

光源加热型高灵敏度光纤热式风速计

张家瑞^{1,2}, 吕大娟³, 董新永^{1,2*}, 徐鹏柏^{1,2}, 杨军^{1,2}, 秦玉文^{1,2}¹广东工业大学先进光子技术研究院, 广东 广州 510006;²广东工业大学广东省信息光子技术重点实验室, 广东 广州 510006;³光纤光缆制备技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430073

摘要 针对光纤热式风速计需要专门的泵浦激光或加热电阻所带来的成本增加和操作不便, 提出了基于光源自加热效应的高灵敏度光纤热式风速计。首先在单模光纤端面用紫外光固化胶制作法布里-珀罗干涉仪并将其作为传感探头; 然后利用传感探头对输入宽带光源的吸收所产生的热量, 获得自身较高的初始温度; 最后测量传感探头在气流作用下温度降低及应变所引起的干涉光谱的波长漂移量, 根据波长漂移量与风速的特定关系来实现风速测量。在 0~7 m/s 的风速范围内对传感探头进行测量, 结果表明传感探头获得高达 $-3.13 \text{ nm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 的风速灵敏度, 响应时间约为 250 ms。

关键词 传感器; 光纤风速计; 法布里-珀罗干涉仪; 热式风速计

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0428001

High Sensitivity Optical Fiber Thermal Anemometer
Heated by Light SourceZhang Jiarui^{1,2}, Lü Dajuan³, Dong Xinyong^{1,2*}, Xu Pengbai^{1,2},
Yang Jun^{1,2}, Qin Yuwen^{1,2}¹Advanced Institute of Photonics Technology, Guangdong University of Technology,
Guangzhou, Guangdong 510006, China;²Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangdong University of Technology,
Guangzhou, Guangdong 510006, China;³State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Wuhan, Hubei 430073, China

Abstract Because of the high cost and inconvenience caused by the need for a particular pump laser or heating resistor for the optical fiber thermal anemometer, a high-sensitivity optical fiber thermal anemometer based on the heating effect of the light source is proposed. First, the Fabry-Perot interferometer is made with ultraviolet curing glue on the end face of single-mode optical fiber and used as a sensing probe. Then, a higher initial temperature is obtained by using the heat absorbed by the sensor probe to the input broadband light source. Finally, the wavelength drift of the interference spectrum caused by the temperature drop and strain of the sensor probe under the action of air flow is measured, and the wind speed measurement is realized according to the specific relationship between the wavelength drift and the wind speed. The sensor is measured in the wind speed range from 0 to 7 m/s. The results show that the sensor achieves wind speed sensitivity up to $-3.13 \text{ nm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$, and the response time is about 250 ms.

Key words sensors; fiber optic anemometers; Fabry-Perot interferometers; thermal anemometers

收稿日期: 2021-06-07; 修回日期: 2021-08-13; 录用日期: 2021-08-20

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

通信作者: *dongxy@gdut.edu.com

1 引言

风速测量在体育比赛、环境监测和风力发电等诸多领域中有着十分重要的意义。近年来,光纤风速计因其具有体积小、抗电磁干扰和可远距离测量等优点而成为研究热点。光纤风速计主要有两类。一类是基于传感结构在风力作用下产生了弯曲或应变效应^[1-3],该类风速计可以获得较高的灵敏度,但容易存在传感结构不稳定、体积大和测量范围受限等缺点。另一类是基于光纤热线在气流作用下产生了散热效应,该类风速计多利用表面涂覆金属膜的光纤光栅(FBG)作为传感元件,通过激光泵浦来获得较高的初始温度,然后检测其在气流作用下由温度降低引起的波长漂移,实现对风速的测量。光纤热线式风速计具有体积小、响应快和测量精度高的优点,但需要同时使用泵浦激光和光纤光栅解调光源(宽带光源或波长扫描激光器)^[4-10]。

2015 年, Liu 等^[11]在单模光纤端面上粘附硅薄片形成了法布里-珀罗(法珀)干涉仪,并使用波长为 635 nm 的半导体激光器加热硅薄片,获得了一种体积很小的点式光纤热式风速计。得益于硅的较大的热光系数、热膨胀系数以及热扩散系数,该风速计具有较高的灵敏度和快速的响应时间,但是硅薄片的制备工艺要求比较高。2017 年, Lee 等^[12]采用聚合物材料在光纤端面制备法珀腔结构,采用电阻加热的方式获得了高灵敏度的光纤热式风速计,但是需要将法珀腔固定在铜片电阻上,铜片电阻的存在会对传感探头周围的风场产生扰动,影响测量的精度。

