



光学学报
Acta Optica Sinica
ISSN 0253-2239, CN 31-1252/O4

《光学学报》网络首发论文

题目: 光源加热型高灵敏度光纤热式风速计
作者: 张家瑞, 吕大娟, 董新永, 徐鹏柏, 杨军, 秦玉文
收稿日期: 2021-06-07
网络首发日期: 2021-08-24
引用格式: 张家瑞, 吕大娟, 董新永, 徐鹏柏, 杨军, 秦玉文. 光源加热型高灵敏度光纤热式风速计[J/OL]. 光学学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.o4.20210823.1247.014.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

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 提出了一种基于光源加热效应的高灵敏度光纤热式风速计。通过在单模光纤端面用紫外光固化胶制作法布里-珀罗干涉仪作为传感探头, 利用其对输入的宽带光源的吸收产生热量, 获得自身较高的初始温度, 然后测量其在气流作用下温度降低及应变引起的干涉光谱的波长漂移, 根据波长漂移量与风速的特定关系来实现风速测量。实验中在风速为 0-7 m/s 范围内进行了测量, 获得高达 -3.13 nm/(m/s) 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

High Sensitivity Optical Fiber Thermal Anemometer Heated by Light Source

Zhang Jiarui^{1,2}, Lü Dajuan³, Dong Xinyong^{1,2*}, Xu Pengbai^{1,2}, Yang Jun^{1,2}, Qin Yuwen^{1,2}

¹ *Advanced Institute of Photonics Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;*

² *Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;*

³ *State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Wuhan, Hubei 430073, China*

Abstract An optical fiber thermal anemometer heated by light source is proposed. It is fabricated by using ultraviolet-curing adhesive to form a Fabry-Perot interferometer on the tip of a single-mode fiber and heating it through its absorption to the input broadband light source. The airflow brings some heat away from and introduces strain to the sensing probe, resulting in wavelength shift of the interference fringe. Therefore, the airflow velocity can be measured by detecting the wavelength shift of the optical fiber thermal anemometer. In the experiment, high sensitivity up to -3.13 nm/(m/s) is achieved within a measurement range of 0-7m/s and the response time is about hundreds of milliseconds.

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

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: *E-mail: dongxy@gdut.edu.com

1 引言

风速测量在从体育比赛到环境监测、风力发电等诸多领域中都具有十分重要的意义。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的弯曲或应变效应^[1-3], 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、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的散热效应, 多利用表面涂敷金属膜的光纤光栅 (FBG) 作为传感元件, 通过激光泵浦获得较高的初始温度, 然后检测其在气流作用下温度降低引起的波长漂移, 实现对风速的测量。光纤热线式风速计的体积小、响应快、测量精度高, 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 等人通过在单模光纤端面粘贴硅薄片形成法布里-珀罗 (法珀) 干涉仪, 并使用 635 nm 半导体激光器加热硅薄片, 获得了一种体积很小的点式热式光纤风速计。得益于硅较大的热光系数、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^[11]。2017 年, Lee 等人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^[12]。但是需要把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。我们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作聚合物法珀腔, 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时, 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被用于风速测量。因此, 在本风速计的设计中, 光源同时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, 有效地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, 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 的测量范围内可获得高达-3.13 nm/(m/s) 的灵敏度, 响应时间在百毫秒量级。而且由于风力的作用, 在高风速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，用熔接机的一侧夹具固定。再用端面切平的另一根单模光纤作为载体，用其端面沾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，就迅速使二者分开。如此，少量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，使用大功率紫外光照射使其固化，即可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靠近的程度，可以调节待加工光纤端面沾取的紫外光固化胶的量，由此改变聚合物法珀腔的厚度（腔长）。实验制备得到三个腔长不同的风速计样品，腔长分别为 17、30 和 48 μm 。图 1(a) 所示为腔长 17 μm 传感探头的显微镜照片，图 1(b) 为结构示意图。

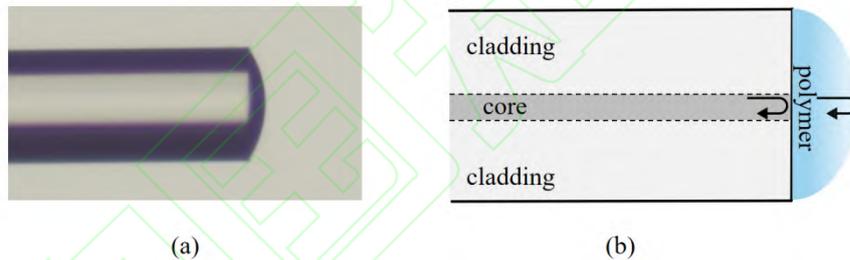


图1 光纤风速计探头。(a) 显微镜照片；(b) 结构示意图；

Fig. 1 Diagram of optical fiber anemometer. (a) micrograph; (b) structure schematic

