

基于薄包层 FBG 的热线式光纤风速计

陈旭科¹, 董新永^{1,2}

(1. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 杭州 310018; 2. 广东工业大学 信息工程学院, 广州 510006)

摘要: 为提高热线式光纤风速计的性能, 在金属膜光纤布喇格光栅(FBG)热线式光纤风速计的基础上, 通过减小 FBG 的包层厚度, 使风速计的 FBG 包层直径从 125 μm 减小到 71.6 μm , 并将这种薄包层 FBG 热线式光纤风速计与 FBG 常规风速计进行对比实验。结果表明: 薄包层 FBG 热线式光纤风速计的初始温度提高了 43.4%; 风速测量的灵敏度显著提高了 61.2%; 受使用的风洞限制, 风速最大测试范围为 20 m/s。

关键词: 光纤传感器; 光纤布喇格光栅; 热线式风速计; 气流速度测量; 薄包层

中图分类号: TP212.1; 535 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)11-0043-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.11.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Hot wire optical fiber anemometer based on thin cladding FBG

CHEN Xuke¹, DONG Xinyong^{1,2}

(1. Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to improve the performance of the hot wire fiber anemometer, based on the metal film fiber Bragg grating (FBG) hot wire fiber anemometer, the FBG cladding diameter of the anemometer is reduced from 125 μm to 71.6 μm by reducing the thickness of the FBG cladding, the thin cladding FBG hot wire optical fiber anemometer is compared with FBG conventional anemometer. The results show that the initial temperature of FBG hot wire fiber anemometer is increased by 48.3%, the sensitivity of airflow velocity measurement is significantly increased by 61.2%, and limited by the wind tunnel used, the maximum wind speed test range is 20 m/s.

Key words: optical fiber sensor; fiber Bragg grating; hot wire anemometer; airflow velocity measurement; thin cladding

0 引言

气流速度的精确测量在化学工程、航空航天工业、汽车工业、过程控制和医疗设备技术等领域中具有十分重要的作用^[1]。如今,人们广泛采用压差、超声波、涡旋或传热等参数进行间接测量^[2-4]。为了使测量设备的尺寸变得更小且效率更高,基于微机电系统(MEMS)的风速计技术被开发并广泛使用^[5-7]。然而,它们在某些低温或高温、腐蚀性、放射性或爆炸性的恶劣环境中不能工作或者测量效果不佳。光纤风速计因其具有紧凑的结构、电无源操作、长距离测量能力、高灵敏度以及

收稿日期: 2020-06-02。

基金项目: 国家自然科学基金(61775204、11974083)资助。

作者简介: 陈旭科(1994—), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 就读于浙江省杭州市中国计量大学光学工程专业, 主要研究方向为光纤传感器和光纤光栅传感器。参与了 2017 年省新苗人才计划项目“微结构光纤光栅传感器研究”。



对恶劣环境的高度适应性^[8-11]等优点而被广泛关注。

干涉式光纤风速计具有高测量灵敏度, 但是其传感头在高风速下易断裂而使得测量范围较小。热线式光纤风速计结构牢固, 具有高精度、高灵敏度和大测量范围等优点使其脱颖而出。近年来, 基于光纤布喇格光栅(FBG)的热线式风速计^[12-16]作为一个新的研究重点被提出。热线式风速计使用泵浦激光来加热金属(例如银)膜涂层的 FBG 作为热线, 得益于独特的激光泵浦方法以及光纤对光信号和泵浦激光的长距离传输能力, 可以轻松实现对气流速度的远程测量。此外, 气流的变化最终被编码为 FBG 的反射波长, 该绝对参数与信号强度无关, 因此理论上可以保证高精度测量。初始温度(即无气流时的 FBG 温度)是影响热线式光纤风速计测量灵敏度和范围的关键参数。对于给定的泵浦激光器功率, 如何提高初始温度并因此提高传感性能非常重要。因此, 本文提出一种提高基于薄包层 FBG 的热线式光纤风速计性能的方法。

