

基于电弧放电优化的光纤法珀湿度传感器

孙萌萌¹, 葛益娴^{1,2*}, 沈令闻¹, 胡凯¹¹南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044;²大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044

摘要 提出一种基于法布里-珀罗干涉的多模光纤-空气腔-多模光纤-聚乙烯醇(PVA)薄膜结构的湿度传感器,研究了结构中空气腔反射面的曲率对光传播和反射谱的影响,并提出了利用电弧放电增大反射面曲率半径的方法。实验结果表明,所提方法降低了光在纤芯内的干涉损耗,使更多的光参与干涉,并提高了干涉条纹的对比度和精细度。在优化后的多重腔端面涂敷一层厚度为 14 μm 的 PVA 薄膜,在 29.1%~81.8% 环境相对湿度范围内,传感器的平均灵敏度可达 73.24 $\text{pm}/\%$,且具有良好的时间稳定性。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 电弧放电; 优化空气腔; 湿度测量; 法布里-珀罗干涉仪

中图分类号 TN25

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1006002

Optical Fiber Fabry-Perot Humidity Sensor Based on Arc Discharge Optimization

Sun Mengmeng¹, Ge Yixian^{1,2*}, Shen Lingwen¹, Hu Kai¹¹ College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;² Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China

Abstract A humidity sensor with a multimode fiber-air cavity-multimode fiber-polyvinyl alcohol (PVA) film structure based on Fabry-Perot interference is proposed. The influence of the curvature of air cavity reflecting surface on the light propagation and reflection spectrum is studied, and a method to increase the radius of reflecting surface by arc discharge is proposed. The experimental results show that the proposed method reduces the interference loss of light in the fiber core, allows more light to participate in interference, and improves the contrast and fineness of interference fringes. A layer of PVA film with a thickness of 14 μm is coated on the optimized multicavity end surface. The average sensitivity of the sensor can reach 73.24 $\text{pm}/\%$ when the relative humidity of the environment is 29.1%~81.8%, and has good time stability.

Key words fiber optics; fiber optic sensor; arc discharge; optimized air cavity; humidity measurement; Fabry-Perot interferometer

1 引言

相对湿度是重要的环境参数之一,尤其是在气象预报、工业制造和农业发展等领域中,故具有抗电磁辐射、灵敏度高和成本低等优点的光纤湿度传感

器获得了研究者的极大关注^[1-7]。根据光纤湿度传感结构和原理的不同,可将光纤湿度传感器分为光栅型^[8-9]、干涉型^[10-12]和倏逝场型^[13-16]。其中,体积小且制作简单的法珀干涉型传感器被广泛用来检测湿度。在传感器制作过程中,人们通常将湿敏材

收稿日期: 2021-11-10; 修回日期: 2021-12-13; 录用日期: 2021-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(61307061)、江苏高校优势学科 II 期建设工程项目("信息与通信工程" 优势学科)

通信作者: *geyixian820925@163.com

料(半导体、金属氧化物和高分子聚合物等)涂敷在法珀传感器的端面,以改善光纤自身主要成分对湿度敏感性差的问题。Xie 等^[17]利用电子束物理气相沉积(EB-PVD)工艺在多模光纤的端面涂敷 Ti_3O_5 和 SiO_2 ,进而形成非本征法珀腔,在 1.8%~74.7% 湿度范围内,测得灵敏度为 0.43 nm/%,但制作工艺过于复杂。Vaz 等^[18]将一段单模光纤与空心硅管熔接,并利用浸涂法在空心硅管的端面涂敷一层聚偏氟乙烯(PVDF)薄膜,进而构成湿度和温度灵敏度分别为 32.54 pm/%、-15.2 pm/°C 的法珀传感器,相对其他传感器来说,该传感器灵敏度较低,但所使用的特种光纤也增加了制作成本。

本文提出并制作了一种基于电弧放电优化的光纤法珀湿度传感器。利用电弧放电法对两根经过腐蚀后的多模光纤中的空气腔进行了优化,进而获得了曲率半径较大的空气腔反射面。然后,在法珀复合腔端面涂敷湿敏材料,利用其吸水性实现了湿度传感。结果表明:电弧放电法能够有效平滑空气腔中的反射面,提高干涉条纹对比度和精细度;在 29.1%~81.8% 环境相对湿度范围内,传感器的平均灵敏度可达 73.24 pm/%,且具有良好的时间稳定性。所提传感器对气象服务、农业发展、生物医学设备和化学气体净化等领域具有重要意义。

