

doi:10.3788/gzxb20174604.0406003

基于腐蚀光纤的温度及葡萄糖溶液浓度传感器

马健, 郑羽, 余海湖

(武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070)

摘 要:提出并制备了一种基于本征倏逝波原理的温度及葡萄糖溶液浓度传感器. 通过研究腐蚀包层厚度与透射光谱之间的关系, 确定较为合适的腐蚀厚度. 将标准单模光纤包层腐蚀至 $2.4 \mu\text{m}$, 利用光纤倏逝波对外界介质变化敏感的原理, 通过测量输出光功率的变化量实现温度及葡萄糖溶液浓度传感. 实验结果表明: 传感器在 $10\sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内具有 $9.58\times 10^{-3}\text{ dBm}/^\circ\text{C}$ 的灵敏度, 线性度达到 99.36% ; 在葡萄糖溶液 $0\sim 3\%$ 的浓度范围内具有 $0.126\text{ dBm}/(\text{g/L})$ 的灵敏度, 线性度达到 97.95% . 该传感器的响应时间小于 30 s , 具有操作简便、测量准确度高、重复性好、适用范围广等优点, 具备良好的应用价值.

关键词: 光纤传感器; 倏逝波; 腐蚀光纤; 温度; 葡萄糖浓度

中图分类号: TP212.14

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)04-0406003-8

A Temperature and Glucose Solution Concentration Sensor Based on Etched Optical Fiber

MA Jian, ZHENG Yu, YU Hai-hu

(National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A temperature and glucose solution concentration sensor based on intrinsic evanescent wave was proposed and fabricated. By studying on the relationship between the thickness of etched fiber coating and the output spectrum, the suitable etching thickness was determined. The cladding of a standard single-mode optical fiber was etched to $2.4 \mu\text{m}$, and the temperature and glucose solution concentration sensing were realized by measuring the variation of output optical power, because optical fiber evanescent wave is extremely sensitive to the change of external medium. The experimental results show that the sensor has temperature sensitivity of $9.58\times 10^{-3}\text{ dBm}/^\circ\text{C}$ at the range of $10\sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ with linearity as high as 99.36% and glucose solution concentration sensitivity of $0.126\text{ dBm}/(\text{g/L})$ at the concentration range of $0\sim 3\%$ with linearity of 97.95% . The response time of the sensor is less than 30 s . The sensor has advantages of simple operation, high accuracy, good reproducibility and wide application range, thus has potential application value.

Key words: Fiber optic sensor; Evanescent wave; Etched fiber; Temperature; Glucose concentration

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 120.6780; 040.1880

0 引言

光纤倏逝波传感器由于具有结构简单、容易制备、抗电磁干扰强、应用面广等特点^[1], 受到研究人员的广泛关注. 利用倏逝波对外界环境折射率及吸光度变化敏感的特性可以实现各种参量的检测, 如温湿度^[2-3]、磁场^[4]、pH 值^[5-6]、液体或气体浓度^[7-12]等. Aneesh 等^[2]曾制备一种在纤芯表面镀 ZnO 纳米溶胶薄膜的湿度传

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61290311)和湖北省自然科学基金重点项目(No. 2015AAA001)资助

第一作者: 马健(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感. Email: jeromema@foxmail.com

导师(通讯作者): 余海湖(1963-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为特种光纤及传感器. Email: hhyu@whut.edu.cn

收稿日期: 2016-11-24; 录用日期: 2017-01-16

<http://www.photon.ac.cn>

感器,实现 5%~95% 范围内湿度(RH)的测量,灵敏度为 0.0103% RH. Henning 等^[5]通过检测一种具有 pH 依赖性的多孔聚合荧光衍生物的发光寿命实现倏逝波 pH 传感,分辨率可达 0.02 pH 单位. Gravina 等^[7]将全氟塑料包层光纤拉锥,利用拉锥区域的倏逝场实现亚甲基蓝水溶液的浓度检测. Schultz 等^[8]在纤芯表面镀 La 掺杂 SrTiO₃ 膜,该膜对氢气有敏感性,能够在 600~800 °C 的燃料气流中快速检测出氢气含量. Xiong 等^[9]也曾提出一种测量亚硝酸盐浓度的光纤倏逝波传感器,其原理基于微结构光纤内部孔道中含氮染料对倏逝波激发的荧光的吸收作用. 光纤倏逝波传感器目前已经发展有直形、锥形、D 形、S 形、U 形等多种结构^[1],能够适应不同环境下的需求,在诸多领域具有良好的应用前景.

准确检测温度在日常生活和工业生产中具有重要意义,而葡萄糖溶液作为一种常用的生物化学试剂,对其浓度的检测也具有一定的实际应用价值. 本文设计并制备了一种基于腐蚀光纤倏逝波的温度及葡萄糖溶液浓度传感器. 通过研究腐蚀后光纤包层厚度与透射光谱之间的对应关系,确定较为合适的腐蚀厚度. 采用放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)激光器作为稳定检测光源,将光源耦合入局部包层腐蚀的标准单模光纤中,利用腐蚀区域处纤芯泄露的倏逝波与物质相互作用,根据光纤输出光功率的变化分别获取温度及葡萄糖溶液浓度的信息.