1 光纤风速计传感头的制作和原理

基于金属膜的薄包层 FBG 光纤风速计的传感头结构如图 1 所示。它是由一个腰椎放大结构与一个镀银膜且包层厚度减小的 FBG 级联组成。红色箭头为 93.7% 泵浦激光的光路;蓝色箭头为用来检测的宽带光源反射回来的信号光。本文在自动熔接模式下使用标准的熔接机(Fujikura FSM-60s)以 110 μm 的较大重叠距离制作了腰椎放大结构,其包层和纤芯的直径分别为 145.6 μm 和 12.8 μm 。泵浦激光在腰椎放大处的损耗为 12 dB,这表示约 93.7% 的泵浦激光将耦合为包层和辐射模式。FBG 的长度为 4 mm,其中心距腰椎放大结构的中心为 7 mm。光纤风速计传感头的制作过程如下:首先,通过将刻有 FBG 的光纤末端插入 30% 的氢氟酸中 30 min,对 FBG 进行化学腐蚀。由于氢氟酸的浓度相对较高,FBG 的包层直径迅速从 125 μm 减小到 71.6 μm 。然后,使用真空蒸发法在 FBG 的表面上沉积厚度约为 120 nm 的银膜。最后,在银膜的外部沉积厚度约为 100 nm 的均匀石英膜,以防止其在空气中被氧化。

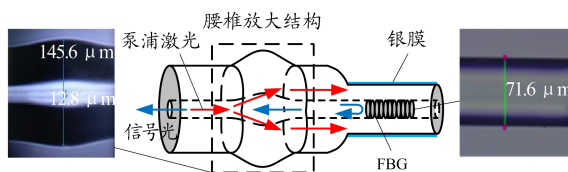


图 1 基于金属膜的薄包层 FBG 传感头结构

银膜吸收被腰椎放大结构耦合到光纤包层中的泵浦激光,并产生热量。由于 FBG 的温度敏感性,导致 FBG 的温度升高,使其布喇格波长红移。此外,根据牛顿的冷却定律^[17],物体温度变化率和物体自身的温度与环境的温度(即其周围环境的温度)之差成正比。对于给定的泵浦激光器,温度将达到最大值,此时银膜产生的热量等于从银膜到周围环境的热量。由于传感部分仅以对流的形式将热量传递到传感头周围的空气中,根据对流传热方程式可知,当建立热平衡时可以实现以下关系:

$$P\varphi a_{\text{Ag}} = 2\pi r L h (T_0 - T_e) \quad (1)$$

其中, P 为泵浦激光输入光纤的能量, φ 为耦合结构的耦合效率, a_{Ag} 为银膜对泵浦激光的吸收效率, h 为对流传热效率, T_0 为无风速时的传感器的初始温度, T_e 为环境温度, $2\pi r L$ 为银包覆的区域面积,而 r 和 L 分别为 FBG 光纤半径和 FBG 被包覆的长度。

因此,传感器吸收了泵浦激光后在无风速时的初始温度与其半径的关系式可变为:

$$T_0 = T_e + \frac{P\varphi a_{\text{Ag}}}{2\pi r L h} \quad (2)$$

如果其它参数保持不变,则 FBG 初始温度与其半径成反比,因此在通过化学腐蚀减小 FBG 的包层后,其初始温度将升高。

当空气流过传感器头时,气流将带走更多的热量,导致 FBG 的温度降低,因此 FBG 的布喇格波长将蓝移,直到建立新的动态热平衡。

根据以前基于 FBG 的热线风速计的研究^[18-21]可知,FBG 风速计相对于气流速度的布喇格波长为:

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{k P \varphi a_{\text{Ag}}}{A + B \sqrt{v}} \right) \quad (3)$$

其中, λ_0 是无激光加热时 FBG 的布喇格波长, k 是 FBG 的灵敏度温度系数, A 和 B 是经验校准常数, v 是风速。

2 实验结果与讨论

图 2 为实验装置图。宽带光源 (BBS) 在 1540~1560 nm 的波长范围内具有平坦的输出光谱,光谱分析仪 (OSA) 用来观察传感头 FBG 的布喇格波长的偏移量,波长分辨率为 0.02 nm。最大输出功率为 396 mW 的