2 传感器的原理分析

光纤法珀湿度传感器的结构如图 1 所示,其中 MMF 为多模光纤。利用浸涂工艺在复合法珀腔的端面涂敷一层湿敏材料(PVA),当外界湿度改变时,湿敏膜快速吸收/释放空气中的水分子,使其含水量与外界环境达到平衡。此时,折射率会改变,引起反射谱波长漂移,进而实现了对相对湿度的测量。根据三光束干涉分析传感原理,当各个反射面均严格平行时,若令这三个面的反射强度分别 I_1 、 I_2 和 I_3 ,则输出光的干涉强度 I_r 和干涉条纹对比度 V 分别为

$$I_r = I_1 + I_2 + I_3 - 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi_1 - 2\sqrt{I_2 I_3} \cos \varphi_2 + 2\sqrt{I_1 I_3} \cos(\varphi_1 + \varphi_2), \quad (1)$$

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2} + 2\sqrt{I_2 I_3}}{I_1 + I_2 + I_3 + 2\sqrt{I_1 I_3}}, \quad (2)$$

式中: φ_1 和 φ_2 是传播相位,其值分别为

$$\varphi_1 = \frac{4\pi n_{\text{air}} L_1}{\lambda}, \quad (3)$$

$$\varphi_2 = \frac{4\pi n_{\text{MMF}} L_2}{\lambda}, \quad (4)$$

式中: n_{air} 和 n_{MMF} 分别为空气腔和多模腔的折射率; λ 为输入光的光波长; L_1 为空气腔长度; L_2 为多模腔长度。

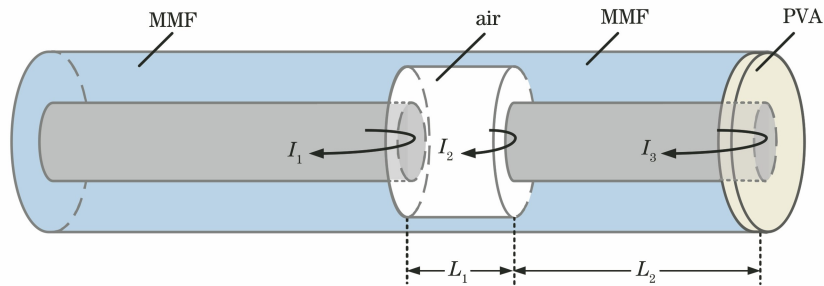


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of sensor

在实验制作中,利用飞秒激光法或化学腐蚀法制作的空气腔均会产生如图 2 所示的两个不平行且具有一定曲率的光学反射凹面,其中 I_1 为入射光强度。当入射光传播到该反射面时,部分光会被折射到包层中传播,降低了在纤芯内参与干涉的光强,同时降低了传感器的反射率 $R_{\text{F-P}}$,使得接收端接收到的实际干涉强度 I'_r 和干涉条纹对比度 V' 小于式(1)、(2)计算得到的值。对具有两个反射凹面的法珀结构而言,当反射面 m_1 的曲率半径 r_1 ^[19] 满足

$$r_1 > \frac{d}{2 \sin \frac{90^\circ - \theta_c}{2}} \quad (5)$$

时,反射面 m_1 的反射率 R_1 才不会因为 r_1 的影响而减小,此时实际反射光强 I'_1 近似于 I_1 。式(5)中 θ_c 为全反射临界角, d 为纤芯直径。入射光经过反射面 m_1 后继续在光纤中传播,入射到反射面 m_2 时再次发生反射或透射,即影响反射面 m_2 的实际反射光强 I'_2 的因素除了曲率半径 r_2 之外,还有曲率半径 r_1 。

为进一步研究空气腔中两个反射面的曲率对光传播的影响,利用有限差分域算法分别对具有 $r_\infty, r_L, r_M, r_S (r_\infty > r_L > r_M > r_S)$ 这四种不同曲率半径的法珀传感器进行数值仿真,对应 x - y 截面的