2.2 传感原理

当光源的光入射到传感探头时，分别在单模光纤与紫外光固化胶的界面、紫外光固化胶与空气的界面发生菲涅尔反射，如图 1(b) 所示。两束反射光之间的相位差可表示为

$$\varphi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \quad (1)$$

式中， n 为聚合物法珀腔的折射率（ ~ 1.524 ）， L 为聚合物法珀腔的腔长， λ 为入射光波长。两束反射光合束后产生干涉，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，呈现干涉相消，表现为干涉光谱的波谷。因此，干涉光谱的第 m 级的波谷的波长 λ_m 可表示为

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

将 λ_m 对温度 T 求导，可求得该风速计对温度的响应，表示为

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

其中， dn/dT 为光热系数， dL/dT 为热膨胀系数。因此，风速计的温度灵敏度取决于这两个系数。

固化后的NOA65对宽带光源的近红外光具有较强的吸收，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，温度变化引起的波长漂移量 $\Delta\lambda_T$ 与风速的关系可表示为^[12]

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

其中， v 为风速， a 、 b 为由宽带光源的输出功率及风速计的结构参数决定的系数。其中，系数 b 为负数，表示波长随风速的指数衰减速率，系数 a 为正数，为风速无限大时的波长漂移量，即最大波长漂移量。

同时，风速测量时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时的受力为 F ，则有^[14]

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

其中， ρ 是流体密度， S 是传感探头的横截面积， ξ 是空气的阻力系数。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 分别是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，风力下引起干涉光谱的波长漂移可表示为

$$\Delta\lambda_F = \lambda_m \left(\frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta L}{L} \right) = \lambda_m (1 - P_e) \frac{\xi \rho}{2E} \cdot v^2 = cv^2 \quad (8)$$

其中，设 $c = \lambda_m (1 - P_e) \xi \rho / 2E$ ， c 的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的波长变化量可表示为

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

上式较完整地描述了本风速计的波长漂移量和风速的关系，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

实验采用如图 2 所示的测试系统，包括可调速风洞（Wind Tunnel）、C+L 波段的宽带光源（BBS）、环行器（Circulator）、光谱分析仪（OSA）以及光纤风速计（Anemometer）。其中，宽带光源的光通过环行器输入到风速计，风速计反射回的光经环行器后输入到光谱仪。

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迎风面过大对风场造成的影响。

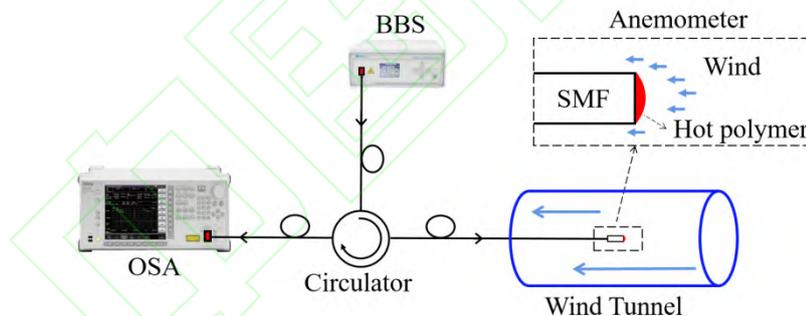


图2 风速测量实验装置

Fig. 2 Experimental setup of airflow velocity measurement

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，我们首先对其进行了温度标定实验。在实验中，我们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热量的影响。然后，将温控箱的温度从 20°C 逐步增加到 65°C，得到风速计在该范围内的干涉光谱，如图 3 所示。可

见，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 所示波长随温度漂移关系，温度灵敏度为 $397.2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ，线性度为 0.996，说明风速计对温度的响应非常灵敏，而且波长与温度成良好的线性关系。