1 基本原理

根据波动光学原理,当光波由纤芯入射到纤芯-包层界面时,入射光和反射光相互作用在界面上形成驻波. 驻波的场强无法突然变化为零,导致一部分光波透射入包层中,即倏逝波. 倏逝波透射入包层波长量级的深度,并沿界面传输波长量级的距离后再返回纤芯.

当将光纤包层腐蚀到距离纤芯微米量级时,倏逝波已不能完全限制于光纤中,部分倏逝波可以与包层以外的介质发生相互作用而泄露,导致光纤末端透射光功率减弱. 根据光纤本征吸收损耗,经过长为 L 的作用区后,透射光功率 P_o 和入射光功率 P_i 之间的关系^[13]为

$$P_o = P_i \exp(-\gamma L) = P_i \exp(-NTL) \quad (1)$$

式中, γ 为介质的有效倏逝波吸收系数, $\gamma = NT$, N 为单位长度的反射次数, T 为非涅尔透射系数.

根据图 1,当纤芯直径为 D 时可得

$$N = \frac{1}{D \tan \theta} \quad (2)$$

而非涅尔透射系数 T 为

$$T = \frac{\alpha \lambda n_{ex} \cos \theta}{\pi (n_{co}^2 - n_{ex}^2) \sqrt{\sin^2 \theta - \frac{n_{ex}^2}{n_{co}^2}}} \quad (3)$$

式中, α 为介质的吸收系数, $\alpha = \epsilon C$, ϵ 为介质的摩尔

吸收系数, C 为介质浓度; λ 为入射光波长; θ 为入射光与法线夹角; n_{co}^2 和 n_{ex}^2 和分别为纤芯和介质折射率.

将式(2)、(3)带入式(1)可得^[13]

$$P_o = P_i \exp\left(-\frac{\epsilon C L \lambda n_{ex} \cos^2 \theta}{D \pi (n_{co}^2 - n_{ex}^2) \sin \theta \sqrt{\sin^2 \theta - \frac{n_{ex}^2}{n_{co}^2}}}\right) \quad (4)$$

从式(4)中可以看出,在传感器的结构和入射波长确定的情况下,透射光功率仅与介质的吸收系数及折射率有关. 基于这一原理,当外界环境变化(如温度、磁场)或直接改变包层以外的介质特性(如浓度)时,介质的吸收系数、折射率等光学特性将发生变化,泄露出去的倏逝波能量也会随之改变,可以通过建立光纤透射光功率量与环境参量或介质特性之间的关系而达到不同方面的传感目的.

2 实验与讨论

2.1 化学试剂及实验仪器

化学试剂包括氢氟酸(分析纯,国药集团)、葡萄糖(分析纯,国药集团)、去离子水(实验室自制). 实验仪器包括 ASE 光源(A20120003,武汉欧迪,波长范围 1 520~1 570 nm)、光谱仪(AQ6370B,日本横河)、高

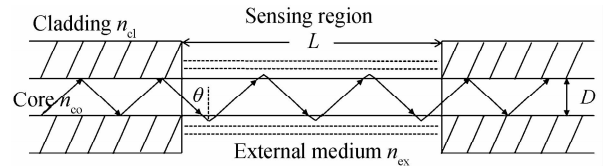


图 1 本征倏逝波光纤传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of intrinsic evanescent wave optical fiber sensor

低温变湿热试验箱(重庆四达)、超声波清洗器、电子天平等. ASE光源的供给电源为220V标准电压,供给电源稳定. 在实验室进行连续 48 h 光源稳定性测试,结果如图 2. 可以看出,即使实验室并非恒温条件,光源总体稳定性仍然良好,除 1 527.5~1 532.5 nm 和 1 543~1 548 nm 区间波动稍大,约为±0.03 dBm 外,其余区间的强度波动均在±0.01 dBm 范围内,可以满足传感实验要求.

葡萄糖溶液的配制过程为:分别称取 0、0.2、0.4……5 g 葡萄糖粉体置于数个烧杯中,分别加去离子水至总质量为 100 g,配置质量分数为 0、0.2%、0.4%……5%的葡萄糖溶液,随后在超声波清洗器中震荡 20 min 使溶液混合均匀.