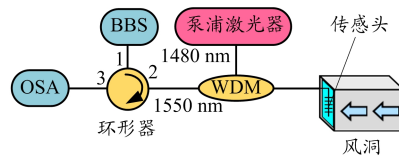
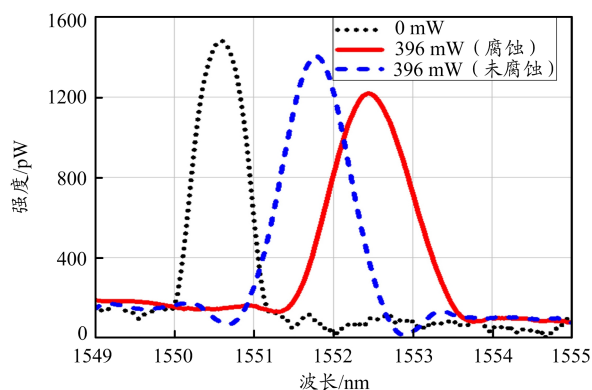


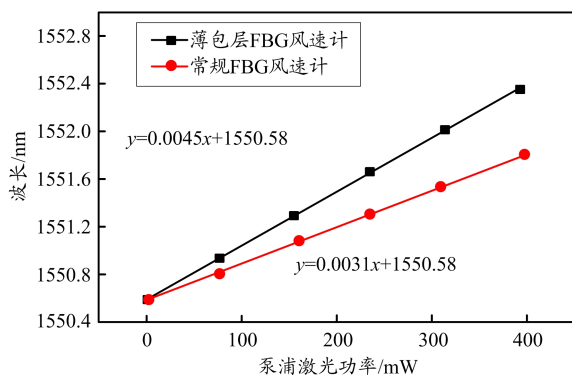
图 2 实验装置图

1480 nm 泵浦激光器通过 1480 nm/1550 nm 波分复用 (WDM) 来加热传感部分的 FBG。为了便于比较,本文对比测试了 2 个具有相同腰椎放大结构的风速计,即常规 FBG 风速计与薄包层 FBG 风速计,两者腰椎放大结构的制作工艺与薄包层 FBG 风速计相同,但前者无腐蚀 FBG 包层。

在进行风速测试之前,首先打开泵浦激光器,测量 FBG 的布喇格波长偏移与泵浦功率的关系。FBG 的反射光谱按照理论上的预测会线性地往长波长方向漂移。当泵浦激光功率分别为 0 mW 和 396 mW 时,薄包层 FBG 风速计的反射光谱如图 3(a) 所示。该风速计的波长偏移为 1.83 nm,从 1550.58 nm 移至 1552.41 nm,这表明如果设 FBG 的温度灵敏度为 10 pm/°C,则激光加热会使传感头温度升高 183 °C,即在环境温度为 25 °C 时,传感头的初始温度(当激光泵浦的功率最大且无风速时的温度)为 208 °C。对于常规 FBG 风速计,波长偏移为 1.20 nm,温度仅升高了 120 °C,其传感头的初始温度为 145 °C。图 3(b) 显示了 2 个 FBG 风速计相对于泵浦激光功率测得的波长偏移情况。通过线



(a) 激光加热后有/无腐蚀的FBG反射光谱



(b) 有/无腐蚀FBG的中心波长漂移量与激光功率的关系

图3 无风速时,有/无腐蚀的FBG反射光谱和中心波长与激光功率的关系

性拟合测量数据发现,2个波长偏移与泵浦激光功率成线性比例,薄包层FBG风速计和常规FBG风速计的斜率分别为4.5 pm/mW和3.1 pm/mW。因此,通过使用包层腐蚀技术,本文在FBG的初始温度以及布喇格波长方面获得了约50%的显著改善。这与理论分析非常吻合。

从图3(a)还可以看出,2个风速计的FBG反射光谱在激光功率为396 mW时比0 mW时拥有相对较低的反射率和更宽的带宽。对于薄包层FBG风速计而言,它比常规FBG风速计变化更大。薄包层FBG风速计和常规FBG风速计的反射率分别降低了7%和17%,3 dB带宽分别增加了28%和57%。这是由于沿FBG长度方向加热不均匀而引起的啁啾效应造成的,通过使用较短的FBG,可以有效地减轻啁啾效应。

然后,使用396 mW的最高泵浦激光功率对薄包层FBG风速计通过风速在0~20 m/s之间变化的风洞进行测试。气流温度固定为25℃。当风速增加时,FBG的布喇格波长逐渐向较短的波长方向移动。同时,光谱轮廓返回到原始值,即反射率和带宽都朝原始值缓