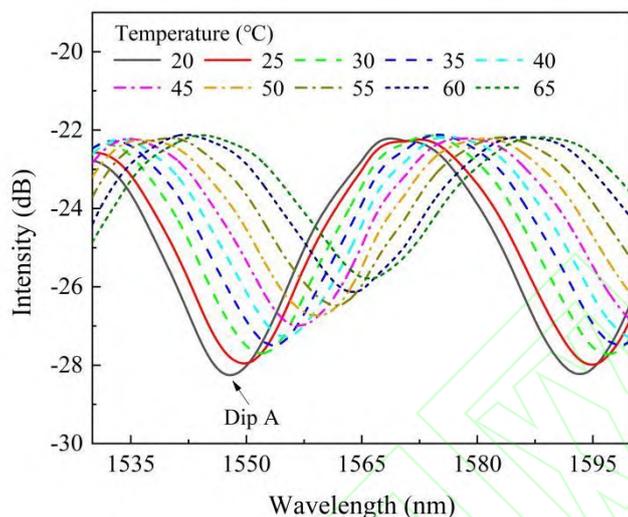


图3 风速计在不同温度下的干涉光谱

Fig. 3 Interference spectra of the anemometer under different temperatures

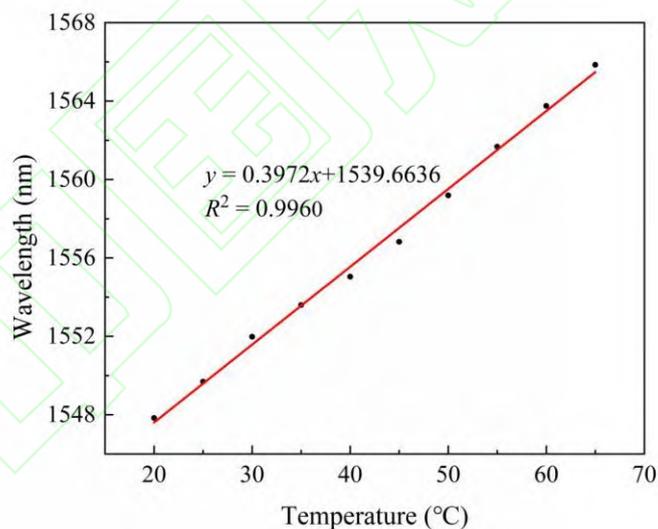


图4 风速计的波长与温度的关系

Fig. 4 Relationship between wavelength and temperature

为了研究光源功率对风速计初始温度的影响，我们在风速为零的情况下调节宽带光源的功率从 5 mW 步进到 100 mW ，并记录下风速计的干涉光谱，结果如图 5 所示。可见，随着光源功率的增大，风速计的干涉光谱的功率水平逐渐增大，波谷波长逐渐红移，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 $164.7 \text{ pm}/\text{mW}$ ，宽

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

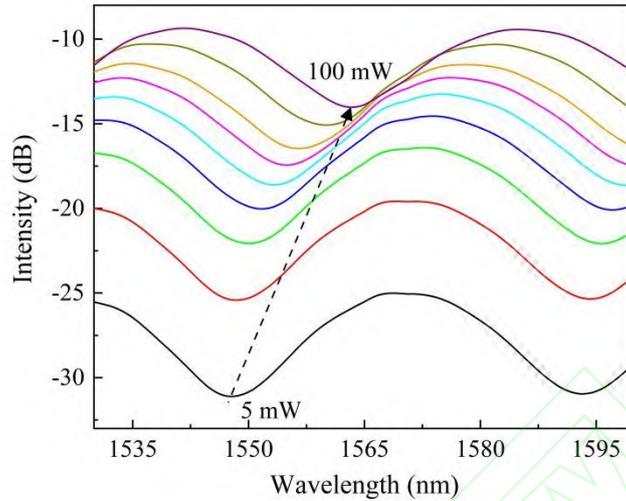


图5 风速计在不同光源功率下的干涉光谱

Fig. 5 Interference spectra of the anemometer at different light source powers

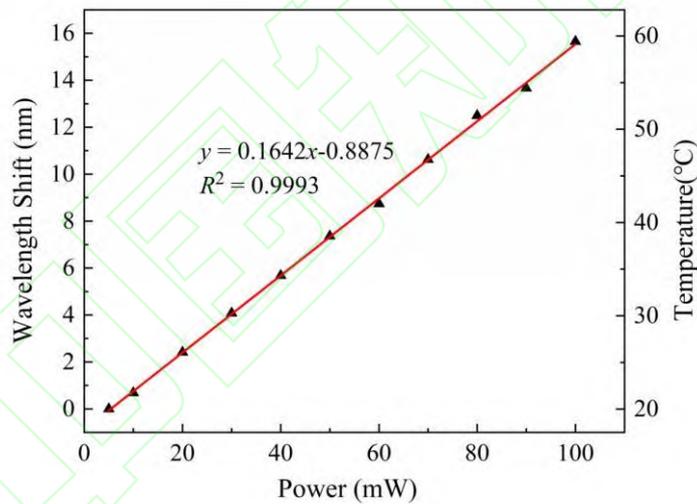


图6 风速计的波长和温度随光源功率的变化

Fig. 6 Wavelength and temperature of the anemometer at different light source powers

