文章编号：1672-8785(2023)04-0042-07

一种基于高衰减光纤的光纤光栅热线式流量计

贾振安[1,2,3,4] 任 杰[1,2,3,4*] 白 燕[1,2,3,4] 樊 伟[1,2,3,4]

(1.西安石油大学理学院，陕西 西安 710065；
2.陕西省油气资源光纤探测工程技术研究中心，陕西 西安 710065；
3.陕西省油气井测控技术重点实验室，陕西 西安 710065；
4.CNPC 重点实验室——油藏光纤动态检测研究室，陕西 西安 710065)

摘 要：为了发展全光学流量测量技术，提出了一种基于掺钴高衰减光纤的光纤光栅热线式流量计。通过解调光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating，FBG)中心波长进行流量测量，具体包括传感器制作、温度传感特性测定和流量测量实验。结果表明，基于衰减系数为 8.9 dB/cm、工作波长约为 1480 nm 的掺钴光纤的 FBG 具有 10.3 pm/℃的温度灵敏度；流量计在 400～3700 L/h 液体流量范围内可高重复性地实现测量；流量-FBG 中心波长遵循特定非线性函数计算模型；流量计的平均灵敏度约为 0.15 pm/(L•h^{-1})，低流速下灵敏度最高可达到 1 pm/(L•h^{-1})。所提出的流量计丰富了光纤光栅用于液体流量测量的研究。设计中采用了掺钴高衰减光纤自发热和单端毛细管封装，为流量传感器的全光学化、微型化和高灵敏度发展提供了新思路。

关键词：光纤布拉格光栅；流量计；高衰减光纤；灵敏度

中图分类号：TN253 **文献标志码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1672-8785.2023.04.006

A Hot-Wire Flowmeter Based on Fiber Bragg Grating with High Attenuation Fiber

JIA Zhen-an[1,2,3,4], REN Jie[1,2,3,4*], BAI Yan[1,2,3,4], FAN Wei[1,2,3,4]

(*1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;*
2. Shaanxi Engineering Research Center of Oil and Gas Resource Optical Fiber Detection, Xi'an 710065, China;
3. Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, Xi'an 710065, China;
4. Key Laboratory of CNPC-Research Laboratory for Optical Fiber Dynamic Detection of Oil Reservoirs, Xi'an 710065, China)

收稿日期：2023-02-25

基金项目：陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(18JS093)；CNPC 测井重点实验室基金项目(20216328)

作者简介：贾振安(1959-)，男，陕西咸阳人，教授，主要从事纤维光学、光纤传感、光纤通信和光电子学等领域的教学与研究工作。

*通讯作者：E-mail：484966872@qq.com

Abstract: In order to develop all-optical flowrate measurement technology, a hot-wire flowmeter based on cobalt-doped high-attenuation fiber Bragg grating is proposed, and the flowrate measurement is achieved by demodulating the central wavelength of the fiber Bragg grating. The research process includes sensor fabrication, temperature sensing characteristics measurement and flowrate measurement experiments. The results show that the fiber Bragg grating has a temperature sensitivity of 10.3 pm/℃ based on the fiber with an attenuation coefficient of 8.9 dB/cm (1480 nm), and the flowmeter can realize highly repeatable measurements in the range of 400～3700 L/h. The flowrate and the central wavelength of the fiber Bragg grating follow a specific nonlinear function. The average sensitivity of the flowmeter is about 0.15 pm/(L•h^{-1}), and the sensitivity can be up to 1 pm/(L•h^{-1}) at lower flow rates. The proposed flowmeter enriches the research of fiber Bragg grating for liquid flow measurement. In the design, cobalt-doped high attenuation fiber self-heating and single-end capillary packaging are used, which provides a new idea for the development of full optics, miniaturization and high sensitivity of flow sensor.

