

基于 FBG 啾啾效应的强度解调型光纤热式风速计

张家瑞^{1,2}, 唐玉涵^{1,2}, 徐鹏柏^{1,2}, 许 鸥^{1,2}, 董新永^{1,2*}

(1. 广东工业大学 信息工程学院, 广州 510006; 2. 广东工业大学 广东省信息光子技术重点实验室, 广州 510006)

摘要: 针对现有的波长解调型光纤布喇格光栅(FBG)风速计系统成本高、操作不方便等问题, 提出一种基于 FBG 啾啾效应的强度解调型光纤热式风速计。使用泵浦激光对长度为 15 mm 的 FBG 进行非均匀加热后, 使其产生明显的啾啾效应, 利用啾啾化 FBG 在风速作用下温度梯度降低导致啾啾程度减弱, 其反射光功率也随之减小的原理, 成功实现了强度解调型的 FBG 风速测量。实验结果表明: 风速计的测量范围达 0~11 m/s, 在风速为 0.1 m/s 时风速计的灵敏度高达 $-28.60 \mu\text{W}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$, 其动态响应时间小于 1 s (低风速到高风速约为 0.3 s, 高风速到低风速为 0.9 s)。

关键词: 热式风速计; 光纤布喇格光栅; 啾啾效应; 强度解调

中图分类号: TN212.1 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2022)03-0013-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.03.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Intensity interrogated optical fiber thermal anemometer based on the chirp effect of FBG

ZHANG Jiarui^{1,2}, TANG Yuhan^{1,2}, XU Pengbai^{1,2}, XU Ou^{1,2}, DONG Xinyong^{1,2*}

(1. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Aiming at the high cost and inconvenient operation of the wavelength demodulation fiber Bragg grating (FBG) anemometer system, an intensity interrogated optical fiber thermal anemometer based on the chirp effect of FBG is proposed. After using a pump laser to heat the 15 mm FBG non-uniformly, it produces a noticeable chirp effect. Under the airflow, the chirp effect of the chirped FBG weakens as its temperature gradient decreases, resulting in reflected optical power decline. Based on this principle, the FBG wind speed measurement with intensity demodulation is successfully realized. The experimental results show that the measurement range of the anemometer is 0~11 m/s, and the sensitivity is up to $-28.60 \mu\text{W}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ when the wind speed is 0.1 m/s. In addition, the dynamic response time is less than 1 s (about 0.3 s for low to high wind speed, and 0.9 s for high to low wind speed).

Key words: thermal anemometer, fiber Bragg grating, chirp effect, intensity interrogation

0 引言

光纤风速计因具有结构紧凑、灵敏度高、抗电磁干扰能力强和测量距离远等优势, 成为近年来光纤传

收稿日期: 2022-04-23。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61775204、11974083)资助; 光纤光缆制备技术国家重点实验室开放课题(SKLD1905)资助; 广东省引进创新创业团队项目(2019ZT08X340)资助。

作者简介: 张家瑞(1994—), 男, 硕士研究生, 现就读于广东工业大学信息工程学院电子与通信工程专业, 主要从事光纤传感器、光纤通信器件的研究工作。

* 通信作者: 董新永(1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为光纤激光器、光纤传感器和光纤通信器件。



感领域的研究热点。目前, 基于光纤布喇格光栅(FBG)^[1-3]、长周期光纤光栅(LPG)^[4]和倾斜光纤光栅(TFBG)^[5]等的光纤光栅风速计已经被研究和报道, 基于 Fabry - Perot 干涉仪^[6]、Sagnac 干涉仪^[7]和 Michelson 干涉仪^[8]等经典光纤传感结构的风速计也已经实现。然而, 绝大多数的光纤风速计的信号解调方式为波长解调, 在测量时需要使用成本较高的光谱或波长测量仪器来读取光纤风速计输出的光谱信号, 极大地限制了光纤风速计在实际测量中的应用。为此, 近年来有部分学者提出了基于强度解调的光纤风速计方案。