2.2 光纤腐蚀过程

光纤包层腐蚀的深度和长度均会对倏逝波传感的性能有所影响. 理论上,当包层腐蚀得越靠近纤芯,即包层越薄,倏逝波与外界介质作用越充分,倏逝波传感的灵敏度越高. 但在实验中发现,包层越薄,倏逝波向外界泄露得越多,透射光功率越弱,这会导致传感检测的误差增大,同时氢氟酸腐蚀的细微不均匀性导致表面不光滑,随机光散射随包层变薄而急剧增多,外界环境的微小扰动都会导致透射光谱的微弱变化,透射光谱难以稳定,检测难度增大、准确度下降. 腐蚀长度也有相似的影响,腐蚀区间越长,传感的灵敏度越高,但透射功率大幅降低,同时外界介质的微小不均匀性(如温度传导、介质扩散)也会对透射光谱造成影响,增大误差. 因此,并不是单纯的包层越薄、腐蚀区间越长,倏逝波传感性能就越好,而是应将两者统筹考虑,腐蚀深度和长度需满足透射光谱稳定、灵敏度较高、测量准确的原则.

在全长 1 m 的标准单模光纤(外径 125 μm/芯径 9 μm)中选取 3 cm 长的一段作为待腐蚀段,将该段光纤剥除涂覆层,其余部分不剥除,然后将待腐蚀段浸泡于 10% 体积浓度的氢氟酸溶液中. 由于氢氟酸溶液对

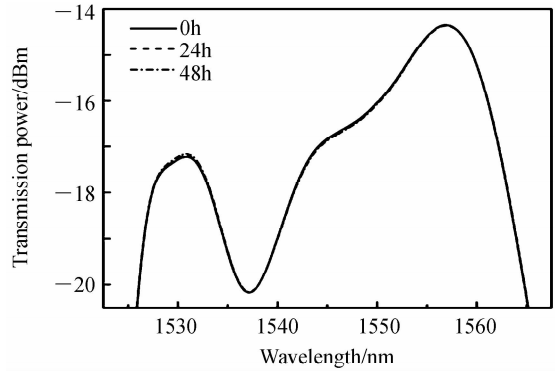
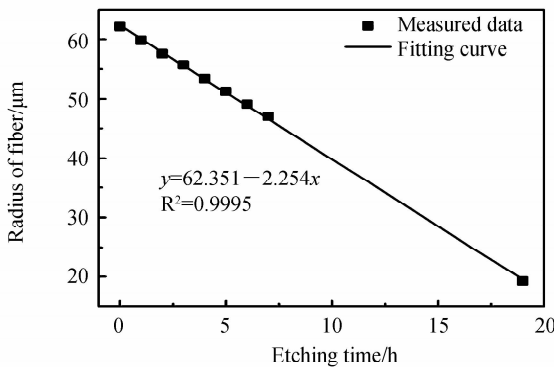
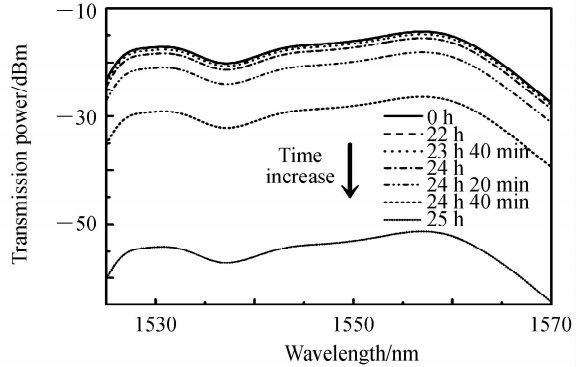


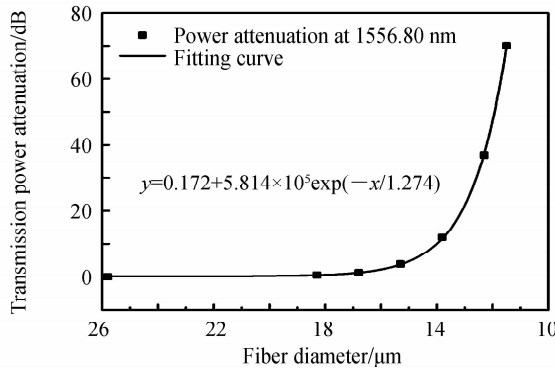
图 2 ASE 光源发射光谱
Fig. 2 Emission spectrum of ASE light source



(a) Changes of fiber radius with etching time



(b) Changes of transmission spectrum with etching time



(c) Attenuation of transmission power at 1556.80 nm with fiber diameter

图 3 光纤腐蚀过程

Fig. 3 Etching process of the optical fiber

光纤的包层有强烈的腐蚀作用,而对光纤的有机涂覆层没有腐蚀作用,所以 3 cm 长剥除涂覆层的部分其包层将会被腐蚀变细,其余部分则受涂覆层的保护,包层不会被腐蚀. 10% 体积浓度的氢氟酸溶液对光纤包层的腐蚀速率近似为常数,平均腐蚀速率约为 $2.254 \mu\text{m}/\text{min}$,如图 3(a),腐蚀速度适中,易于控制腐蚀厚度. 图 3(b)所示为氢氟酸腐蚀不同时间下光源的透射光谱. 腐蚀 22 h 后,透射光谱开始出现变化,说明少量倏逝波开始泄露,但此时泄露速率增长十分缓慢. 23 h 40 min,泄露速率开始明显增加,近似呈指数增加,且泄露量越多透射光谱波动越大、稳定性越差. 25 h 10 min 后光谱仪已无法检测到透射光. 通过腐蚀时间计算出光纤直径与透射功率衰减的关系,如图 3(c). 当光纤直径小于 $\sim 25.8 \mu\text{m}$ 后,透射功率出现波动,小于 $\sim 15.5 \mu\text{m}$ 后透射功率加速衰减,同样近似呈指数变化. 当光纤直径小于 $\sim 11.5 \mu\text{m}$ 后透射功率衰减超过 70 dB,即光谱仪接收到的光功率不及光源功率的 $1/10^7$,此时透射光谱极不稳定,无法用于实际测量.