电场仿真结果如图 3(a)~(d) 所示。为便于分析,将每个传感器中的空气腔设置成对称结构(空气腔中两个反射面的曲率半径相等)。

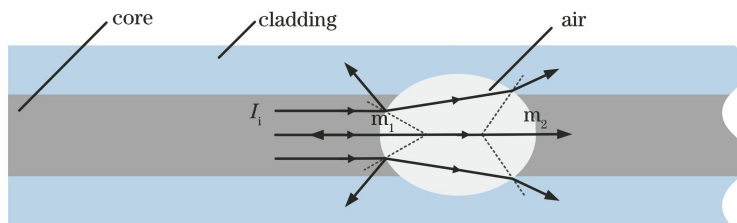


图 2 具有一定曲率的反射面原理图

Fig. 2 Schematic diagram of reflecting surface with certain curvature

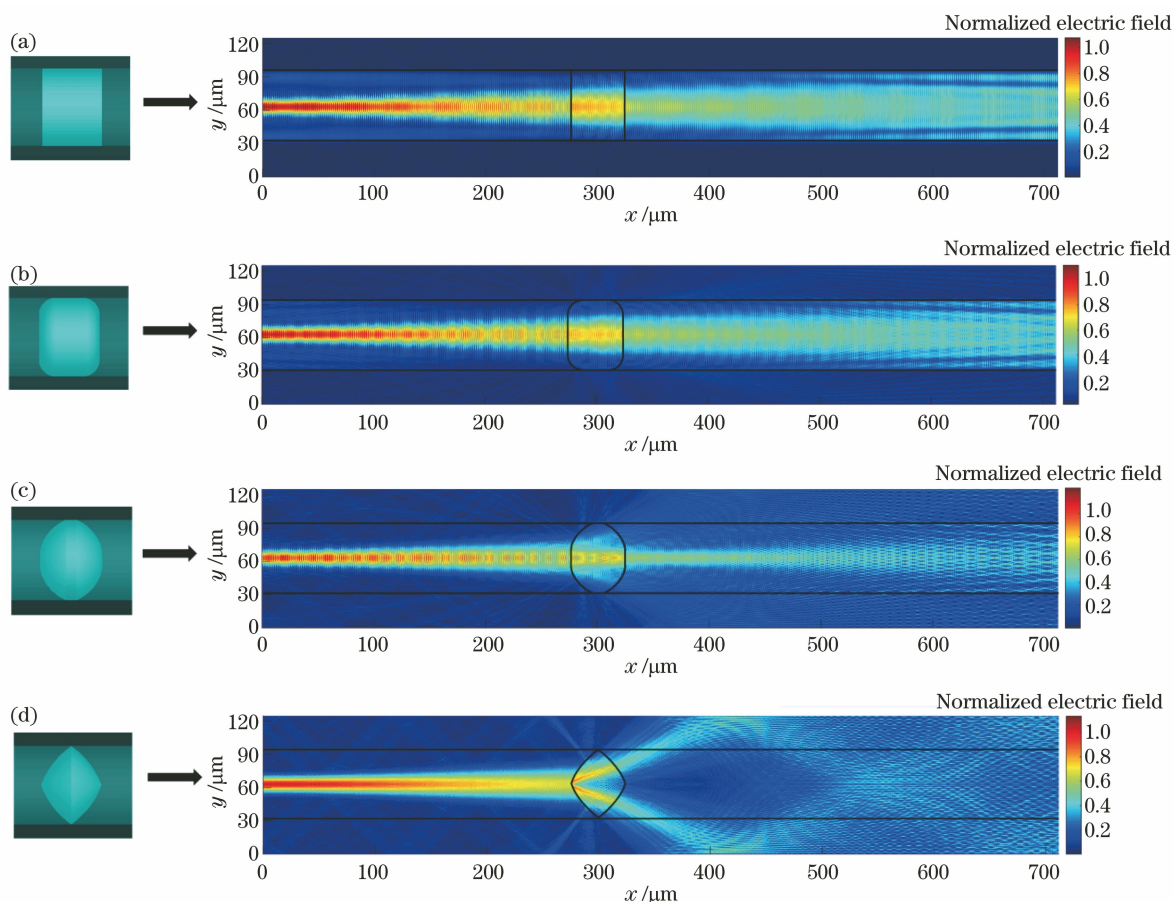


图 3 不同曲率半径的 x - y 截面电场图。(a) r_∞ ; (b) r_L ; (c) r_M ; (d) r_S

Fig. 3 Electric field diagrams of x - y cross sections with different curvature radii. (a) r_∞ ; (b) r_L ; (c) r_M ; (d) r_S

由仿真结果图 3(a) 可知,当曲率半径为 r_∞ (空气腔中的两个反射面严格平行) 时,入射光均被束缚在纤芯中传播,若只考虑曲率半径对光强的影响,则该传感器在纤芯内几乎实现了光的零损耗传输,可得式(1)中理想的干涉光强 I_r 。从图 3(b)~(d) 中发现,随着曲率半径的减小,被透射到包层中传播的光越来越多且在纤芯内参与干涉的光强度在变小,进而导致所对应的反射谱的条纹对比度在不断