针对以上问题,本文提出一种基于光源加热效应的聚合物法珀腔光纤热式风速计。采用对红外光具有吸收作用的紫外光固化胶在单模光纤端面上制备聚合物法珀腔,并将其作为热式光纤风速计的传感探头。宽带光源输出的光通过单模光纤入射到法

珀腔,部分光被吸收转换成热量,使法珀腔产生较高的温度。同时,反射光则携带气流对法珀腔干涉光谱的调制信息,并被用于风速测量。因此,在风速计的设计中,光源具有加热传感探头的功能,无需额外的电阻加热或激光泵浦,有效简化了传感系统的结构,降低了功耗。另外,风速计探头无需附着加热电阻,这避免了对风场的干扰,能获得更高的测量精度。实验结果表明,光源加热型光纤风速计在 0~7 m/s 的风速测量范围内可获得高达 $-3.13 \text{ nm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 的灵敏度,响应时间在百毫秒量级。由于风力的作用,所设计的风速计在高速的情况下能获得比光纤光栅风速计更高的测量灵敏度。

2 风速计结构与传感原理

2.1 风速计的制作

风速计探头是用紫外光固化胶在光纤端面上制备而成的。首先,将待加工单模光纤的端面切平,用熔接机一侧的夹具固定。接着,用端面切平的另一根单模光纤作为载体,用其端面取少量紫外光固化胶 NOA65,并用熔接机另一侧的夹具固定。然后,在手动模式下驱动熔接机的步进电机缓慢移动,使两个光纤端面靠近,同时通过熔接机显示器观察。等待加工光纤的端面与另一光纤端面上的紫外光固化胶接触后,就迅速将二者分开。如此,少量的紫外光固化胶被沾在待加工光纤的端面,因表面张力而自然形成光滑的液面。最后,使用大功率的紫外光照射液体使其固化,即在光纤端面上制备获得聚合物法珀腔。通过控制两个光纤端面的靠近程度,可以调节待加工光纤端面上紫外光固化胶的量,由此改变聚合物法珀腔的厚度(腔长)。实验制备得到三个不同腔长的风速计样品,腔长分别为 17, 30, 48 μm 。图 1(a)为 17 μm 腔长的传感探头的显微镜照片,图 1(b)为结构示意图。

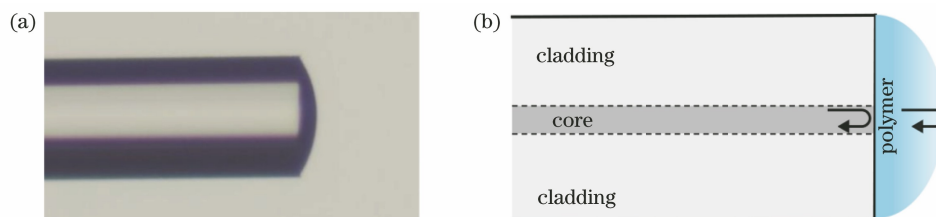


图 1 光纤风速计探头。(a)显微镜照片;(b)结构示意图

Fig. 1 Fiber optic anemometer probe. (a) Microscopic photograph; (b) schematic of structure

2.2 传感原理

当光入射到传感探头时,其分别在单模光纤与紫外光固化胶的界面以及紫外光固化胶与空气的界

面发生菲涅耳反射,如图 1(b)所示。两束反射光之间的相位差可表示为

$$\varphi = 4\pi nL/\lambda, \quad (1)$$

式中： n 为聚合物法珀腔的折射率(约为 1.524)； L 为聚合物法珀腔的腔长； λ 为入射光波长。两束反射光合束后发生干涉，在反射谱中表现为强度随波长的周期性波动。根据干涉原理，当相位差为 π 的奇数倍时，两束反射光发生干涉相消，表现为干涉光谱的波谷。因此，干涉光谱的第 m 级波谷的波长 λ_m 可表示为

$$\lambda_m = \frac{4\pi nL}{(2m+1)\pi}, \quad m=0,1,2,3,\dots \quad (2)$$

将 λ_m 对温度 T 求导，可求得该风速计对温度的响应灵敏度，表达式为

$$\frac{\partial \lambda_m}{\partial T} = \lambda_m \left(\frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dT} + \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dT} \right), \quad m=0,1,2,3,\dots \quad (3)$$