Key words: fiber Bragg grating; flowmeter; high attenuation fiber; sensitivity

0 引言

在国民工业、生活及科学研究中，流体流量是需要被测量的一项重要参数。流量测量法众多，其中热式质量计量法是一种重要方法，即利用传感器与流体间换热量和流量存在的准确计算关系来实现测量[1]。20 世纪 70 年代以来，光纤传感日益成为一门新兴传感技术。其中，FBG 是一种能感应温度和压力信息的光无源器件，具有抗电磁干扰、体积小、灵敏度高等优点[2]。当前，基于 FBG 的有源热线式流量计是流量传感领域的一个重要研究方向。

目前，光纤光栅热线式流量计研究主要围绕内热源、传感结构和灵敏度提升三个方面。对于内热源供给问题，一类是采用电阻丝、涂敷金属薄膜材料等的电致生热方法[3-4]；另一类则在通入泵浦光源或激光源的同时构造 FBG 级联的光纤微结构，使得光在包层激发高阶模实现光致生热。其中，有源光加热是目前研究的前沿。对于传感结构，研究较多的光纤微结构有多模-单模级联(MMF-SMF)[5]、无芯(NCF)[6]、长周期光栅-光纤布拉格光栅(LPG-FBG)级联[7]等。由于普通 FBG 的温度灵敏度约为 11 pm/℃，为增大 FBG 的灵敏度，提出了包层刻蚀、增大输入功率等方法[8]。特别地，在石油、化工等易燃易爆工作环境中，全光学传感具有重要研究意义。

目前已有的研究成果集中在气体流量测量方面，少量研究涉及液体。本文在已有 FBG 热线式流量计研究的基础上，提出并通过实验验证了一种适用于液体流量测量的 FBG 热线式流量计。对流量计核心传感结构的温度传感特性的测定结果表明，基于 8.9 dB/cm(约 1480 nm)衰减系数的掺钴 FBG 具有 10.3 pm/℃的温度灵敏度。在实际流量测量时，以水为测量对象，输入功率恒定为 100 mW。在 400～3700 L/h 范围内的流量测量结果表明，其平均灵敏度约为 0.15 pm/(L•h^{-1})，流量-FBG 中心波长遵循特定非线性函数计算模型，拟合度超过 0.998，为流量计算提供了准确的计算模型。

1 传感器制作及原理

1.1 传感器结构及制作

该传感器由商用单模掺钴高衰减光纤(衰减系数为 8.9 dB/cm、工作波段为 1250～1650 nm)、普通单模光纤和玻璃毛细管组成。传感器的制作过程如图 1(a)所示。首先，通过光纤熔接机将单模光纤与掺钴光纤一端熔接，切割掺钴光纤使其保留 10 mm，再在掺钴光纤的一侧熔接单模光纤，制作完成后将其记为结构 1。接着利用 193 nm 准分子激光器在结构 1 中的掺钴光纤区段上刻写长度为 8 mm 的 FBG(位于中心位置)，完成刻栅的结构记为结构 2。其中，掺钴光纤需要提前进行载氢处理，使得光栅长久地保留在光纤上。最后，将结构 2 置