降低,如图 4 所示。当曲率半径足够小时,几乎所有的光都被透射到包层甚至泄漏到光纤外传播,此时反射谱中的 I_r 和 V 几乎为 0,增加了传感器后续解调的难度。

由图 2 和图 3 的理论分析可知,曲率半径为 r_∞ 所对应的干涉条纹对比度应当比曲率半径为 r_L 的高,但图 4 中的结果却相反。为研究此现象,截取这两个传感器反射端的 y 面电场图,如图 5(a)、(b)

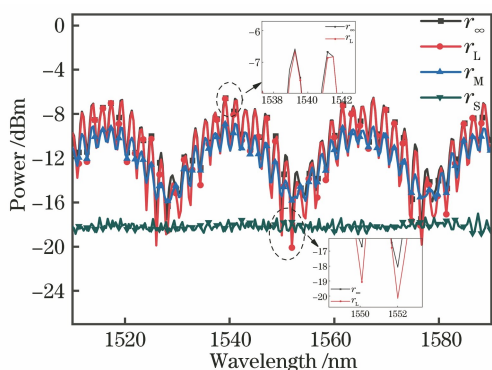


图 4 不同曲率半径的反射谱

Fig. 4 Reflectance spectra with different curvature radii

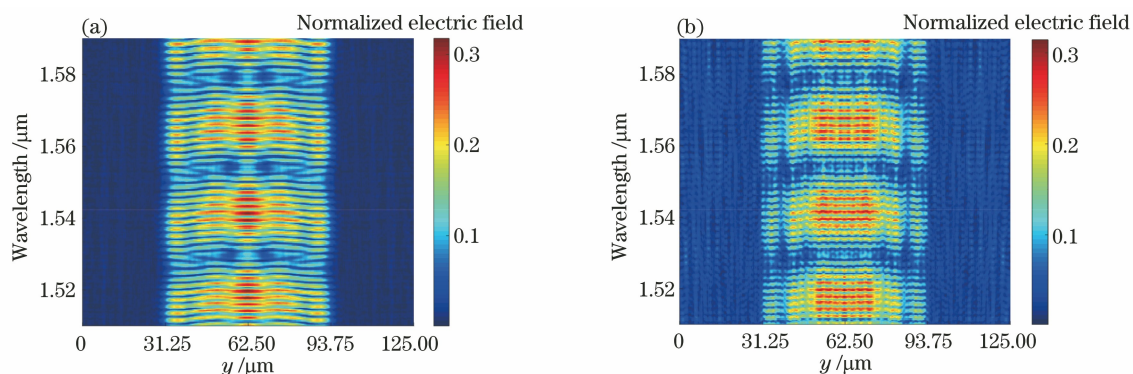


图 5 不同曲率半径的 y 截面电场图。(a) r_{∞} ; (b) r_L

Fig. 5 Electric field diagrams of y cross sections with different curvature radii. (a) r_{∞} ; (b) r_L

3 传感器制作

实验中使用的是长飞公司生产的多模光纤, 纤芯和光纤直径分别为 $62.5 \mu\text{m}$ 和 $125 \mu\text{m}$ 。将两根多模光纤放在浓度(质量分数)为 40% 的氢氟酸溶

液中腐蚀, 可得到带有空气腔的多模光纤, 如图 6 (a) 所示。利用光纤熔接机对两根光纤进行电弧放电, 为确保两根光纤不被推进熔接且被放电优化, 需要控制光纤端面与电极中心的距离。设置第一次的放电参数为预熔时间为 100 ms、放电时间为

因此, 为提高反射谱的干涉条纹对比度, 提出了一种利用电弧放电来平滑空气腔的方法, 使其曲率半径既能满足式(5), 也能够近似图 3(b) 中的反射面弧度, 进而减小曲率对反射光强的影响, 提高 $R_{\text{F.P.}}$ 。

液中腐蚀, 可得到带有空气腔的多模光纤, 如图 6 (a) 所示。利用光纤熔接机对两根光纤进行电弧放电, 为确保两根光纤不被推进熔接且被放电优化, 需要控制光纤端面与电极中心的距离。设置第一次的放电参数为预熔时间为 100 ms、放电时间为