式中： dn/dT 为光热系数； dL/dT 为热膨胀系数。由(3)式可知，风速计的温度灵敏度取决于光热系数和热膨胀系数。

固化后的 NOA65 对宽带光源的近红外光具有较强的吸收能力，会将吸收的部分光转换为热，使传感探头获得较高的初始温度。当风吹过加热后的传感探头时，风会带走部分热量，使得探头的温度降低，从而使干涉光谱发生漂移。由同类研究可知，温度变化所引起的波长漂移量 $\Delta\lambda_T$ 与风速的关系^[12] 可表示为

$$\Delta\lambda_T = a[\exp(bv) - 1], \quad (4)$$

式中： v 为风速； a 和 b 为由宽带光源的输出功率和风速计的结构参数决定的系数。系数 b 为负数，表示波长随风速变化的指数衰减速率。系数 a 为正数，表示风速无限大情况下的波长漂移量，即最大波长漂移量。

同时，风速测量中传感探头迎风放置于风场，风力作用下所产生的应变和弹光效应是必须考虑的因素。假设探头正对气流方向的受力为 F ^[13]，则有

$$F = \frac{1}{2} \xi \rho v^2 S, \quad (5)$$

式中： ρ 为流体密度； S 为传感探头的横截面积； ξ 为空气的阻力系数。风速计探头在风力作用下发生形变，其腔长的相对变化量和形变所引起的折射率相对变化量可以表示为

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{ES}, \quad (6)$$

$$\frac{\Delta n}{n} = -P_e \cdot \frac{\Delta L}{L}, \quad (7)$$

式中： ΔL 、 E 、 Δn 和 P_e 分别为聚合物法珀腔的腔长变化量、杨氏模量、折射率变化量和有效弹光系数。因此，风力作用下干涉光谱的波长漂移量可表示为

$$\Delta\lambda_F = \lambda_m \left(\frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta L}{L} \right) =$$

$$\lambda_m (1 - P_e) \frac{\xi \rho}{2E} \cdot v^2 = cv^2. \quad (8)$$

设 $c = \lambda_m (1 - P_e) \xi \rho / 2E$ ， c 值与风速计的结构参数以及被测气流的物理性质有关。当风速计参数和被测气体一定时， c 为常量。由此可知，由风力引起的波长漂移量 $\Delta\lambda_F$ 正比于风速 v 的平方。

因此风速计在风速作用下的总波长变化量可表示为

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_T + \Delta\lambda_F = a[\exp(bv) - 1] + cv^2. \quad (9)$$

(9)式较完整地描述了风速计的波长漂移量与风速的关系，可用于指导风速计的设计和实验数据的分析。

3 实验结果与讨论

实验采用的测试系统如图 2 所示，包括可调速风洞、C+L 波段的宽带光源(BBS)、环形器、光谱分析仪(OSA)以及光纤风速计，其中 SMF 为单模光纤。其中，宽带光源的光通过环形器输入到风速计，风速计反射回的光经环形器后输入到光谱仪。

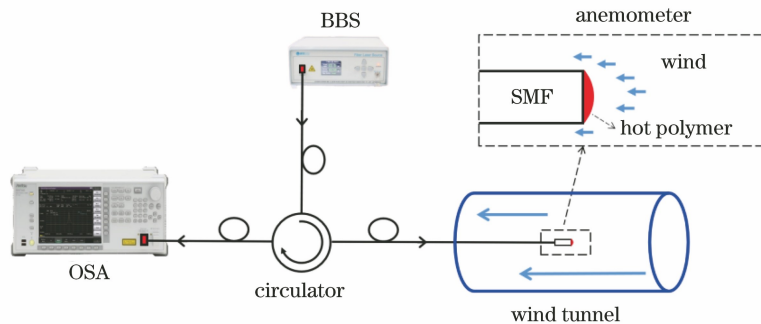


图 2 风速测量的实验装置

Fig. 2 Experimental equipment for measuring wind speed

为了保证测量过程中风速计位置的固定,将风速计封装在一根长度为 5 cm、内径为 250 μm 的金属针管中,仅使风速计的尖端暴露在空气中。这样,既便于风速计位置的固定,也尽量减小了封装后风速计的迎风面过大对风场造成的影响。

