 238: 518-524.

[95] Layeghi A, Latifi H. Magnetic field vector sensor by a nonadiabatic tapered Hi-Bi fiber and ferrofluid nanoparticles [J]. Opt. & Laser Technol., 2018, 102: 184-190.

[96] Bao W, Qiao X, Rong Q, et al. Fiber optic vector magnetometer based on magnetic fluid and fiber Bragg grating written on a multi-clad fiber[J]. IEEE Sensors J., 2018, 18(18): 7486-7491.

[97] Zhang J, Chen F, Wang R, et al. Vector magnetic field measurement based on magnetic fluid and high-order cladding-mode Bragg grating[J]. Opt. & Laser Technol., 2021, 143: 107264.

[98] Lu T, Sun Y, Moreno Y, et al. Excessively tilted fiber grating-based vector magnetometer[J]. Opt. Lett., 2019, 44(10): 2494-2497.

[99] Zhang J, Qiao X, Wang R, et al. Highly-sensitivity fiber-optic vector magnetometer based on two-mode fiber and magnetic fluid[J]. IEEE Sensors J., 2019, 19(7): 2576-2580.

[100] Jiang C, Liu Y, Mou C, et al. Fiber vector magnetometer based on polarization-maintaining fiber long-period grating with ferrofluid nanoparticles[J]. J. of Lightwave Technol., 2022, 40(8): 2494-2502.

[101] Zhang Z, Fu L, Ma Q, et al. Vector magnetometer based on localized scattering between optical fiber spectral combs and magnetic nanoparticles[J]. J. of Lightwave Technol., 2021, 39: 6599-6665.

[102] Chen Y, Han Q, Liu T. All-fiber optical modulator based on no-core fiber and magnetic fluid as cladding[J]. Chinese Phys. B, 2015, 24(1): 014214.

作者简介：

陈耀飞(1989—)，男，河南省洛阳市人，博士，副教授，主要研究方向为光纤磁场传感器及其应用；

罗云瀚(1979—)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向包括微纳光子学、表面等离子体共振传感、光纤传感、光电信息检测、生物医学光子学，以及近红外光谱应用等。