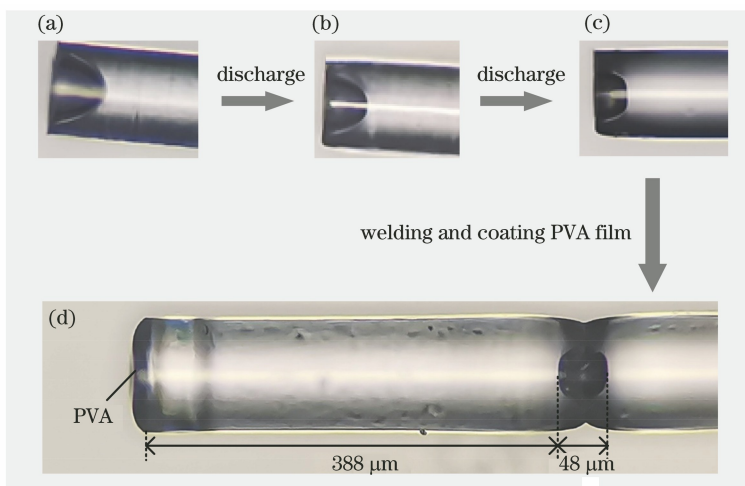


图 6 法珀湿度传感器的制作图。(a) 未放电; (b) 放电 1 次; (c) 放电 2 次; (d) 涂敷 PVA 薄膜的法珀湿度传感器

Fig. 6 Production diagram of Fabry Perot humidity sensor. (a) No discharge; (b) 1 discharge; (c) 2 discharges;

(d) Fabry Perot humidity sensor coated with PVA film

1300 ms, 进而得到图 6(b) 所示的多模光纤。然而, 一次放电后反射面的曲率半径仍然较小, 需要对空气腔再次放电, 设置第二次的放电参数为预熔时间为 130 ms、放电时间为 700 ms, 放电后得到如图 6(c) 所示的反射面平整的空气腔。将放电优化后的两根光纤放在熔接机中熔接, 并用光纤切割刀切出多模腔, 最后用浸涂法在多模腔的端面涂敷一层厚度为 14 μm 的 PVA 薄膜, 构成如图 6(d) 所示的法珀湿度传感器。

虽然光纤熔接机可以利用高温电弧将光纤前端融化, 使光纤前端具有平整空气腔中反射面的作用, 但是会让空气腔塌陷, 使得空气腔的长度和光纤直径变小。因此, 为得到最优的空气腔形状, 应当严格控制放电次数和参数。

4 实验结果与讨论

4.1 优化空气腔前后的传感器特性分析

为对比优化前后反射谱的特性, 实验中还制作了未被电弧放电的传感器, 并将优化前后的传感器(两个传感器均未涂敷 PVA 薄膜)置于空气中测量, 实验结果如图 7 所示。可以看出, 接收到的反射谱是由空气腔引起的低频分量和多模腔引起的高频分量组成, 优化后的曲率半径明显大于优化前, 其对应的条纹干涉对比度高达 26 dB, 是优化前的 2 倍, 条纹精细度也得到了提高, 这是因为优化后的传感器能够提高在纤芯内参与干涉的光强强度, 进而提

高了 R_{F-P} , 而

$$F = \pi \frac{\sqrt{R_{F-P}}}{1 - R_{F-P}}, \quad (6)$$

即条纹的精细度 F 只与 R_{F-P} 有关, 并随 R_{F-P} 的增加而增加。实验结果表明, 电弧放电法能够有效平滑空气腔中的反射面, 提高干涉条纹对比度和精细度, 为后续的波长解调提供良好的基础。

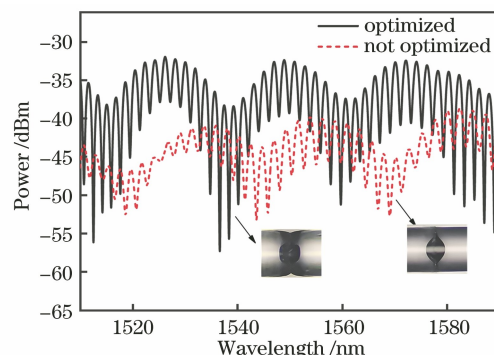


图 7 优化前后的反射谱对比

Fig. 7 Comparison of reflectance spectra before and after optimization

4.2 湿度传感特性分析

湿度测量装置图如图 8 所示, 主要由波长精度为 1 pm 的 SM125 光纤传感分析仪、饱和盐溶液、计算机和传感器组成。为避免温度对传感器的干扰, 在整个湿度测试过程中要保持温度恒定在 28 °C, 将制备好的传感器依次放入具有恒湿的饱和盐溶液容器中, 等待光谱稳定后, 记录不同相对湿度下的反射谱。