3.1 风速计的温度标定实验

由于宽带光源对风速计的加热效果直接关系到风速计的灵敏度和测量范围,为了更加准确地判断风速计的温度,首先对其进行了温度标定实验。在实验中,将制作好的风速计用夹具固定好,放置在温控箱中,并用挡风罩遮挡传感头,避免风力的干扰。同时,将宽带光源的输出功率设置为 5 mW,以便尽量降低风速计吸收光产生的热量。然后,将温控箱的温度以 5 $^{\circ}\text{C}$ 为步长从 20 $^{\circ}\text{C}$ 逐步增加到 65 $^{\circ}\text{C}$,得到风速计在该范围内的干涉光谱,如图 3 所示,箭头表示温度从 20 $^{\circ}\text{C}$ 逐步增加到 65 $^{\circ}\text{C}$ 。从图 3 可以看到,随着温度的增大,风速计的干涉光谱呈现明显的红移现象。取波谷 A 进行分析,获得图 4 的波长随温度的关系,温度灵敏度为 397.2 pm/ $^{\circ}\text{C}$,线性度 R^2 为 0.996,说明风速计对温度的响应非常灵敏,而且波长与温度呈良好的线性关系。

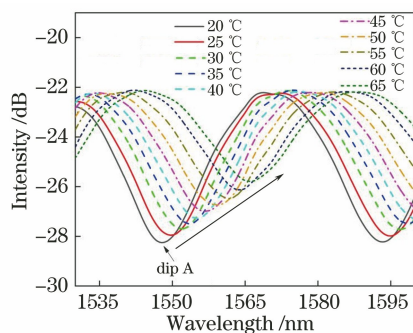


图 3 风速计在不同温度下的干涉光谱
Fig. 3 Interference spectra of anemometer at different temperatures

为了研究光源功率对风速计初始温度的影响,在风速为零的情况下调节宽带光源的功率,使其从 5 mW 步进到 100 mW,并记录风速计的干涉光谱,如图 5 所示,箭头表示功率从 5 mW 增加到 100 mW。从图 5 可以看到,随着光源功率的增大,风速计的干涉光谱逐渐增大,波谷逐渐红移,说明宽带光源功率的增大使得风速计探头的温度逐渐升高。波谷 A 的波长变化量及计算所得的风速计温度与光源功率的关系如图 6 所示。线性拟合可得,波谷 A 的波长漂移率为 164.7 pm/mW,宽带光源

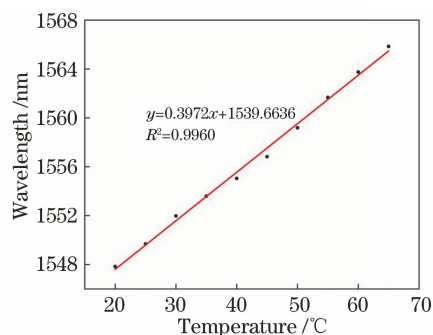


图 4 风速计的波长与温度的关系
Fig. 4 Relationship between wavelength of anemometer and temperature

的加热效率为 0.415 $^{\circ}\text{C}/\text{mW}$;当光源功率为 100 mW 时,传感头的温度约为 60 $^{\circ}\text{C}$ 。

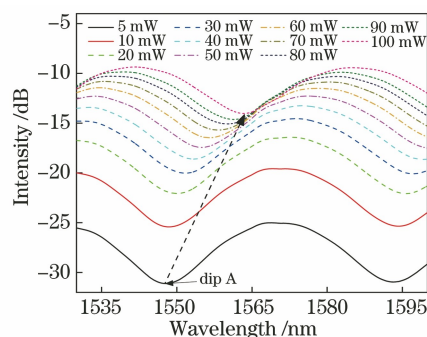


图 5 风速计在不同光源功率下的干涉光谱
Fig. 5 Interference spectra of anemometer under different light source power

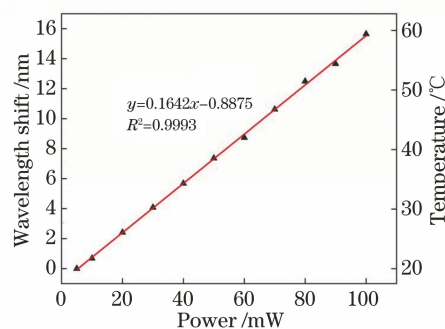


图 6 风速计的波长和温度与光源功率的关系
Fig. 6 Relationship among wavelength, temperature of anemometer, and power of light source