基于以上试验结果,将传感实验中所使用的光纤包层腐蚀至仅有 $2.4 \mu\text{m}$ 厚,腐蚀前后包层厚度对比如图 4. 此时透射功率较光源功率下降了约 12 dB 左右,即约 6% 的能量最终到达光谱仪,其余约 94% 的能量以倏逝波的形式与外界介质作用而被吸收,这在保证倏逝波与外界介质的充分作用的同时避免了透射光谱能量微弱、难以稳定的问题. 若包层进一步腐蚀变薄,虽然灵敏度会有所提高,但准确性和稳定性会有所降低,因此选择了这一适中的包层厚度.

2.3 温度传感实验

温度传感实验装置如图 5. 将 3 cm 长的腐蚀段全部浸泡于 100 mL 去离子水中,再放置在高低温变湿热试验箱中,腐蚀光纤的两端分别连接 ASE 光源与光谱仪.

当温度变化时水的折射率会随之变化,在一定范围内其折射率 n_t 可近似为^[14]

$$n_t = n_{20} - \alpha_w(t - 20) \quad (5)$$

式中, α_w 为水的折射率温度系数(热光系数), $\alpha_w = 1.37 \times 10^{-4}$; n_{20} 为 20 °C 时水的折射率, $n_{20} = 1.33$; t 为当前温度. 而水的吸收系数则随温度上升而下降.

图 6 为温度由 10 °C 变化至 70 °C 时,在 1 525~1 565 nm 范围内整体透射功率变化情况. 在 1 531.80 nm、1 556.80 nm 处分别存在有透射峰,在 1 537.10 nm 处存在透射谷. 透射峰或透射谷处的透射光功率变化较其他地方更显著,利用透射峰或透射谷能够更好地建立温度与透射光功率的关系. 当温度上升时,透射峰、谷的位置均没有发生变化,但透射功率逐渐增强. 这是由于温度上升时,液体热胀冷缩的效应使得水分子的密度迅速减小,水的吸收系数下降明显,而折射率的变化缓慢,仅有微弱下降,故吸收系数的变化起主导作用. 吸收系数下降导致透射光强增加,而折射率下降导致纤芯-包层界面的反射损耗增加、透射光强减弱,两者共同作用仍导致透射强度增加. 值得注意的是,三处的温度响应各不相同,当温度由 10 °C 变化至 70 °C 时,1 531.80 nm 处透射功率增幅最大,1 537.10 nm 处次之,1 556.80 nm 处最小. 这一现象可用本征倏逝波传感器的原理解释,将式(4)改写可得

$$\frac{P_o}{P_i} = \exp(-\epsilon C \lambda s) \quad (6)$$

式中, λ 为波长, s 为与腐蚀光纤结构相关的参数,当腐蚀光纤结构确定后 s 为定值. 当温度升高时,水分子的密度减小,可以看作水的浓度 C 减小. 水在 1450 nm 左右存在吸收峰值,两侧逐渐衰减,1 531.80、1537.10 和 1 556.80 nm 处的单位吸收系数分别为 1381 m^{-1} 、 1293 m^{-1} 和 1033 m^{-1} ^[15]. 由于三个波长处的摩尔吸收系数 ϵ 各不相同,当水分子的密度减小时,1531.80 nm 处吸收系数 $a = \epsilon C$ 下降最多,在 λs 不变的情况下,

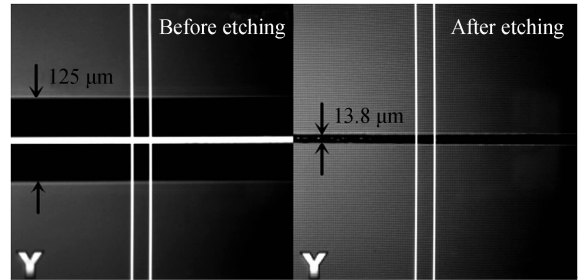


图 4 腐蚀光纤包层厚度

Fig. 4 Thickness of cladding of the etched fiber

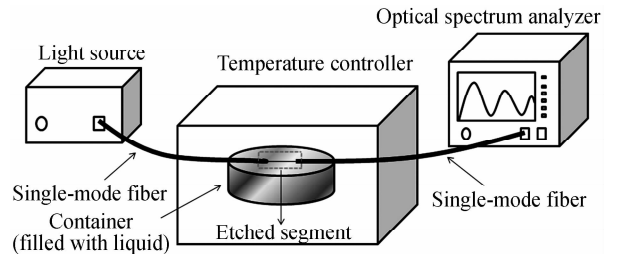


图 5 温度传感实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of temperature sensing experiment device