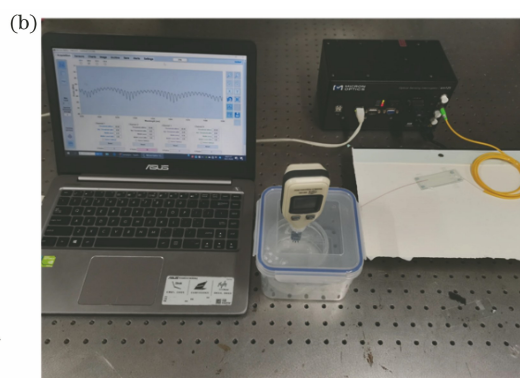
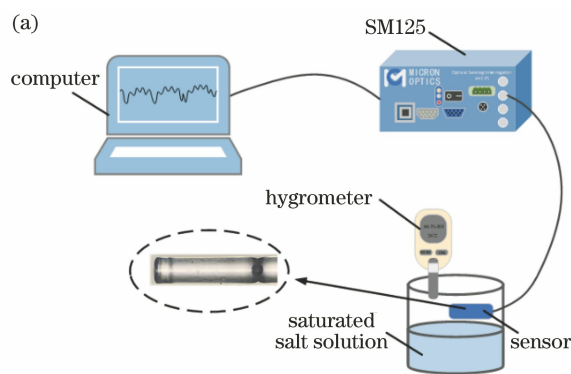


图 8 湿度测量装置图。(a) 示意图; (b) 实物图

Fig. 8 Humidity measuring device diagrams. (a) Schematic diagram; (b) physical diagram

当湿度增加时, 光谱仪记录的反射谱和对应的快速傅里叶变换(FFT)分别如图 9(a)、(b) 所示。随着湿度的增加, PVA 薄膜吸湿后自身的折射率和厚度均会发生改变。空间频率的表达式为

$$f = \frac{n_{F-P} L_{F-P}}{\lambda^2}, \quad (7)$$

式中: n_{F-P} 为法珀腔折射率; L_{F-P} 为法珀腔长度。可知, 空间频率 f 与 λ^2 成反比, 与 n_{F-P} 、 L_{F-P} 成正比。由于该传感器中 PVA 薄膜吸湿膨胀后的腔长远小于多模腔和空气腔的长度, 即腔长的变化忽略不计, 因此法珀腔长度 L_{F-P} 相当于一个固定常量。结合图 9(b) 可知, 当 λ^2 增加时, 主要作用峰 Peak 1 和

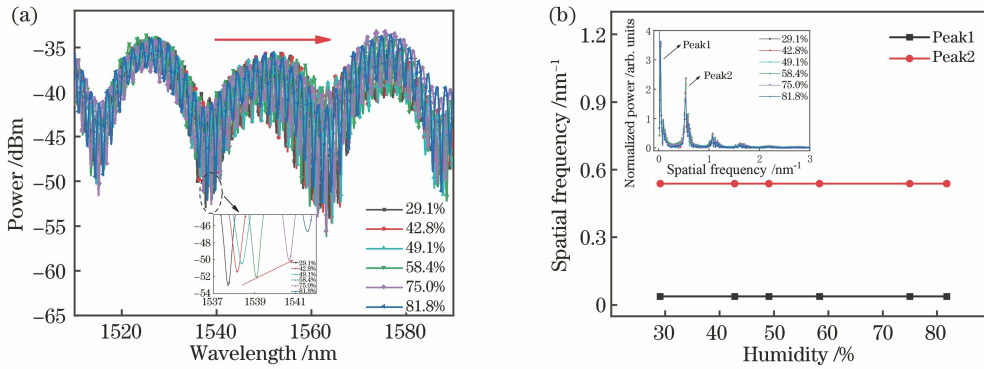


图 9 湿度增加时的反射谱和对应的空间频谱图。(a)反射谱；(b)空间频谱图

Fig. 9 Reflectance spectra and corresponding spatial frequency spectra when humidity increases.