3.2 风力响应实验

为了在风力响应实验中尽量降低温度的影响,将宽带光源的功率设置为 5 mW,并使传感头正对气流的方向,测得不同风速下风速计的波长漂移量。波长漂移量与风速平方的对应关系如图 7 所示。线性拟合可得 $\Delta\lambda = 7.0486v^2 - 2.8230$,与前面的理论分析结果相符。

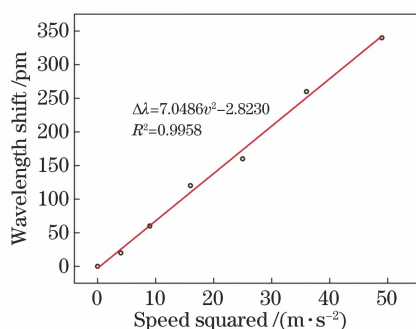


图 7 5 mW 的光源功率下风速计的波长与风速平方的关系
Fig. 7 Relationship between wavelength of anemometer and square of wind speed under power of 5 mW light source

3.3 风速测量实验

在风速测量实验中,保持气流温度为 20 °C,使风速计正对气流的方向放置,使风洞的风速从 0 逐步增大到 7 m/s,测得不同风速下风速计(腔长为 17 μm)的部分干涉光谱如图8(a)所示,箭头表示风

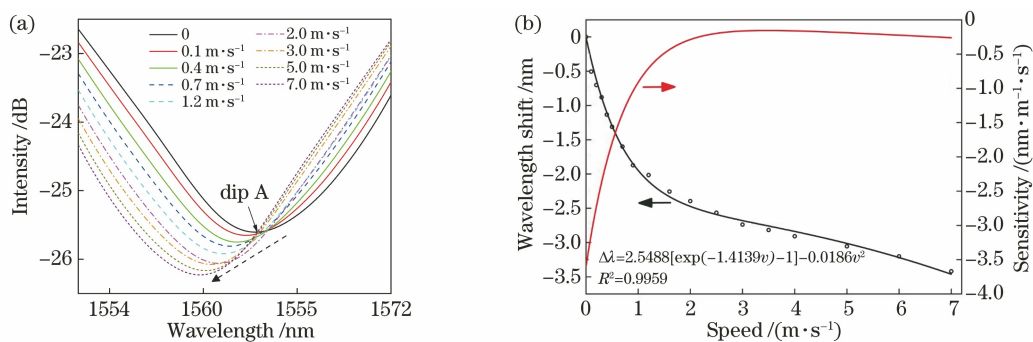


图 8 光纤风速计的响应特性。(a)不同风速下风速计的干涉光谱;(b)风速计(腔长为 17 μm)的波长漂移量和灵敏度随风速的变化曲线

Fig. 8 Response characteristics of fiber optic anemometer. (a) Interference spectra of anemometers at different wind speeds; (b) variation curves of wavelength drift and sensitivity of anemometer (cavity length is 17 μm) with wind speed

风速计的灵敏度呈现上述的变化趋势是由以下因素导致的。低风速情况下,传感探头与气流的温度差较大,在气流冷却作用下温度迅速降低,此时探头的温度变化是造成其波长漂移的主要因素,风力影响相对较弱。随着风速的增加,探头与气流的温度差减小,风速计的灵敏度逐渐降低,这与牛顿冷却定律相符。在高风速阶段,探头的温度变化相对较弱,但由于风力与风速成平方关系,风力的影响明显增强,风速计在风力的作用下灵敏度有小幅度的回升。

相比于先前报道的其他热式光纤风速计,本文提出的风速计由于在风力作用下产生了应变效应,在高风速情况下仍能保持较高的灵敏度,有利于获得更大的风速测量范围。另外,得益于紫外光固化