慢变化。这是因为随着平均温度的降低,非均匀加热引起的啁啾效应得以缓解。几种不同的风速下测得的反射光谱如图4所示,当风速为0 m/s、0.5 m/s、1.5 m/s、10 m/s和20 m/s时,薄包层FBG的中心波长分别为1552.41 nm、1551.51 nm、1551.24 nm、1550.88 nm和1550.58 nm。

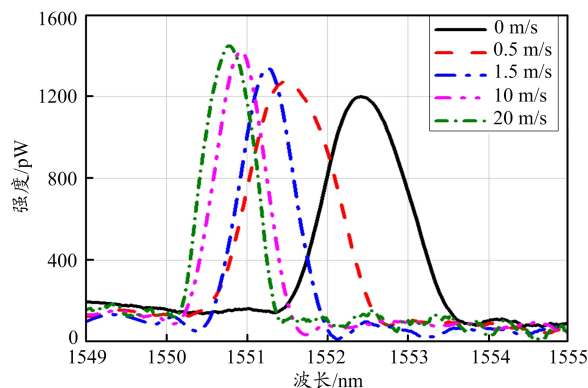


图4 薄包层FBG风速计在不同风速下的反射光谱

2种风速计的中心波长与施加的风速的测量数据如图5所示。采用式(3)对薄包层FBG风速计的数据进行拟合,获得了非常接近的拟合曲线。薄包层FBG风速计的中心波长 λ_a 与风速 v 的关系可写为:

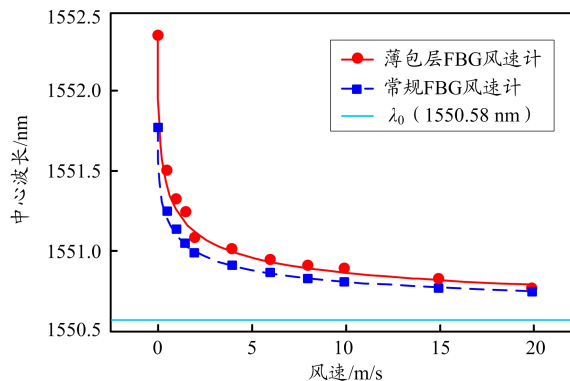


图5 中心波长与施加的风速之间的关系

$$\lambda_a = \frac{1.12}{0.63 + \sqrt{v}} + 1550.58 \quad (4)$$

而常规FBG风速计的拟合曲线为:

$$\lambda_r = 0.95 / (0.79 + \sqrt{v}) + 1550.58 \quad (5)$$

根据以上实验得出波长偏移和风速之间的关系,可以从风速计的测量波长计算出风速的值:

$$v = \left(\frac{1.12}{\lambda - 1550.58} - 0.63 \right)^2 \quad (6)$$

薄包层FBG风速计的灵敏度可以由将式(4)以中心波长对风速求导得到:

$$\frac{d\lambda}{dv} = \frac{-0.56}{\sqrt{v} (0.63 + \sqrt{v})^2} \quad (7)$$

测量灵敏度在很大程度上取决于风速的值。速度越小,灵敏度越高。例如,在风速为 0.1 m/s、0.5 m/s、1.5 m/s 和 20 m/s 时的灵敏度分别为 $-1978 \text{ pm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 、 $-443 \text{ pm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 、 $-133 \text{ pm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 和 $-4.8 \text{ pm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 。随风速迅速降低的灵敏度与牛顿的冷却定律有关,即物体的表面温度以与其和周围环境温度之差成比例的速率变化。实验中,当风速从 0 m/s 增至 20 m/s 时,FBG 与气流之间的温差从 183 °C 迅速降低至 21 °C。

为了进行比较,本文基于 λ_r 相对于风速的导数计算出参考的常规 FBG 风速计的相应灵敏度,其在风速为 0.1 m/s、0.5 m/s、1.5 m/s 和 20 m/s 时的灵敏度分别为 $1227 \text{ pm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 、 $-300 \text{ pm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 、 $-95.5 \text{ pm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 和 $-3.8 \text{ pm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 。可以看出,在风速分别为 0.1 m/s、0.5 m/s、1.5 m/s 和 20 m/s 的情况下,薄包层 FBG 风速计的灵敏度相比于常规 FBG 风速计分别提高了 61.2%、47.7%、39.3%和 26.3%。从图 5 中还可以看出,当风速超过 8 m/s 时,中心波长几乎不变,响应变得越来越小。因此,传感器的敏感区域约为 0~8 m/s。如果将 FBG 的纤维直径减小到较小值,则有望得到进一步的改善。