(a) Reflectance spectra; (b) spatial frequency spectra

Peak2 的空间频率固定不变,故 PVA 薄膜的折射率 n_{PVA} 对反射谱的变化起主要作用。

当相位满足干涉相长条件时,光强达到最大值,此时反射谱的一个波峰对应的波长为 λ_m ,即当 $\varphi = 2m\pi$ 时(m 为整数),干涉峰的波长 λ_m 的表达式为

$$\lambda_m = \frac{2n_{F-P}L_{F-P}}{m}, \quad (8)$$

因此,反射光谱的漂移量 $\Delta\lambda_m$ 为

$$\Delta\lambda_m = \left(\frac{\Delta n_{F-P}}{n_{F-P}} + \frac{\Delta L_{F-P}}{L_{F-P}} \right) \lambda_m \approx \left(\frac{\Delta n_{F-P}}{n_{F-P}} \right) \lambda_m, \quad (9)$$

式中: Δn_{F-P} 为法珀腔折射率变化量; ΔL_{F-P} 为法珀腔长度变化量。当湿度增加时,PVA 薄膜快速吸收空气中的水分子使其含水量与外界环境达到平衡,其折射率 n_{PVA} 也会随之降低,从而引起反射谱波长的变化,出现如图 9(a)所示的红移。

为进一步分析湿度传感器的灵敏度,选取条纹精细度较高的 1537~1542 nm 波长范围内升湿和降湿的反射谱进行数据拟合,得到相对湿度和波长之间的关系图,如图 10 所示。在 1510~1590 nm 输出波长范围内,波长 λ 随着环境湿度 M_{RH} 的增加/降低而指数增加/减小,升湿(λ_1)和降湿(λ_2)的指数拟合方程为

$$\lambda_1 = 0.31734 \exp\left(\frac{M_{RH}}{30.24051}\right) + 1536.86395, \quad (10)$$

$$\lambda_2 = 0.0798 \exp\left(\frac{M_{RH}}{20.71034}\right) + 1537.27205. \quad (11)$$

由于 PVA 薄膜吸湿和降湿能力的不同,故两条拟合曲线有一定的差异,但两者的拟合程度 R^2 都非常高,均达到 0.999 以上。通过计算得出湿度增加时反射谱共红移 3.86 nm,平均灵敏度达 73.24 pm/%。

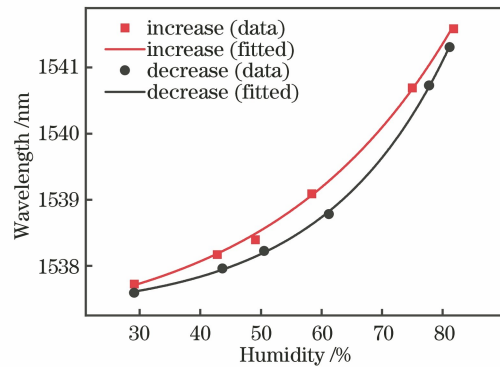


图 10 升湿和降湿的曲线拟合图

Fig. 10 Curve fitting diagrams of increasing and decreasing humidity

传感器稳定性是指传感器使用一段时间后,其性能保持不变的能力,分析了传感器对湿度响应的稳定性。将传感器放置于恒温恒湿(29.1%、28℃)的密封箱内,每隔 5 min 观察传感器的反射谱与时间的变化关系,结果如图 11 所示。在 35 min 内反射谱的波长仅有 0.005 nm 的波动,标准误差仅为 0.25%,优于文献[20]报道的基于涂敷