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，我们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。

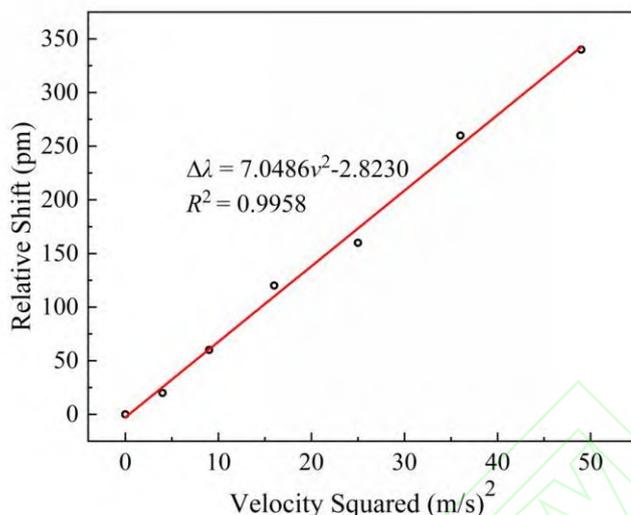


图7 光源功率为5 mW时风速计对风速平方的响应

Fig. 7 Anemometer's response to airflow velocity squared at light source power of 5 mW.

3.3 风速测量实验

在风速测量实验中，我们保持气流温度为 20°C，使风速计正对气流方向放置，调节风洞的风速从 0 m/s 逐步增大，测得不同风速下风速计（腔长为 17 μm）的干涉光谱如图 8 中插图所示。波谷 A 在风速从零开始增加时随风速快速蓝移，随着风速的增加变化变慢并逐渐趋于稳定，在 7 m/s 时其波长漂移量为 -3.42 nm。将其波长数据按照式 (8) 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。

对该拟合公式求导可得，风速计在风速为 0.1m/s 时的灵敏度为 -3.13 nm/(m/s)，随着风速的增加，灵敏度（绝对值）呈现指数衰减，在风速为 1.0 和 2.0 m/s 的分别降至 -0.91 和 -0.29 nm/(m/s)，在风速为 3.5m/s 降至最低值 -0.16 nm/(m/s)。在风速超过 3.5 m/s 后，风速计的灵敏度有小幅回升，且随着风速增加而增加，在 5 和 7m/s 时分别达到 -0.19 和 -0.26 nm/(m/s)。

风速计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，传感探头和气流温度差较大，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，探头和气流温度差减小，风速计的灵敏度逐渐降低，这和牛顿冷却定律相符。而在高风速阶段，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。

相比先前报道的其他热式光纤风速计，本文提出的风速计由于风力作用下的应变效应，在高风速情况下时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，得益于紫外光固化胶较高的热膨胀系数^[13]，本风速计高达-3.13 nm/(m/s)的灵敏度分别约为 Lee 等人提出的同类型风速计的 1.2 倍^[12]、光纤光栅热线式风速计的 3.1-5.3 倍^[7-8]、硅薄片法珀腔风速计的 6 倍^[11]，因此更具应用优势。