2019 年, GAO R 等人^[9] 利用凹槽底板将 2 根端面镀有石墨烯薄膜的梯度型折射率渐变光纤进行准直,

再用 532 nm 的激光器加热石墨烯薄膜,最后使用功率计测量不同风速下该结构的透射功率,获得了一种强度调制型的光纤热式风速计。得益于石墨烯薄膜良好的散热性和自身结构的开放性,该风速计具有很短的响应时间。但是,因为在测量时需要使用体积较大的凹槽底板进行准直,破坏了传感器周围的风场,导致测量精度受到影响。2020 年,WANG F 等人^[9]采用表面镀有单壁碳纳米管(SWCNTs)的TFBG制作得到光纤热式风速计,并使用 1550 nm 的商用泵浦激光器对风速计进行加热和解调。SWCNTs 高达 93% 的光吸收率使得该风速计在低泵浦功率下获得良好的加热效果。此外,该方案还利用TFBG包层模谐振峰强度呈现高斯形变化的特点,补偿了热式风速计固有的灵敏度非线性变化,最终获得了风速计透射强度与风速成线性关系的效果。然而,因为TFBG包层模谐振峰本身的带宽较窄,限制了该风速计的测量范围。另外,以上 2 个方案采用的测量透射功率的工作方式在实际应用中也有诸多不便之处^[10]。

针对上述问题,本文提出一种基于FBG啁啾效应的强度解调型光纤热式风速计(下文简称光纤风速计)。

1 光纤风速计的结构和原理

本文提出的光纤风速计的传感头结构如图 1 所示,它由一个 LPG 和一个表面镀有银膜的 FBG 级联而成。LPG 是通过二氧化碳激光在单模光纤上制作而成的,其周期为 510 μm,长度为 3 cm,在 1480 nm 处的损耗峰约为 12 dB,即可将 93.7% 的泵浦激光耦合到包层。FBG 则是使用准分子激光器通过相位掩模板在单模光纤中刻写而得,其中心波长为 1550 nm,3 dB 带宽为 0.57 nm。另外,FBG 还具有高达 99.9% 的反射率和 15 mm 的长度,可尽量减小因啁啾效应引起的反射率降低^[11]。本文首先通过磁控溅射镀膜装置,在 FBG 表面均匀镀上了一层厚度约为 260 nm 的银膜作为吸收光产生热的材料。为防止银膜在高温中被氧化,在银膜外又镀了一层厚度约为 80 nm 的掺铝氧化锌(AZO)膜^[12]。然后,使用商用光纤熔接机(Fujikura

FSM-60S)将 2 种光纤光栅进行熔接,光栅之间的间隔为 3 mm。最后,对 FBG 的尾纤端面进行斜切处理以防止菲涅尔反射的干扰。制备完成后,LPG 作为泵浦光的耦合元件,将大部分输入的泵浦激光耦合到 FBG 的包层,而 FBG 作为传感元件,通过银膜吸收泵浦激光而获得高的初始温度梯度,温度梯度使 FBG 啁啾化,可以让反射带宽展宽和反射光功率增加。该啁啾化的 FBG 被置于风场中后,温度梯度随风速增加而减小,导致反射光功率下降。因此,通过测量 FBG 反射光功率的变化可以实现风速的测量。

当泵浦激光被 LPG 耦合到 FBG 的包层后,会逐渐被包层外的银膜吸收,并沿距离呈指数衰减^[13]。FBG 某一点处的光功率表示为

$$P_{(l)}=P_{\text{input}} \cdot \varphi \cdot e^{-\alpha l} \quad (1)$$

其中, l 定义为耦合光进入银膜后的传输距离, P_{input} 为输入的泵浦激光功率, φ 为 LPG 的耦合系数, α 为银膜的吸收系数。由式(1)可知,最大和最小的耦合光功率 P_{max} 和 P_{min} 将出现在银膜的开始和结束位置,假设 FBG 的总长度为 z ,则两者之间的差值可表示为

$$\Delta P=P_{\text{max}}-P_{\text{min}}=P_{\text{input}} \cdot \varphi(1-e^{-\alpha z}) \quad (2)$$