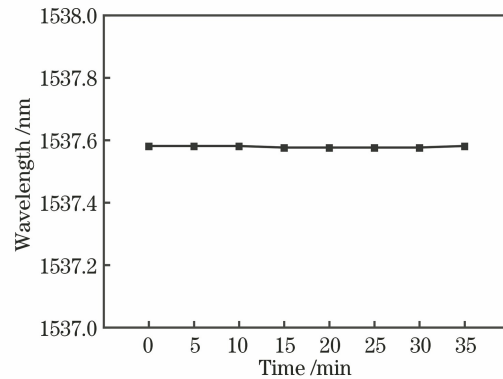


图 11 在湿度为 29.1%下的波长稳定性

Fig. 11 Wavelength stability at humidity of 29.1%

湿敏膜的湿度传感器(0.49%),具有较好的时间稳定性。

5 结 论

制作了一种基于电弧放电优化的光纤法珀湿度传感器,并提出了利用光纤熔接机中的高温电弧来优化法珀空气腔的方法,该方法大幅度提高了反射谱的干涉对比度和条纹精细度,使得波长锁定更加准确,更有利于波长解调。在保持温度不变的情况下对制作的湿度传感器进行了湿度测量,结果表明,在 29.1%~81.8%湿度范围内,反射谱实现了 3.86 nm 的红移,平均灵敏度达 73.24 pm/%。同时,分析了该传感器的时间稳定性。计算得出相对湿度标准误差仅为 0.25%。与其他湿度传感器相比,所设计的传感器具有制作简单、成本低、灵敏度高和时间稳定性好等优点,具有一定的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Zhang E Z, Lu D Q, Zhang S, et al. High-sensitivity fiber-optic humidity sensor based on microfiber overlaid with niobium disulfide [J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(35): 16576-16587.
- [2] 邵敏, 孙浩男, 张蓉, 等. 基于光子晶体光纤的迈克耳孙干涉仪型湿度传感器[J]. *光学学报*, 2020, 40(24): 2406002.
Shao M, Sun H N, Zhang R, et al. Michelson interferometric humidity sensor based on photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(24): 2406002.
- [3] Li J Z, Zhang J Q, Sun H, et al. An optical fiber relative humidity sensor based on hollow-core fiber and hydroxypropyl methylcellulose hydrogel film[J]. *Optik*, 2019, 195: 163172.
- [4] Wang P P, Ni K, Wang B W, et al. Methylcellulose coated humidity sensor based on Michelson interferometer with thin-core fiber[J]. *Sensors and Actuators A*, 2019, 288: 75-78.
- [5] 邓理, 张建奇, 孙浩, 等. 基于静电纺丝纳米纤维膜的光纤温湿度传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 0906006.
Deng L, Zhang J Q, Sun H, et al. Optical fiber temperature and humidity sensor based on film prepared by electrospinning nanofibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 0906006.
- [6] Wang Y Q, Shen C Y, Lou W M, et al. Fiber optic humidity sensor based on the graphene oxide/PVA composite film [J]. *Optics Communications*, 2016, 372: 229-234.
- [7] 张平, 刘彬, 刘正达, 等. 基于氧化石墨烯涂层的侧抛光光纤马赫-曾德尔干涉仪温湿度传感器[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0306003.
Zhang P, Liu B, Liu Z D, et al. Temperature and humidity sensor based on a graphene oxide-coated side-polished fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0306003.
- [8] Liang L, Sun H, Liu N, et al. High-sensitivity optical fiber relative humidity probe with temperature calibration ability[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(4): 872-876.
- [9] Chiu Y D, Wu C W, Chiang C C. Tilted fiber Bragg grating sensor with graphene oxide coating for humidity sensing[J]. *Sensors*, 2017, 17(9): 2129.
- [10] Sun L P, Li J, Jin L, et al. High-birefringence microfiber Sagnac interferometer based humidity sensor[J]. *Sensors and Actuators B*, 2016, 231: 696-700.
- [11] 姚军, 朱涛, 邓明, 等. 基于大偏置熔接的全光纤法布里珀罗湿度传感器[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s114004.
Yao J, Zhu T, Deng M, et al. A humidity sensor based on all-fiber Fabry-Perot interferometer formed by large offset splicing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(s1): s114004.
- [12] Li C, Yu X Y, Zhou W, et al. Ultrafast miniature fiber-tip Fabry-Perot humidity sensor with thin graphene oxide diaphragm[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4719-4722.
- [13] 肖毅, 张军, 蔡祥, 等. 基于石墨烯的光纤湿度传感研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0406005.
Xiao Y, Zhang J, Cai X, et al. Fiber-optic humidity sensing based on graphene [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0406005.
- [14] 毕卫红, 朱长青, 付兴虎, 等. 基于聚乙烯醇-铝薄膜的光纤温湿度传感器研究[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(8): 1443-1448.
Bi W H, Zhu C Q, Fu X H, et al. Optical fiber temperature and humidity sensor based on polyvinyl alcohol-aluminum film [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(8): 1443-1448.
- [15] Shao M, Zang Y X, Qiao X G, et al. Humidity sensor based on hybrid fiber Bragg grating/abrupt fiber taper [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(5): 1302-1305.
- [16] Hu Y J, Ghaffar A, Hou Y L, et al. A micro structure POF relative humidity sensor modified with agarose based on surface plasmon resonance and evanescent wave loss [J]. *Photonic Sensors*, 2021, 11(4): 392-401.
- [17] Xie W J, Yang M H, Cheng Y, et al. Optical fiber

- relative-humidity sensor with evaporated dielectric coatings on fiber end-face [J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(4): 314-319.
- [18] Vaz A, Barroca N, Ribeiro M, et al. Optical fiber humidity sensor based on polyvinylidene fluoride Fabry-Perot [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(7): 549-552.
- [19] Gong Y, Rao Y J, Guo Y, et al. Temperature-insensitive micro Fabry-Pérot strain sensor fabricated by chemically etching Er-doped fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(22): 1725-1727.
- [20] Sun H N, Shao M, Han L, et al. Large core-offset based in-fiber Michelson interferometer for humidity sensing [J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 55: 102153.