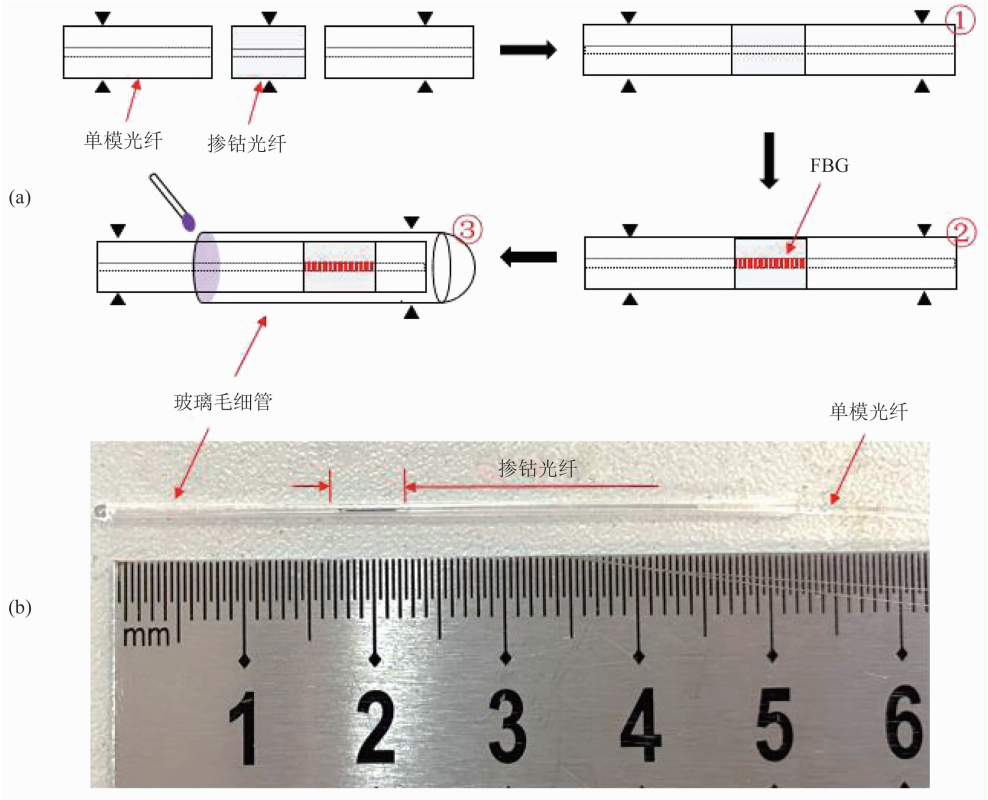

图 1 传感器制作步骤与实物图

入内外径分别为 300 μm 和 400 μm 的单端封闭的毛细玻璃管。在入口端通过紫外光固化胶固定，放置时确保光纤末端与毛细管底部有一段距离，使其处于自由伸展状态。制作完成的传感器如图 1(b)所示。

1.2 传感原理

提出的流量计传感原理(见图 2) 如下：光纤解调仪发射宽带光源用于提供传感信号，泵浦激光器发射激光用于加热掺钴光纤，解调仪和激光器连接波分复用器(WDM)，传感信号和激光耦合进 WDM 并传输至放置在测量管道中的 FBG，通过解调 FBG 中心波长实现流量测量。

在核心传感结构部分中，FBG 是刻写在光纤纤芯上的短周期光纤光栅，宽带光传输至 FBG 时会反射特定频段的波。根据光纤的耦合模理论，该中心反射波长 λ_b 取决于光纤栅距 Λ 和纤芯有效折射率 n_{eff}：

$$\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

式中，Λ 和 n_{eff} 具有对温度和应变同时敏感的属性[9]。当 FBG 所处温度及应力发生改变时，满足

$$\Delta\lambda = \lambda_b[(\alpha+\xi)\Delta T+(1-p_e)\varepsilon] \tag{2}$$

式中，$\Delta\lambda$ 为波长偏移量，p_e 为有效弹光系数，ε 为应变，α 为热膨胀系数，ξ 为热光系数，ΔT 为温度改变量。

设计的流量计中，FBG 所处的光纤区段处于自由伸展状态。流量计在工作过程中受到的流体冲击或振动无法施加在 FBG 上，此时 FBG 仅受温度影响。FBG 所处的光纤区段为掺钴高衰减光纤。研究表明，掺钴光纤在高功率激光作用下会呈现明显的热效应。掺钴光纤在激光作用下温度升高，处在其上的 FBG 的初始 λ_b 会增大至 λ_b'。流体流过传感器带走热量使 FBG 区域降温，λ_b' 会减小至 λ_b''。在热平衡状态下，流体带走的热量等于流量计中产生的热量，可以写为[10]