P_o/P_i 上升最多,1 537.10 nm 处次之,1 556.80 nm 处吸收系数 a 下降最少, P_o/P_i 上升也最少. 故光谱不同波段的温度响应是不同的,与介质在不同波段的吸收系数变化密切相关. 虽然温度灵敏度没有 1 531.80 nm 和 1 537.10 nm 处高,但相较于前两者,1 556.80 nm 处透射光功率随温度变化均匀,一致性更好. 这是由于光源本身在 1 531.80 nm 处的波动略大,导致温度响应不均匀,而在 1 537.10 nm 处透射功率小于 -30 dBm,测量准确性和稳定性稍逊于 1 556.80 nm 处,故选取 1 556.80 nm 处的透射光功率作为温度变化的对应量,建立温度传感体系.

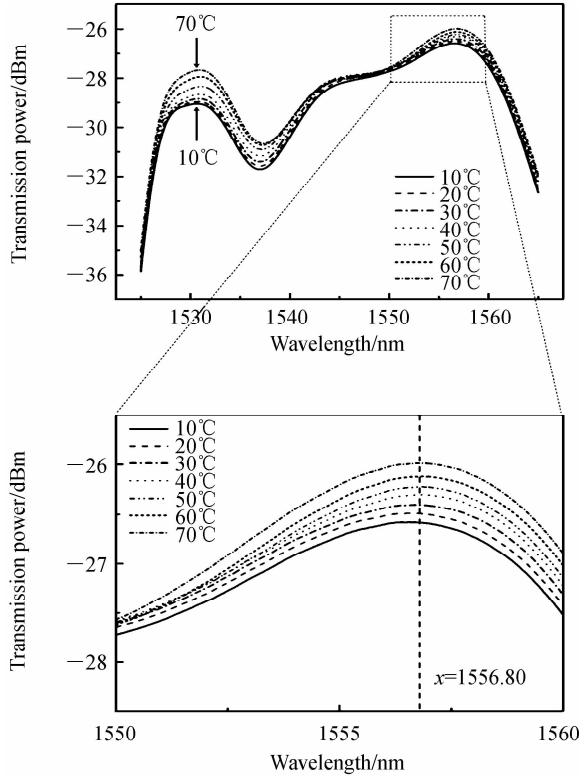


图6 透射光功率随温度变化曲线

Fig. 6 Changes of transmission power with temperature

从图 7 中可以看出,当升温时,在 10~70 °C 温度范围内,1 556.80 nm 处透射功率随温度升高显著增加,由 -26.577 dBm 增加到 -25.989 dBm,其透射功率与温度的关系可表示为

$$y = -26.683 + 0.00958x \tag{7}$$

其灵敏度为 9.58×10^{-3} dBm/°C,线性度非常好,达到 99.36%. 若光谱仪的最小分辨率为 0.001 dBm,则该温度传感器的分辨率可以达到 0.1 °C. 降温时,1 556.80 nm 处透射功率相应降低,每个温度下的透射功率与升温时基本一一对应. 当温度降至 10°C 时透射功率降至 -26.548 dBm,与升温前相差微小,证明该传感

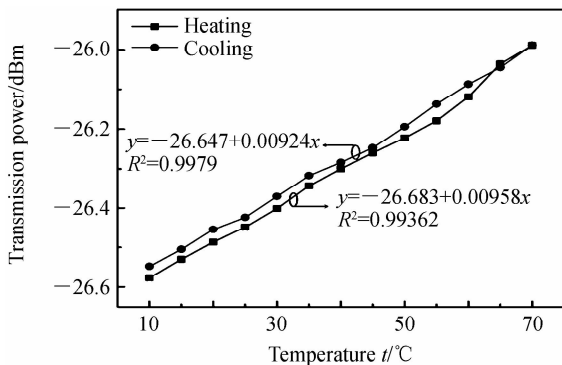


图7 1 556.80 nm 处透射光功率升降温变化曲线

Fig. 7 Changes of transmission power at 1 556.80 nm with temperature when heating and cooling

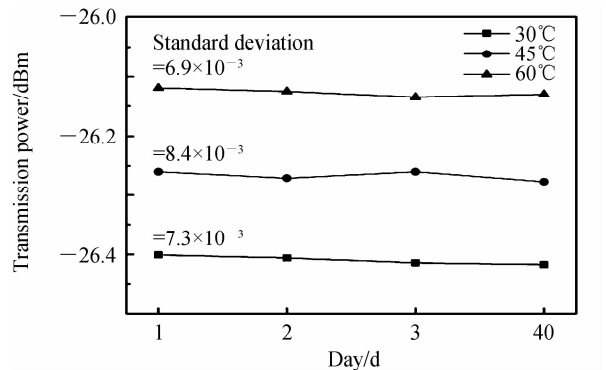


图8 温度传感重复性实验曲线

Fig. 8 Curves of repeated experiment of temperature sensing

器具有良好的温度循环性. 为了验证该传感器的稳定性与重复性, 在第 1、2、3 和 40 天分别测量了 30、45 和 60 °C 下 1 556.80 nm 处的透射功率, 如图 8. 可以看出, 传感器即使放置 40 天后仍然具有良好的线性响应, 透射功率并未发生衰减, 在不同温度下测量的标准偏差均在 0.01 dBm 以下, 说明该传感器的温度稳定性和重复性良好.