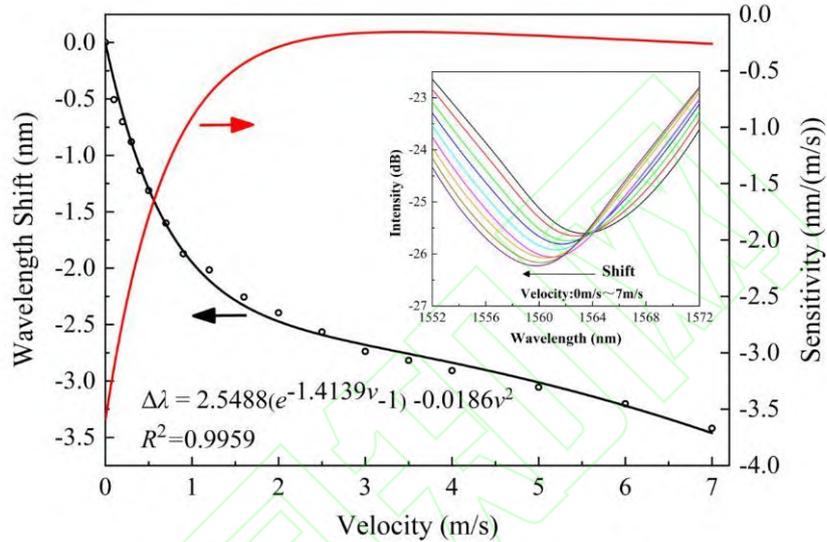


图 8 风速计(腔长 17 μm)波长漂移量和灵敏度随风速的变化。(插图)不同风速下风速计的干涉光谱

Fig. 8 Relationship between the wavelength shift, sensitivity of anemometer(cavity length 17 μm), and velocity. (Inset) interference spectra of the anemometer under different velocity

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。从图中可以看出，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地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。当光源功率为 60、80 和 100 mW 时，风速计在风速为 0.1m/s 时的风速灵敏度分别为-0.90、-1.74 和-3.13 nm/(m/s)。因此，三个拟合公式中的系数 a、b 的绝对值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，发生变性，影响反射光谱。因此，光源功率也不能过高。

在光源功率为 100 mW 情况下，我们还对腔长分别为 17、30 和 48 μm 的三个风速计样品进行了风速测试，实验结果如图 10 所示。三者的波长总体变化趋势一致，但较短的腔体

在相同风速下能获得更高的风速灵敏度。这是由于较短的腔体使得自身散热面面积和体积之间的比值更大，有助于更高效地进行热传递，使热量可以快速散发。但腔长越短，干涉光谱的FSR越大，波谷的带宽越宽，会增大波谷波长的取值误差，所以腔长也不能太短。

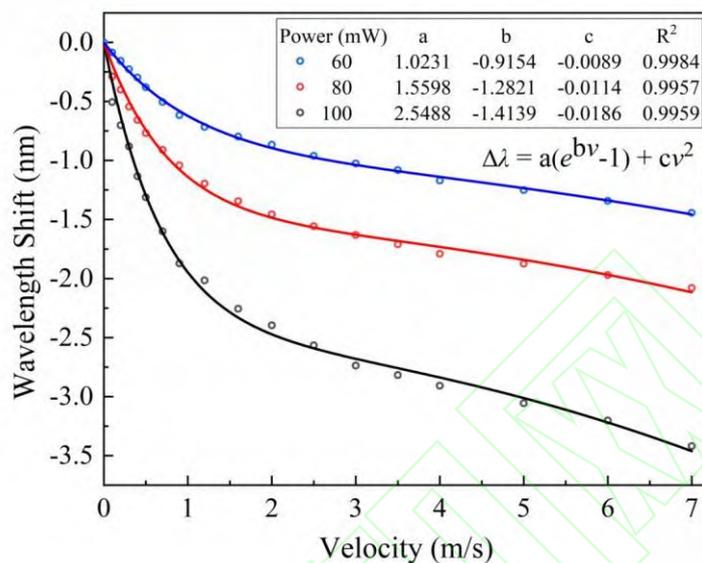


图9 不同光源功率下风速计对风速的响应

Fig. 9 Airflow velocity responses of anemometer with different light source powers

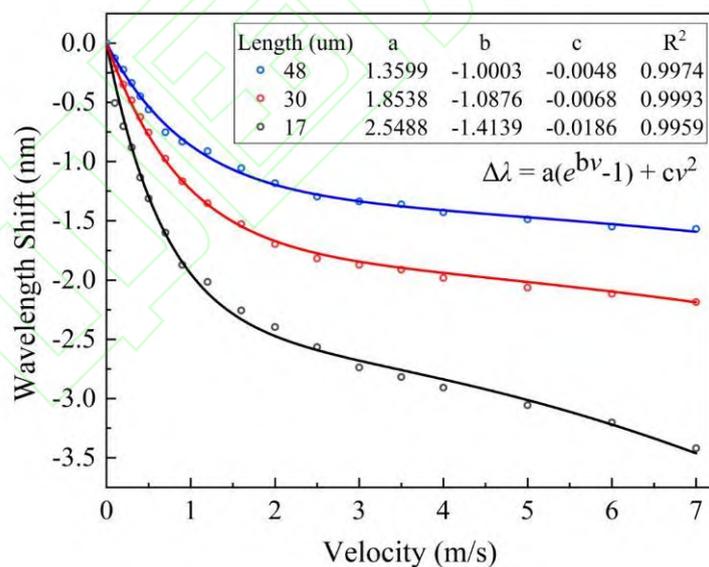


图10 不同腔长的风速计对风速的响应

Fig. 10 Airflow velocity responses of the anemometers with different cavity lengths