$$p_{in}\varphi = [(T_v - T_e)(A+B\sqrt{v})] \tag{3}$$

式中，p_{in} 为输入光功率，φ 为掺钴光纤的光热转换效率，T_v 是流速为 v 时的传感器表面温

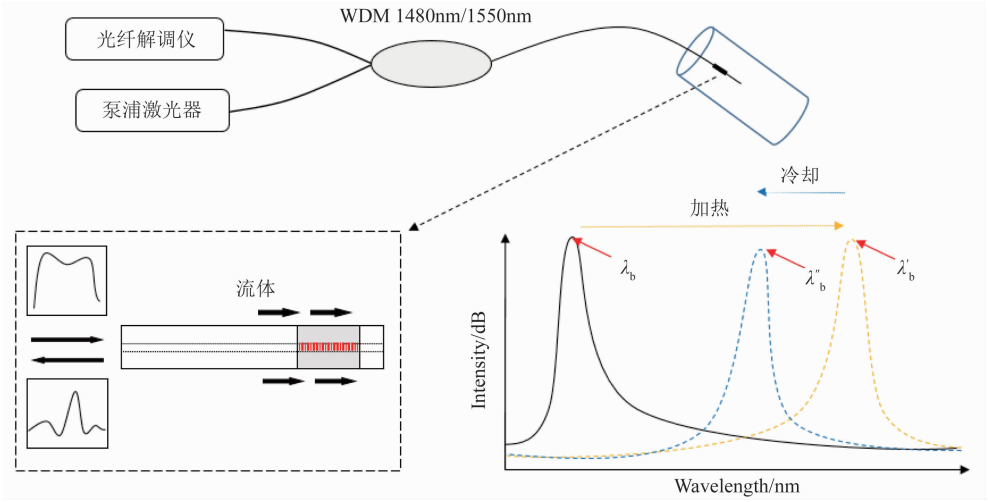

图 2 基于掺钴光纤的光纤光栅热线式流量计的工作原理

度，T_e 为环境温度，A 和 B 为经验校准常数。由式(2)和式(3)可得：

$$\lambda = \lambda_b + \lambda_b \frac{(\alpha+\xi)p_{in}\varphi}{A+B\sqrt{v}} \tag{4}$$

由于特定衰减系数的掺钴光纤具有恒定光热转换系数，式(4)中的 α、ξ、φ、A、B 均为常数，流体流速 v 与 FBG 反射波长 λ 具有一一对应关系，流量传感就是通过监测 FBG 中心波长位移来实现流量测量。

研究表明，将 V、Co 等过渡金属元素或 Er、Yb 等稀土元素掺杂在光纤纤芯中，除了会通过辐射效应产生激光放大等光学效应之外，还存在非辐射吸收过程。掺杂离子吸收能量从基态跃迁至激发态，随后通过非辐射跃迁将能量传递给晶体点阵引起热振动，进而产生显著的光热效应[11-12]。其中，掺钴光纤的吸收系数远远高于其他离子掺杂光纤，并且其在 800～1600 nm 波段内均具有较高的吸收系数，因此具有更广的适用范围[13]。此外，研究结果还表明，衰减系数较高的掺钴光纤在同等入射光功率下提升的温度更高，而提高初始温度有助于提高测量灵敏度[10]。本研究采用的掺钴光纤在 1250～1650 nm 波段具有较为平坦的衰减系数(8.9 dB/cm)。

2 实验及讨论

2.1 温度传感特性测试

首先，对提出的掺钴光纤 FBG 的温度灵敏度进行了测定。实验系统装置及结果如图 3 所示。将传感器放入温度分辨率为 1℃ 的 NBD-M1200-10IC 恒温箱中。光纤接分辨率为 1 pm 的 SM125 解调仪，解调仪连接电脑。温度灵敏度测定在 40～100℃ 的范围内进行。温度间隔为 10℃，每次实验时间稳定在 5 min。

根据图 3 中的温度传感特性曲线可知：当温度升高时，FBG 反射波长向长波方向移动，温度灵敏度为 10.3 pm/℃，FBG 反射波长与温度呈线性相关(线性度为 0.998)。与 Coric D 等人提出的约 8.5 pm/℃的掺钴光纤 FBG[14]相比，本文制作的掺钴光纤 FBG 具有更高的温度灵敏度。

2.2 流量传感实验

实验系统装置如图 4 所示。流量实验台架为 SXL-1 油气水三项流模拟装置。该装置可测量 0～6000 L/h 的大范围流量且自带流量计，能够实时对流量大小进行标定。VLSS-1480-B 激光源的最大输出功率为 500 mW，为实验提供高度稳定的 1480 nm 光源。在实验过程中，激光器和解调仪分别将 1480 nm 的泵浦光和 1550 nm 的信号光通过 WDM 耦合进掺钴光纤。反馈信号经过解调仪解调输出至电脑。实验台架的进水端有预置光纤，通过预置光纤熔接将流量计密封置入管道内。管道进水管有预置钢铁支架，流量计通过胶水固定在支架上。