银膜吸收泵浦光后产生热量,使 FBG 的温度升高成为了光纤热线。当有气流吹过风速计探头时,热量损失会加快,从而降低了 FBG 的温度,直到达到热平衡。假设在速度为 v 的气流下,FBG 某一点处的温度为 $T_{(v)}^{(t)}$,由热式风速计理论^[14-15]可得到以下的关系

$$P_{(t)} \cdot \alpha \cdot \beta = [T_{(v)}^{(t)} - T_a] \cdot (A + B \cdot v^n) \quad (3)$$

其中, β 为银膜将吸收光转换成热量的转换效率, T_a 为环境温度, A 、 B 和 n 为经验校准系数。由式(3)可推得,在非均匀加热和气流冷却的共同作用下,FBG 沿着光栅轴向存在着温度梯度,最大的温度差值可以表示为

$$\Delta T = \frac{P_{\text{input}} \cdot \varphi \cdot \alpha \cdot \beta (1 - e^{-\alpha z})}{A + B \cdot v^n} \quad (4)$$

温度梯度的存在将使 FBG 反射光谱发生啁啾,光谱的带宽展宽量 ΔB 可以表示为^[16]

$$\Delta B = 2 \cdot n_{\text{eff}} \cdot \Lambda \cdot k \cdot \Delta T \quad (5)$$

其中, n_{eff} 是纤芯的有效折射率, Λ 是光栅周期, k 是 FBG 的温度灵敏度系数。假设 FPG 的反射率基本不变,则 FBG 反射光功率的变化量 ΔP_r 可以表示为^[17]

$$\Delta P_r = \eta \cdot \rho \cdot R \cdot \Delta B \quad (6)$$

其中, η 、 ρ 和 R 分别是光功率传输系数、宽带光源的功率谱密度和 FPG 在有效带宽范围内的平均反射率。

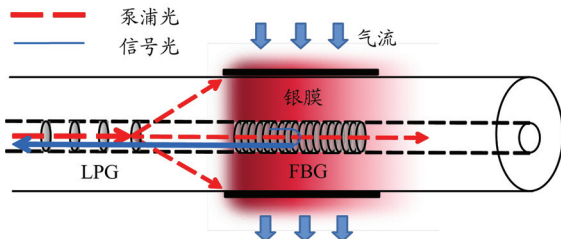


图 1 传感头结构示意图

最后,啾啾化 FBG 的反射光功率与风速之间的关系可表示为

$$P_r = P_r^0 + \Delta P_r = P_r^0 + 2 \cdot \eta \cdot \rho \cdot R \cdot n_{\text{eff}} \cdot \Lambda \cdot k \cdot \frac{P_{\text{input}} \cdot \varphi \cdot \alpha \cdot \beta (1 - e^{-\alpha \cdot z})}{(A + B \cdot v^n)} \quad (7)$$

其中, P_r^0 为 FBG 未加热前的反射光功率。根据式(7),可以通过测量啾啾化 FBG 的反射光功率求解气流速度。

2 光纤风速计的测试装置

风速测量的实验装置如图 2 所示,宽带光源通过环形器为光纤风速计提供信号光,其在 1545~1555 nm 波长范围具有平坦的输出光谱并且功率波动小于 0.02 dBm。最大输出功率为 530 mW 的 1480 nm 泵浦激光通过 1550 nm/1480 nm 波分复用器输入并加热光纤风速计。光纤风速计反射回的信号光通过手持式光功率计进行解调。在进行测试时,本文使用商用风速表(Testo 425)对风洞进行校准,从而可以稳定地获得 0~11 m/s 的风速。另外,在实验时光纤风速计两端的尾纤要用光纤夹具固定,以防止出现不必要的弯曲,影响测量精度。