2.4 葡萄糖溶液浓度传感实验

检测葡萄糖溶液浓度的实验装置与图 3 基本相同, 区别之处为将 3 cm 长的腐蚀段浸泡于不同浓度的葡萄糖溶液而非去离子水中. 为避免温度对于浓度检测的交叉影响, 腐蚀传感探头同样置于高低温变湿热试验箱中, 温度设定为恒温 25 °C.

当葡萄糖溶液的浓度 c (单位为 g/L) 不同时, 其折射率 n_g 会发生变化, 其变化规律为^[16]

$$n_g = 1.3141 + 0.0199c \quad (8)$$

而葡萄糖溶液的吸收系数 A_g 随浓度增加而上升.

图 9 的为当温度恒定为 25 °C, 葡萄糖溶液浓度由 0% 增加到 5% 时, 1 556.80 nm 处的透射功率变化情况. 从中可以发现, 当葡萄糖溶液的浓度小于 3% 时, 随浓度增加透射峰的强度不断增加; 当浓度大于 3% 时, 随浓度增加透射峰的强度却不断减小. 这是由于当葡萄糖溶液的浓度增加时, 其吸收系数和折射率同时增大, 吸收系数增大导致透射光强减弱, 折射率增大引起透射光强增强. 当浓度低于 3% 时, 折射率增长起主导作用, 透射功率先增加; 当浓度高于 3% 时, 葡萄糖溶液的吸收系数增大到一定程度后对透射功率的影响强于折射率的影响, 吸光度起主导作用, 透射功率反而下降. 整个变化曲线近似于一个正弦函数, 即

$$y = -26.011 + 0.176 \sin\left(\frac{\pi(x-1.192)}{3.354}\right) \quad (9)$$

这导致了该传感器并不能检测全浓度范围内的葡萄糖溶液, 因为在实际应用中同一透射功率不能对应两个葡萄糖溶液浓度值. 但是在 0~3% 的低浓度范围内, 该传感器却具有较好的线性度. 当浓度由 0 增至 3% 时, 1 556.80 nm 处的透射峰强度由 -26.213 dBm 增加至 -25.806 dBm, 其透射功率与葡萄糖溶液浓度的关系可表示为

$$y = -26.167 + 0.126x \quad (10)$$

其灵敏度为 0.126 dBm/(g/L), 线性度为 97.95%. 若光谱仪的最小分辨率为 0.001 dBm, 则该传感器的分辨率可以达到 0.008 g/L, 且随浓度变化响应时间小于 30 s. 重复三次测量葡萄糖溶液浓度分别为 1、2、3 g/L 时 1556.80 nm 处的透射功率, 其结果如图 10. 可以看出, 虽然透射功率具有一定的波动, 但标准偏差均在 0.014 dBm 以下, 波动位于误差允许范围内, 整体仍具有良好的线性关系, 证明其具有较好的浓度检测重复性, 故该葡萄糖溶液浓度传感器在 0~3% 的低浓度范围内具有潜在的应用价值.

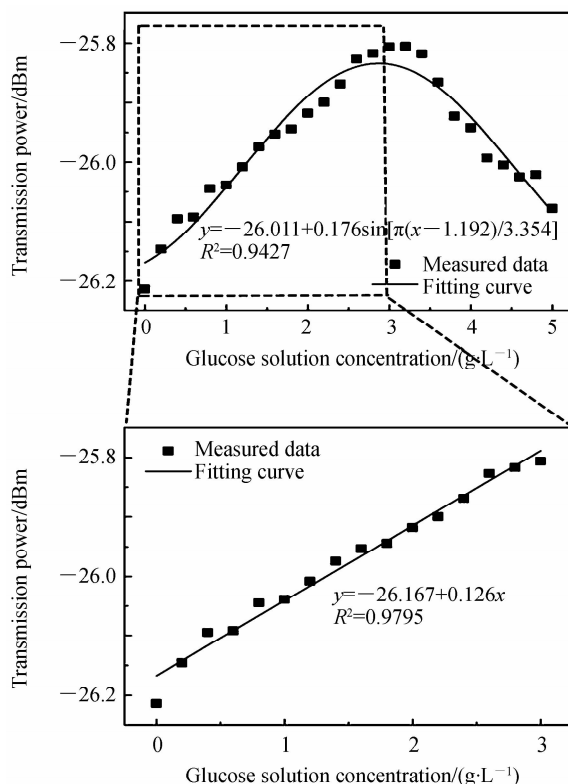


图 9 透射光功率随葡萄糖溶液浓度变化曲线
Fig. 9 Changes of transmission power with glucose solution concentration