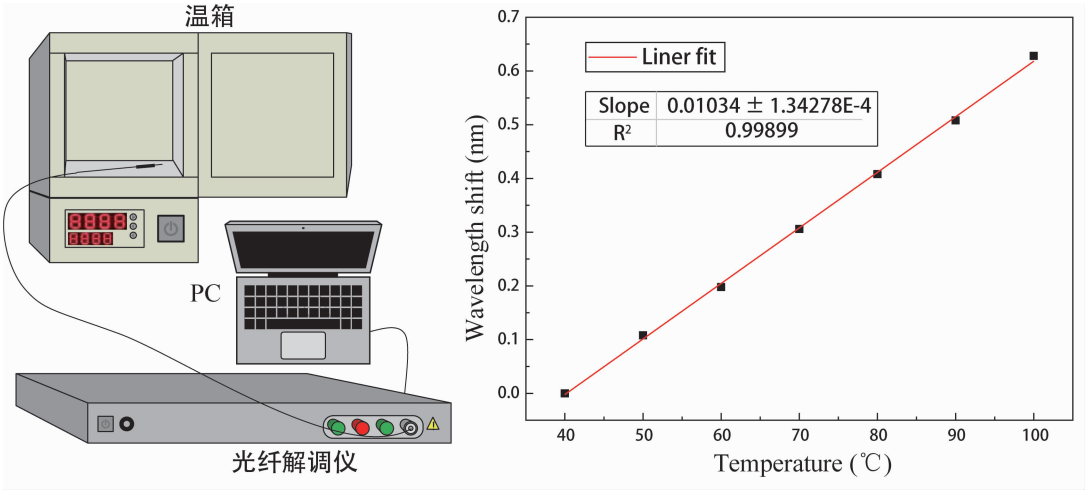

图 3 温度传感特性测试装置与响应曲线

图 4 流量测量实验装置

充水使管道满水后，记录静水状态下的水温(20℃)。随后将激光输出功率调节至 100 mW，待波长稳定后，记录初始波长值(1543.889 nm)。实验中，通过调节实验装置的齿轮泵控制流量大小，以约 350 L/h 的增量来增加流速。为使测量准确，每次调节流量大小后，间隔 10 min 记录 FBG 的反射波长。在 100 mW 的恒定功率下进行了 425～3650 L/h 的流量测量实验。流量-FBG 中心波长数据如图 5 所示。测试 1 中，流量从 0 增大到最大值 3650 L/h；测试 2 中，流量以同等间隔从最大值 3650 L/h 减小到 0。流量-FBG 中心波长的拟合曲线符合特定的非线性函数：

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{k_1}{k_2 + \sqrt{v}} \tag{5}$$

式中，k_1 和 k_2 在恒定输入功率下为常数。

从图 5 中可以看出，流量计的平均灵敏度约为 0.15 pm/(L•h^{-1})。在较低的流速下，灵敏度最高可达到 1 pm/(L•h^{-1})。流量-FBG 中心波长拟合曲线的斜率随着流量的增加而减小。这是由于流体在高流速下已经充分带走了热量，流量的进一步增加并不能明显降低传感

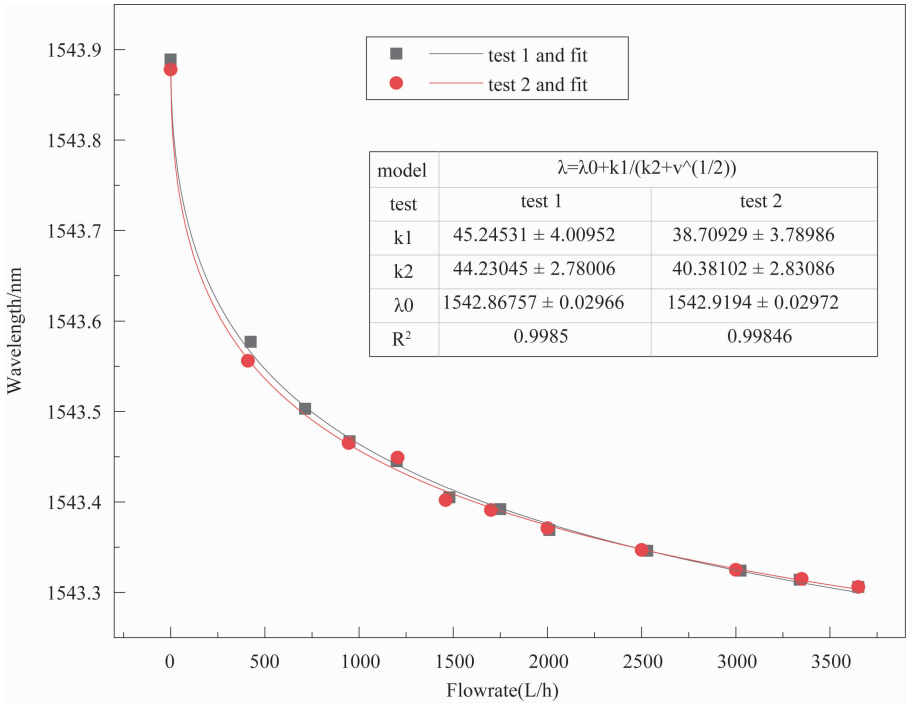

图 5　流量计的传感响应曲线

器温度。流量-FBG 中心波长的拟合曲线符合特定的非线性函数，正向和反向实验的拟合系数分别为 0.9985 和 0.9984。此外，在反向实验中，当流量回到 0 时，FBG 中心波长回到 1543.878 nm，这与初始值 1543.889 nm 非常接近。特别地，由于每次流量调整都保持 10 min 的间隔，正向和反向实验共进行了 5 h 左右。以上结果表明，流量计能够稳定地恢复到初始状态，且在误差容许范围内具有高重复性。