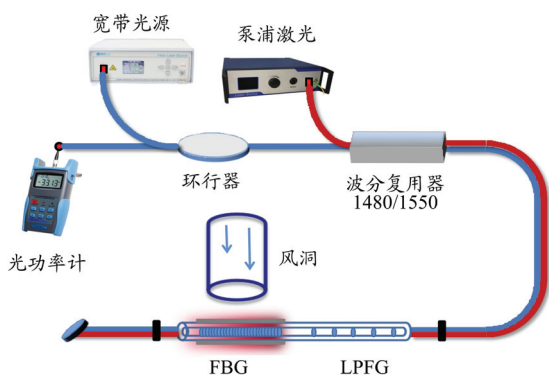


图 2 风速测量实验装置图

3 光纤风速计的测量效果

由理论分析可知,光纤风速计的测量效果与泵浦光对它的加热效果息息相关。本文通过实验探究了风速计在不同泵浦功率下的带宽展宽效果。在实验中,首先,用挡风罩遮挡传感头,避免周围的气流干扰;然后,以 50 mW 为间隔,逐步将泵浦的输出功率从 0 增加到 530 mW,并使用光谱仪(Anritsu MS9740A)记录光谱的变化;最后,测得风速计在不同泵浦功率下的光谱如图 3 所示。可以看出,随着泵浦功率的增加,风速计的反射光谱呈现明显的红移现象,同时伴随着带宽的逐渐展宽。

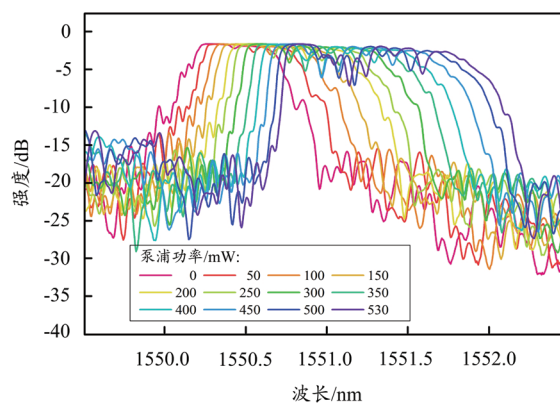


图 3 风速计在不同泵浦功率下的反射光谱

再对风速计每个反射光谱的 3 dB 中心波长和 3 dB 带宽进行分析,分别获得了 3 dB 中心波长和 3 dB 带宽随泵浦功率的变化关系,如图 4 所示。可以看出,当泵浦功率从 0 增加到 530 mW 时,风速计的 3 dB 中心波长从 1550.431 nm 变化到 1551.318 nm,一共红移了 0.889 nm。线性拟合可得风速计的 3 dB 中心波长漂移率为 1.68 pm/mW,且与泵浦激光功率成良好的线性关系,线性度为 0.999。因此,泵浦激光功率的增大可以有效使 FBG 的温度上升,从而成为光纤热线。

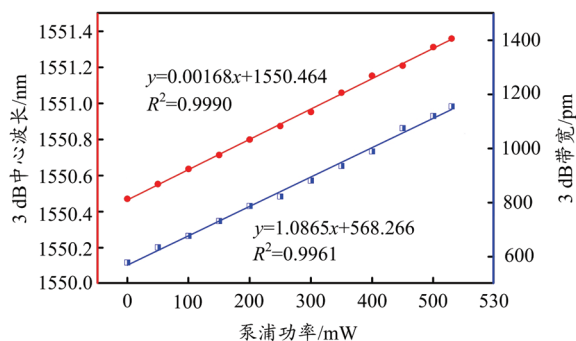


图 4 FBG 的 3 dB 中心波长和 3 dB 带宽与泵浦功率的关系

另外,当泵浦激光功率从 0 增加到 530 mW 时,风速计的 3 dB 带宽从 576 pm 增加到 1195 pm,增大了 2.074 倍。线性拟合可得风速计的 3 dB 带宽的展宽率为 1.087 pm/mW,且与泵浦激光功率成良好的线性关系,线性度为 0.9961。