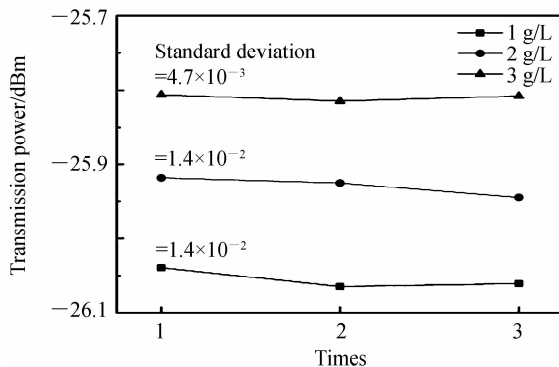


图 10 葡萄糖溶液传感浓度重复性实验曲线
Fig. 10 Curves of repeated experiment of glucose solution concentration sensing

在非恒温情况下,透射光功率不仅与葡萄糖溶液浓度有关,还受温度的交叉影响,透射光功率、葡萄糖溶液浓度和温度三者之间的关系可表示为

$$\Delta P = [k_1 \quad k_2] \begin{bmatrix} \Delta t \\ \Delta c \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, ΔP 表示透射光功率的变化量; Δc 和 Δt 分别表示葡萄糖溶液浓度和温度的变化量; k_1 和 k_2 是相应的矩阵系数,分别对应透射光功率对于温度和葡萄糖溶液浓度的灵敏度.由式(7)和(10)得到的线性拟合曲线可知 $k_1 = 9.58 \times 10^{-3}$, $k_2 = 0.126$.根据式(11),当葡萄糖溶液浓度和温度同时变化时,葡萄糖溶液浓度的改变量为

$$\Delta c = \frac{\Delta P - 9.58 \times 10^{-3} \Delta t}{0.126} \quad (12)$$

则当温度发生波动时,以25℃为基准,温度对于葡萄糖溶液浓度检测的影响可由式(12)进行修正,从而排除温度的交叉影响.

2.5 腐蚀光纤保护套管的设计

总体来说,在室温密闭条件下,测量已较为准确,线性度较好.若需更加精确的测量结果,则应更加严格地控制环境参数,整个装置应置于振动较小的平台上,周围没有强磁场,光源和光谱仪周围的温度波动尽量小,不能将光源或光谱仪与传感探头同时置于高温环境下,以免影响光源的稳定性和光谱仪的探测准确性.此外,腐蚀后的光纤机械强度较差,若直接使用而不采取进一步的保护措施,会影响其实际应用效果.因此设计了一种保护套管结构,在保证腐蚀段不发生断裂的同时允许待测液体自由流动,其结构如图11(比例与实际有所不同).保护套管的内径略大于250 μm(光纤涂覆层外径),外径大于2 cm,长度长于3 cm,使得腐蚀光纤能够顺利进入,且完全包裹于其中.套管的两端用UV胶牢固粘接密封,使得光纤腐蚀段不受力而在粘接密封处受力,加上套管的保护作用,在很大程度上提高了整个结构的机械强度.套管的两对向面各开一个直径2 cm的通孔,孔径较大,允许待测液体自由流入和排出,不影响实际检测使用.

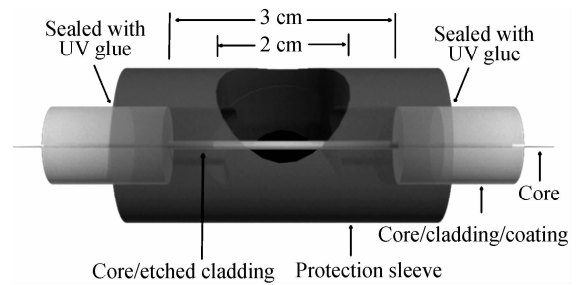


图11 腐蚀光纤保护套管结构示意图
Fig. 11 Schematic diagram of protection sleeve for etched fiber

3 结论

本文将标准单模光纤包层腐蚀至2.4 μm厚,利用光纤倏逝波对外界介质变化十分敏感的原理而制备了一种温度及葡萄糖溶液浓度传感器.通过测量在水介质中不同温度下腐蚀光纤的透射功率建立温度与透射功率的线性关系,通过测量在不同浓度葡萄糖溶液中腐蚀光纤的透射功率建立葡萄糖溶液浓度与透射功率的线性关系.直接建立透射光功率与环境参量之间的联系而并没有进行常用的吸光度换算,是因为透射光功率与环境参量之间已经具有良好的线性度关系,可使数据读取更直观,简化了操作流程.实验结果显示,该传感器在10~70℃的温度范围内具有 9.58×10^{-3} dBm/℃的灵敏度,线性度高达99.36%;当温度为恒定25℃时,在0~3%的葡萄糖溶液浓度范围内具有0.126 dBm/(g/L)的灵敏度,线性度达到97.95%,且响应时间小于30 s.通过数学方法对数据处理后可消除温度对于葡萄糖溶液浓度检测的交叉影响,在非恒温条件下也可对葡萄糖溶液浓度进行测量.该传感器具有操作简单快速、准确性高、可行性好的优点,通过优化实验条件可进一步提高传感器的灵敏度与稳定性,并且该传感器的适用范围可以进一步拓宽,在检测各种不同种类的溶液浓度的方面具有良好的应用潜力.