3 结束语

本文通过减小 FBG 的部分光纤包层厚度以改善基于 FBG 的热线式风速计的性能,并通过具有包层直径为 71.6 μm 的薄包层 FBG 风速计与常规 FBG 风速计的对比实验结果表明:薄包层 FBG 热线的初始温度提高了约 43.4%,且在 0.1 m/s、0.5 m/s、1.5 m/s 和 20 m/s 的不同风速下获得的灵敏度分别为 $-1978 \text{ pm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 、 $-443 \text{ pm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 、 $-133 \text{ pm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 和 $-4.8 \text{ pm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 。该传感器在低风速时的灵敏度非常高,使其在今后低风速测量中脱颖而出。而且,其风速测量范围比一般的光纤风速计更广,因此会有非常可观的应用前景。这种方法有望成为今后用来提升各种光纤传感器的可靠方式。

参考文献:

- [1] VENUGOPAL A, AGRAWAL A, PRABHU S V. Review on vortex flowmeter-designer perspective [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 170: 8–23.
- [2] CHA J E, AHN Y C, KIM M H. Flow measurement with an electromagnetic flowmeter in two-phase bubbly and slug flow regimes [J]. Flow Mea-

surement & Instrumentation, 2002, 12(5): 329–339.

- [3] LIGEZA P. An investigation of a constant-bandwidth hot-wire anemometer[J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2009, 20(3): 116–121.
- [4] WUCHANG C A. Flow measuring instrument applications and developing trends[J]. Process Automation Instrumentation, 2006, 27(7): 71–76.
- [5] ODA S, ANZAI M, UEMATSU S, et al. A silicon micromachined flow sensor using thermopiles for heat transfer measurements [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2003, 52(4): 1155–1159.
- [6] RASMUSSEN A, ZAGHLOUL M E. In the flow with MEMS [J]. IEEE Circuits & Devices Magazine, 1998, 14(4): 12–25.
- [7] WANG Y H, LEE C Y, CHIANG C M. A MEMS-based air flow sensor with a free-standing micro-cantilever structure [J]. Sensors, 2007, 7(10): 2389–2401.
- [8] LEE C L, HONG W Y, HSIEH H J, et al. Air Gap Fiber Fabry–Perot interferometer for highly sensitive micro-airflow sensing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(13): 905–907.
- [9] 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.
- [10] BYRNE G D, JAMES S W, TATAM R P. A Bragg grating based fibre optic reference beam laser Doppler anemometer [J]. Measurement Science & Technology. 2001, 12(7): 909–913.
- [11] HSIAO Y L, LI C M, CHIANG T C, et al. 16th Opto-electronics and communications conference, July 4–8, 2011[C]. Kaohsiung: IEEE, 2011.
- [12] CASHDOLLAR L J, CHEN K P. Fiber Bragg grating flow sensors powered by in-fiber light [J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5(6): 1327–1331.
- [13] 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]. Appl. Opt., 2011, 50(17): 2738–2743.
- [14] WANG X H, DONG X Y, 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.
- [15] DONG X Y, ZHOU Y, ZHOU W J, et al. Compact anemometer using silver-coated fiber Bragg grating [J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(5): 1381–1386.
- [16] 尚秋峰, 秦文婕. FBG 传感系统信号处理方法研究进展[J]. 光通信技术, 2020, 44(5): 5–9.
- [17] CHANG Z S. The available range of Newton's law of cooling [J]. College Physics, 2000, 10(9): 55–59.
- [18] BRUUN H H. Hot-wire anemometry: Principles and signal analysis [M]. Oxford: Measurement Science and Technology, 1996.
- [19] LOMAS C G, KORMAN M S. Fundamentals of hot wire anemometry [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- [20] WANG X H, DONG X Y, ZHOU Y, et al. Optical fiber anemometer using silver-coated fiber Bragg grating and bitaper [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 214: 230–233.
- [21] YAN S C, LIU Z Y, LI C, et al. “Hot-wire” microfluidic flowmeter based on a micro fiber coupler [J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5680–5683.