速从 0 逐步增大到 7 m/s。随着风速的增加,波谷 A 先快速蓝移,后变化变慢并逐渐趋于稳定,在 7 m/s 的风速下波长漂移量为 -3.42 nm,将波长数据按照(8)式进行拟合,得到波长漂移量与风速之间的拟合公式为 $\Delta\lambda = 2.5488[\exp(-1.4139v) - 1] - 0.0186v^2$,拟合度达到 0.9959。对该拟合公式进行求导,可得到图 8(b)的风速计灵敏度变化曲线,可以看到风速计在风速为 0.1 m/s 下的灵敏度为 -3.13 nm/(m·s⁻¹);随着风速的增加,灵敏度(绝对值)呈现指数衰减,在风速分别为 1.0 m/s 和 2.0 m/s 的情况下分别降至 -0.91 nm/(m·s⁻¹)和 -0.29 nm/(m·s⁻¹),在风速为 3.5 m/s 的情况下降至最低值 -0.16 nm/(m·s⁻¹)。在风速超过 3.5 m/s 后,风速计的灵敏度有小幅度的回升,且随着风速的增加而增加,在风速分别为 5 m/s 和 7 m/s 的情况下分别达到 -0.19 nm/(m·s⁻¹)和 -0.26 nm/(m·s⁻¹)。

胶的较大的热膨胀系数^[14],本风速计高达 -3.13 nm/(m·s⁻¹)的灵敏度分别约为 Lee 等^[12]提出的同类型风速计的 1.2 倍、光纤光栅热线式风速计的 3.1~5.3 倍^[7-8],以及硅薄片法珀腔风速计的 6 倍^[11],因此更具应用优势。

取腔长为 17 μm 的风速计,依次输入功率为 60,80,100 mW 的宽带光源,测得在不同宽带光源功率下风速计的风速响应,如图 9 所示。从图 9 可以看出,在不同的光源功率下,风速计的波长整体变化趋势基本一致,呈现风速越低灵敏度越高、高风速下灵敏度降低的规律,但更高的光源功率明显提高了传感器的灵敏度,因为高的光源功率可以使传感探头的初始温度更高;当光源功率分别为 60,80,100 mW 时,风速计在 0.1 m/s 的风速下的灵敏度

分别为 $-0.90, -1.74, -3.13 \text{ nm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 。60, 80, 100 mW 的输入功率下, 风速计对风速的响应曲线拟合公式中的拟合参数以及得到的拟合度如表 1 所示。从表 1 可以看到, 三个拟合公式中系数 a 和 b 的绝对值均随着光源功率的增大而增大, 而系数 c 的增大可由紫外光固化胶在更高的光源功率下, 自身温度更高而导致其杨氏模量变小来解释, 但太高的光源功率会导致紫外光固化胶的温度过高, 使紫外光固化胶发生变性, 影响反射光谱。因此, 光源功率也不能过高。

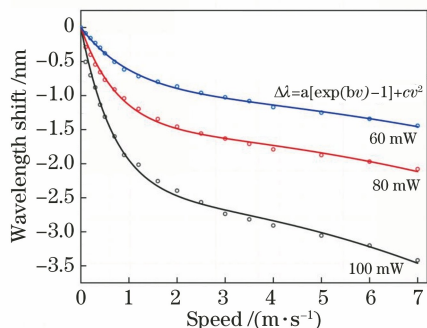


图 9 不同光源功率下风速计对风速的响应曲线
Fig. 9 Response curves of anemometer to wind speed under different light source power

表 1 不同光源功率下风速计对风速的响应曲线拟合公式中的参数及拟合度

Table 1 Parameters and fitting degree in response curve fitting formula of anemometer to wind speed under different light source power

Power /mW	a	b	c	R^2
60	1.0231	-0.9154	-0.0089	0.9984
80	1.5598	-1.2821	-0.0114	0.9957
100	2.5488	-1.4139	-0.0186	0.9959

在 100 mW 的光源功率下, 对腔长分别为 17, 30, 48 μm 的三个风速计样品进行风速测试, 实验结果如图 10 所示。从图 10 可以看到, 三者的波长总

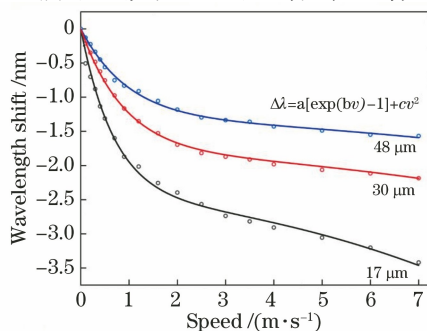


图 10 不同腔长的风速计对风速的响应曲线
Fig. 10 Response curves of anemometers with different cavity lengths to wind speed