在光源功率为 100 mW 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得气流流通和阻断的快门。然后，把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，测试得风速计的动态响应，如图 11 所示。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。

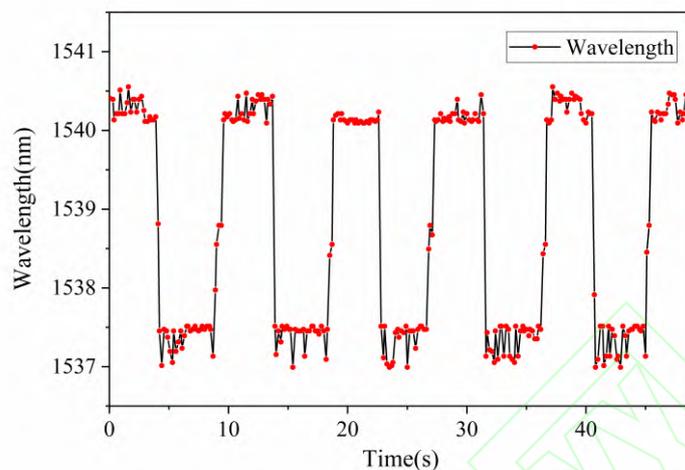


图11 风速计(腔长 $17\ \mu\text{m}$)的动态响应

Fig. 11 Dynamic response of the anemometer(cavity length $17\ \mu\text{m}$)

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型光纤风速计。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作为热式光纤风速计的传感探头，宽带光源的光入射到传感探头时，部分光被吸收转换成热量使法珀腔的温度升高，部分被反射回来携带风速对干涉光谱的调制信息被用于风速测量。在气流下风速计同时受到热量散失和风力应变的作用，其干涉光谱波长漂移。实验中在低风速下可获得高达 $-3.13\ \text{nm}/(\text{m}/\text{s})$ 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、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, Delfino T S, et al. Optical fiber anemometer based on a multi-FBG curvature sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(99): 8727-8732.
- [3] Liu Y, Jing Z, 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] Paulo C, Pedro A.S.J, Gaspar R, 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, Zhou Y, Zhou W, et al. Compact anemometer using silver-coated fiber Bragg grating[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(5): 1381-1386.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Ran G, Danfeng L. 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] Sun B, Wang Y, Qu J, 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.
- [14] Yong Z, Peng W, Lv 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.

网络首发:

标题: 光源加热型高灵敏度光纤热式风速计

作者: 张家瑞, 吕大娟, 董新永, 徐鹏柏, 杨军, 秦玉文

收稿日期: 2021-06-07

录用日期: 2021-08-20

DOI: 10.3788/aos202242.0428001

引用格式:

张家瑞, 吕大娟, 董新永, 徐鹏柏, 杨军, 秦玉文. 光源加热型高灵敏度光纤热式风速计[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0428001.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

基于PIN光电二极管的微型一氧化氮化学发光传感器

李杭 刘文清 姚路

中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

光学学报, 2019, 39(5): 0523001

基于Vernier效应的法布里-珀罗传感器增敏方法

刘燕燕 刘磊 刘雪强 王燕涛 张鑫 王明君 齐跃峰

燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004

光学学报, 2019, 39(4): 0428001

多通道局域表面等离子体共振分析装置构建及实验研究

王顺 张浩 李伟 李世欣 赵建波 郭清乾 王玲 商俊娟 李鑫 胡建东

河南农业大学机电工程学院, 河南 郑州 450002

光学学报, 2019, 39(2): 0228002

超微型全石英光纤Fizeau腔水下激波压力传感器

王俊杰 刘劲 傅正义 褚程雷 杨明红

武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070

光学学报, 2019, 39(2): 0212010

多圆孔周期性银膜阵列结构的光学特性

潘庭婷 曹文 王鸣

南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京 210023

光学学报, 2019, 39(1): 0104001