3　结束语

本文提出了一种基于掺钴高衰减光纤的光纤光栅热线式流量计，并对其进行了实验验证。该流量计利用衰减系数为 8.9 dB/cm、工作波长约为 1480 nm 的掺钴光纤实现自加热，通过监测刻写在掺钴光纤上的 FBG 中心波长变化来测量流量。此外，传感光纤部位采取单端毛细管封装的方式，有效实现了机械保护并有助于提高测量灵敏度。温度传感特性实验证明，本文提出的 FBG 具有 10.3 pm/℃的温度灵敏度，对温度的线性度为 0.998。在 400～3700 L/h 的液体流量范围内进行了流量测量及重复实验。结果表明，恒定功率下流量大小与 FBG 中心波长的响应曲线呈现非线性函数趋势，关于特定非线性函数的拟合度超过 0.998，为流量测量提供了准确的计算模型。在输入功率为 100 mW 时，测得流量计的平均灵敏度为 0.15 pm/(L·h^{-1})；而在较低的流速下，灵敏度最高可达到 1 pm/(L·h^{-1})。与最先进的流量计相比，本文提出的流量计补充了对液体测量的研究，并在低流量时具有更高的灵敏度。此外，该流量计还具有易于制造和成本低的优点。然而基于光纤光栅的全光学流量测量技术仍有待进一步研究，比如将其他特种光纤用于传感器件制作，研究光热转化效率与泵浦光波长、类型、功率之间的关系等。

参考文献

[1] 苏彦勋，李金海. **流量计量** [M]. 北京：中国计量出版社，1991.

[2] Kim J H, Lee Y G, Park Y, et al. Temperature-compensated strain measurement of full-scale small aircraft wing structure using low-cost FBG interrogator [C]. *SPIE*, 2013, **8692**: 86922P.

[3] Sohn K R. Fiber Bragg grating-tuned feedback laser flow sensor system [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, **179**: 1–4.

[4] Limberger H G, Ky N H, Costantini D M, et al. Efficient miniature fiber-optic tunable filter based on intracore Bragg grating and electrically resistive coating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(3): 361–363.

[5] Jewart C, McMillen B, Cho S K, et al. X-probe flow sensor using self-powered active fiber Bragg gratings [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, **127**(1): 63–68.

[6] Wang X, Dong X, Zhou Y, et al. Hot-wire anemometer based on silver-coated fiber Bragg grating assisted by no-core fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(24): 2458–2461.

[7] Caldas P, Jorge P A S, Rego G, et al. Fiber optic hot-wire flowmeter based on a metallic coated hybrid long period grating/fiber Bragg grating structure [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(17): 2738–2743.

[8] Yang J, Chen X, Dong X. Hot-wire anemometer based on frosted fiber Bragg grating coated with silver film [C]. Hefei: International Conference on Optoelectronic Science and Materials, 2019.

[9] Zhao M, Wang S, Luo B, et al. Theoretical study on the cross sensitivity of fiber Bragg grating sensor affected by temperature and transverse pressure [C]. Chengdu: Symposium on Photonics and Optoelectronics, 2010.

[10] Gao S, Zhang A P, Tam H Y, et al. All-optical fiber anemometer based on laser heated fiber Bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(11): 10124–10130.

[11] Sundeen J E, Buchanan R C. Thermal sensor properties of cermet resistor films on silicon substrates [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, **90**(1–2): 118–124.

[12] Davis M K, Digonnet M J F, Pantell R H. Thermal effects in doped fibers [J]. *Journal of lightwave technology*, 1998, **16**(6): 1013–1023.

[13] 李莹. 基于掺钴光纤的光纤光栅器件应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

[14] Coric D, Chatton R, Luchessa Y, et al. Light-controlled reconfigurable fiber Bragg gratings written in attenuation fiber [C]. Anaheim: Optical Fiber Communication Conference, 2007.