体变化趋势一致, 但较短的腔体在相同风速下能获得更高的风速灵敏度。较短的腔体使得自身散热面积和体积之间的比值更大, 故有助于更高效地进行热传递, 使热量可以快速散发。腔长越短, 干涉光谱的自由光谱范围(FSR)越大, 波谷的带宽越宽, 这会增大波谷波长的取值误差, 所以腔长也不能太短。17, 30, 48 μm 的腔长下, 风速计对风速的响应曲线拟合公式中的拟合参数以及得到的拟合度如表 2 所示。

表 2 不同腔长下风速计对风速的响应曲线拟合公式中的参数及拟合度

Table 2 Parameters and fitting degree in response curve fitting formula of anemometer to wind speed under different cavity lengths

Length / μm	a	b	c	R^2
48	1.3599	-1.0003	-0.0048	0.9974
30	1.8538	-1.0876	-0.0068	0.9993
17	2.5488	-1.4139	-0.0186	0.9959

在 100 mW 的光源功率下, 使用风速为 5.3 m/s 的气流对腔长为 17 μm 的风速计进行动态响应测试。实验中, 风速计前放置了可迅速使气流通和阻断的快门。然后, 将光谱分析仪的分辨率降至 0.5 nm 以提高扫描速率, 通过光谱分析仪的波长记录功能记录干涉波峰的波长值, 测试得到风速计的动态响应如图 11 所示。从图 11 可以看到, 风速计的平均响应和恢复时间分别为 250 ms 和 580 ms, 说明该风速计具有快速响应的特点。

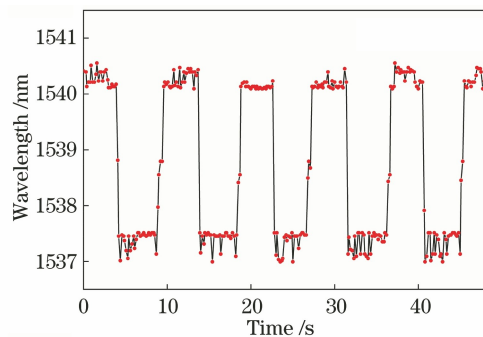


图 11 风速计(腔长为 17 μm)的动态响应曲线
Fig. 11 Dynamic response curve of anemometer (cavity length is 17 μm)

4 结 论

本文提出并实现了一种集成在单模光纤端面的光源加热式光纤风速计。利用对红外光具有吸收作用的紫外光固化胶在光纤端面上制作法珀干涉仪, 并将其作为热式光纤风速计的传感探头。当宽带光

源的光入射到传感探头时,一部分光被吸收转换成热量,从而使法珀腔的温度升高,另外一部分光被反射回来,携带了风速对干涉光谱的调制信息并被用于风速测量。在气流的作用下风速计同时受到热量散失和风力应变的作用,使干涉光谱波长发生漂移。实验中在低风速下可获得高达 $-3.13 \text{ nm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 的灵敏度,响应时间约为 250 ms。与之前报道的光纤光栅热线式风速计相比,光源加热型热式光纤风速计具有灵敏度高、结构紧凑、能耗低、系统简单和制备简易等优点。

参 考 文 献

- [1] 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(2): 023502.
- [2] Fujiwara E, Hayashi J G, da Silva Delfino T, et al. Optical fiber anemometer based on a multi-FBG curvature sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(19): 8727-8732.
- [3] Liu Y Y, Jing Z G, Liu Q, et al. Differential-pressure fiber-optic airflow sensor for wind tunnel testing [J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 25101-25113.
- [4] 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.
- [5] Caldas P, Jorge P A, 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Gao S R, 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.
- [10] Gao R, Lu D F. Temperature compensated fiber optic anemometer based on graphene-coated elliptical core micro-fiber Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 34011-34021.
- [11] 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.
- [12] Lee C L, Liu K W, Luo S H, et al. A hot-polymer fiber Fabry-Perot interferometer anemometer for sensing airflow [J]. *Sensors*, 2017, 17(9): 2015.
- [13] Zhao Y, Wang P, Lü R, et al. Highly sensitive airflow sensor based on Fabry-Perot interferometer and Vernier effect [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(23): 5351-5356.
- [14] Sun B, Wang Y P, Qu J L, et al. Simultaneous measurement of pressure and temperature by employing Fabry-Perot interferometer based on pendant polymer droplet [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 1906-1911.