本文使用功率解调的方法,因此需要测量风速计在不同泵浦功率下的反射光功率。把宽带光源的功率设置为 20 mW,将光谱仪替换为手持式光功率计,其余条件不变,测得风速计在不同泵浦功率下的反射光功率,如图 5 所示。可以看出,风速计的反射光功率随着泵浦功率的增加而增加。在泵浦功率从 0 增加到 530 mW 时,风速计的反射光功率从 36.59 μ W 增加到 59.40 μ W,共增加了 22.81 μ W,即变化了 2.104 dB。线

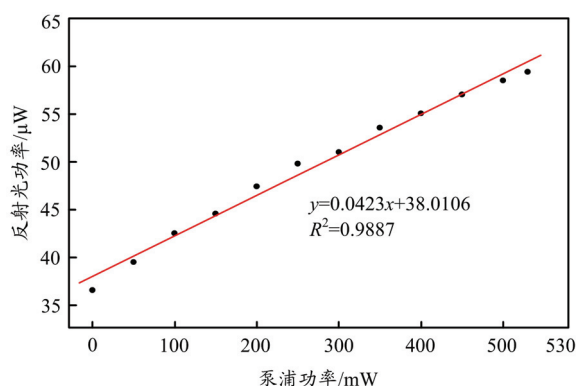


图5 风速计反射光功率与泵浦功率的关系

性拟合可以得到风速计的反射光功率的变化率为 $0.0423 \mu\text{W}/\text{mW}$, 同样与泵浦功率成良好的线性关系, 线性度为 0.9887 。因此, 泵浦功率的增大可有效使风速计探头的温度梯度逐渐增大, 从而使得风速计的带宽展宽, 反射光功率增加。

4 风速测量实验

风速测量实验在 24°C 的室内温度下进行, 将泵浦激光的功率固定为 530 mW , 并调节风洞的风速从 0 逐渐变化到 11 m/s , 测试得到风速计在不同风速下的响应。首先, 使用光谱仪记录了风速计的响应反射光谱, 如图6所示。可以看出, 随着风速增大, 风速计的 3 dB 中心波长先迅速地蓝移, 同时带宽也快速地收缩, 随后变化减缓, 并逐渐趋于稳定。在 $0\sim 11 \text{ m/s}$ 的风速范围, 风速计的 3 dB 中心波长从 1551.355 nm 变化到 1550.582 nm , 共蓝移了 0.773 nm 。对图6的光谱进行分析后可知, 3 dB 带宽从 1207 pm 变化到了 621 pm , 一共缩窄了 586 pm 。上述实验现象是因为气流带走了风速计表面的热量, 降低了风速计的温度。另外, 根据

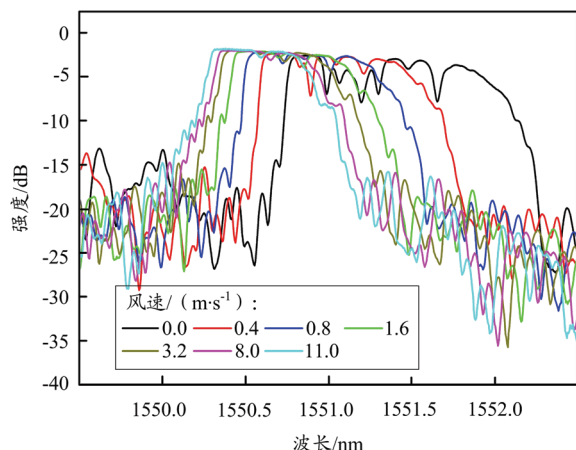


图6 风速计在不同风速下的反射光谱

牛顿冷却定律, 气流对风速计较高温处的冷却速度比低温处更快, 进而降低了风速计的温度梯度, 使风速计的啁啾程度降低。随着风速逐渐增大, FBG 中心波长和带宽的变化愈加不明显。这是因为风速增大时, 风速计的表面温度逐渐趋近于室温, 响应减弱, 呈现饱和的状态。