参考文献

- [1] XU Hong-zhi, LOU Jun, XU Ben, *et al.* High-sensitivity segmented structure optic fiber evanescent wave sensor[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, **25**(11): 2060-2066.
许宏志, 楼俊, 徐贲, 等. 高灵敏度分段结构光纤倏逝波传感器[J]. *光电子·激光*, 2014, **25**(11): 2060-2066.
- [2] GASTON A, LOZANO I, PEREZ F, *et al.* Evanescent wave optical-fiber sensing (temperature, relative humidity, and pH sensors)[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, **3**(6): 806-811.

- [3] ANEESH R, KHIJWANIA S K. Zinc oxide nanoparticle-doped nanoporous sol-gel fiber as a humidity sensor with enhanced sensitivity and large linear dynamic range[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(22): 5493-5499.
- [4] SHEN Tao, FENG Yue, DAI Hai-long, *et al.* Measurement of magnetic field based on optical fiber evanescent wave sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(7): s106003.
沈涛, 冯月, 代海龙, 等. 基于光纤倏逝波传感器的磁场检测[J]. *光学学报*, 2015, **35**(7): s106003.
- [5] HENNING P E, GEISSINGER P. Application of time-correlated single photon counting and stroboscopic detection methods with an evanescent-wave fibre-optic sensor for fluorescence-lifetime-based pH measurements[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, **23**(4): 045104.
- [6] XIONG Y, HUANG Y, YE Z B, *et al.* Flow injection small-volume fiber-optic pH sensor based on evanescent wave excitation and fluorescence determination[J]. *Journal of Fluorescence*, 2011, **21**(3): 1137-1142.
- [7] GRAVINA R, TESTA G, BERMINI R. Perfluorinated plastic optical fiber tapers for evanescent wave sensing[J]. *Sensors*, 2009, **9**(12): 10423-10433.
- [8] SCHULTZ A M, BROWN T D, BURI M P, *et al.* High temperature fiber-optic evanescent wave hydrogen sensors using La-doped SrTiO₃ for SOFC applications[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, **221**: 1307-1313.
- [9] XIONG Y, ZHU D Q, DUAN C F, *et al.* Small-volume fiber-optic evanescent-wave absorption sensor for nitrate determination[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2010, **396**(2): 943-948.
- [10] LONG F, HE M, SHI H C, *et al.* Development of evanescent wave all fiber immunosensor for environmental water analysis[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2008, **23**(7): 952-958.
- [11] OHODNICKI P R, BALTRUS J P, BROWN T D. Pd/SiO₂ and AuPd/SiO₂ nanocomposite-based optical fiber sensors for H₂ sensing applications[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, **214**: 159-168.
- [12] LIU Hong-liang, YANG Ming-hong, DAI Ji-xiang, *et al.* Research on characteristic of fiber optic hydrogen sensor based on palladium and its composite films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3398-3042.
刘宏亮, 杨明红, 代吉祥, 等. 基于钯及其复合膜的光纤氢气传感器特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3398-3042.
- [13] SNYDER A W, LOVE J D. *Optical waveguide theory*[M]. New York: Chapman and Hall, 1983: 120-127, 666-690.
- [14] LI Xue-jin, YU Yong-qin, HONG Xue-ming, *et al.* Analysis on temperature sensing properties of photonic crystal fiber based on liquid filling[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(5): 1140-1144.
李学金, 于永芹, 洪学明, 等. 基于液体填充的光子晶体光纤温度传感特性分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1140-1144.
- [15] DENG Ru-ru, HE Ying-qing, QIN Yan, *et al.* Measuring pure water absorption coefficient in the near-infrared spectrum(900-2500 nm)[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, **16**(1): 192-206.
邓孺孺, 何颖清, 秦雁, 等. 近红外波段(900-2500 nm)水吸收系数测量[J]. *遥感学报*, 2012, **16**(1): 192-206.
- [16] HU Chao, ZHU Zhe-xin and ZHU Jiang-feng. Using light beat method study on the relationship between density and refractive index of the glucose solution[J]. *Physical Experiment of College*, 2012, **25**(6): 3-5.
胡超, 竺哲欣, 竺江峰. 用光拍法研究葡萄糖溶液密度和折射率的关系[J]. *大学物理实验*, 2012, **25**(6): 3-5.