在同样的实验条件下, 本文使用了手持式光功率计测量了风速计在不同的风速下的反射光功率, 结果如图7所示。与 3 dB 中心波长和 3 dB 带宽的变化趋势类似, 随着风速增大, 风速计的反射光功率先迅速地下降, 随后下降趋势减缓, 功率逐渐趋于稳定。在 $0\sim 11 \text{ m/s}$ 的风速范围, 风速计的反射光功率从 $59.40 \mu\text{W}$ 变化到 $39.63 \mu\text{W}$, 一共下降了 $19.77 \mu\text{W}$, 即变化了 -1.758 dB 。将实验数据按照式(7)进行拟合, 最终得到了风速计反射光功率 P_r 与风速 v 间的关系式为

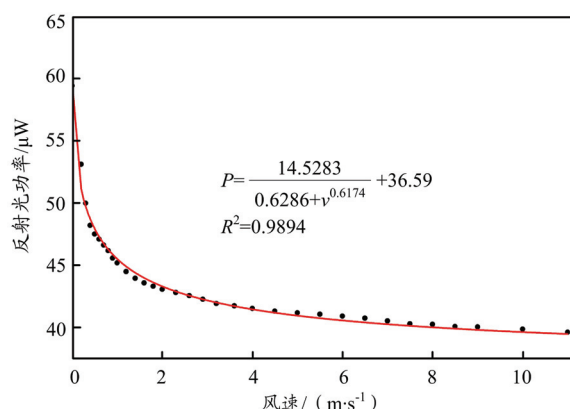


图7 风速计反射光功率与风速的关系

$$P_r = \frac{14.5283}{0.6286 + v^{0.6174}} + 36.59 \quad (8)$$

式(8)中拟合度达到 0.9894 。再对式(8)进行求导, 可以得到风速计在不同风速下的灵敏度表达式为

$$\frac{dP_r}{dv} = \frac{-8.9698}{(0.6286 + v^{0.6174})^2 \cdot v^{0.3826}} \quad (9)$$

通过式(9)简单计算出当风速分别为 0.1 m/s 、 0.4 m/s 、 0.8 m/s 、 1.6 m/s 、 3.2 m/s 、 8.0 m/s 和 11 m/s 时, 风速计灵敏度分别为 $-28.60 \mu\text{W}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 、 $-8.90 \mu\text{W}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 、 $-4.34 \mu\text{W}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 、 $-1.94 \mu\text{W}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 、 $-0.80 \mu\text{W}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 、 $-0.23 \mu\text{W}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 和 $-0.14 \mu\text{W}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$, 即风速测量的灵敏度在很大程度上取决于气流速度的值。风速越小, 风速计的灵敏度越高。

同样, 在泵浦激光功率为 530 mW 的情况下, 通过将风速在 0.3 m/s 和 7 m/s 之间轮流地切换, 使用台式光功率计 (Thorlabs PM320E) 测试得到风速计的动态响应, 结果如图8所示。实验结果表明, 风速计从低风

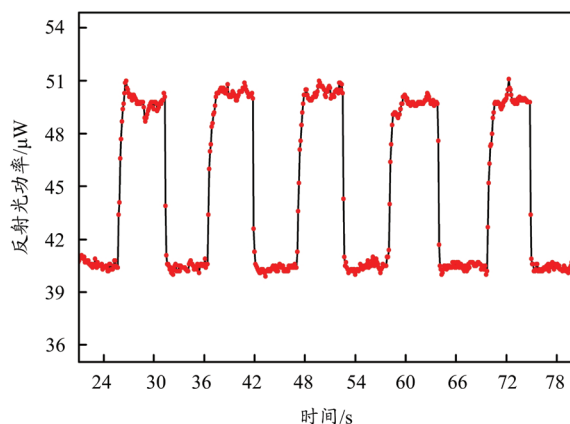


图8 风速变化时风速计的动态响应

速切换到高风速时的平均响应时间约为 0.3 s,反之约为 0.9 s。从该实验现象可知,风速计从高温降到低温的时间比从低温恢复到高温的时间短得多,说明风速计的加热效率比气流的冷却效率要低。另外,由于风速在高低切换间存在一定延时,因此风速计的实际响应时间应比实验测得值更短。

5 结束语

本文提出了一种基于 FBG 啁啾效应的强度解调型光纤热式风速计,利用 1480 nm 泵浦激光单侧泵浦长度为 15 mm 的 FBG,使涂敷在 FBG 外的银膜吸收激光产生热量。非均匀的加热方式及较长的吸收区域使 FBG 形成了较大的温度梯度,从而有效展宽了 FBG 带宽。加热实验结果表明:该风速计具有 1.087 pm/mW 的带宽展宽率;在气流的冷却作用下,加热后的 FBG 带宽逐渐收缩,反射光功率下降。使用功率计进行了风速测量实验,实验结果显示:在 0~11 m/s 的风速范围,风速计的反射光功率从 59.40 μW 变化到 39.63 μW ,共下降了 19.77 μW ;在风速为 0.1 m/s 时风速计具有高达 $-28.60 \mu\text{W}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 的灵敏度;风速计在高低风速交替切换间的平均响应时间分别约为 0.3 s (低到高)和 0.9 s (高到低)。该风速计因采用低成本的强度解调方法,且具有较高的灵敏度和远程监测能力,有望在实际风速测量项目中得到广泛应用。

参考文献:

[1] 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.

[2] WANG X, DONG X, 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.

[3] LIU Z, WANG F, ZHANG Y, et al. Low-power-consumption fiber-optic anemometer based on long-period grating with SWCNT coating [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(7): 2592–2597.

[4] ZHANG Y, WANG F, LIU Z, et al. Fiber-optic anemometer based on single-walled carbon nanotube coated tilted fiber Bragg grating [J]. Optics Express, 2017, 25(20): 24521–24530.

[5] LIU G, HOU W, QIAO W, et al. Fast-response fiber-optic anemometer with temperature self-compensation [J]. Optics Express, 2015, 23(10): 13562–13570.

[6] SOHN K R. Fiber Bragg grating-tuned feedback laser flow sensor system[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2012, 179: 1–4.

[7] LEE C L, LEE C F, LI C M, et al. Directional anemometer based on an anisotropic flat-clad tapered fiber Michelson interferometer [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101: 023502-1–023502-5.

[8] RAN G, DANFENG L, JIN C, et al. Real-time fiber-optic anemometer based on a laser-heated few-layer graphene in an aligned graded-index fiber [J]. Optics letters, 2019, 42: 2703–2706.

[9] WANG F, DUAN Y F, LU M, et al. Linear-response and ultra-simple hot-wire fiber-optic anemometer using high-order cladding mode[J]. Optics Express, 2020, 28(18): 27028–27036.

[10] 林云峰,杨菁怡,董新永. 基于 FBG 反射谱信噪比测量的重金属离子传感器[J]. 光电子·激光, 2016, 27(7): 704–708.

[11] DONG X, ZHANG C, HU K, et al. Temperature-insensitive tilt sensor with strain-chirped fiber Bragg gratings [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(11): 2394–2396.

[12] 李俊,闫金良,杨春秀,等. ZnO/Ag/ZnO 多层膜的制备和性质研究 [J]. 电子元件与材料, 2007, 26(3): 52–54.

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

[14] DONG X, ZHOU Y, ZHOU W, et al. Compact anemometer using silver-coated fiber Bragg grating [J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(5): 1381–1386.

[15] 谢代梁,葛慎,胡朋兵,等. 有源光纤式流量传感器的研究进展[J]. 中国计量学院学报, 2015, 26(1): 12–19.

[16] 郭团,刘波,张伟刚,等. 光纤光栅啁啾化传感研究[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 828–834.

[17] DONG X, YANG X, ZHAO C L, et al. A novel temperature-insensitive fiber Bragg grating sensor for displacement measurement [J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14(2): N7–N10.