

用于测量液体浓度的光纤传感器设计

周 轶¹ 周奕行¹ 王亚芳² 冯 娟²

(¹ 中国地质大学(北京)材料与工程学院, 北京 100083;

² 中国地质大学(北京)数理学院, 实验物理示范中心, 北京 100083)

摘 要 光纤传感器因其具有体积小、灵敏度高等优点, 已被广泛运用于浓度、温度、振动等物理量的测量。本文设计了一种可以测量溶液浓度的强度调制型光纤传感器, 并对实验装置进行了优化, 通过改变光纤的曲率半径提高了测量精度, 通过光纤光谱仪实现了对光子数的精确测量, 并使用分光器等器件优化了实验装置。文中通过测量已知溶液浓度与光强的关系, 给出了标准曲线并对未知浓度溶液进行了盲测, 以此分析了传感器的精度, 其分辨率可以达到 1.00%, 能够精确地测量液体浓度。最后展望了该类传感器未来的优化方向。

关键词 光纤传感器; 光纤半径; 液体浓度

THE DESIGN OF FIBER OPTIC SENSOR FOR THE MEASUREMENT OF LIQUID CONCENTRATION

ZHOU Yi¹ ZHOU Yixing¹ WANG Yafang² FENG Juan²

(¹ School of Materials Science and Engineering, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;

² School of Science, Center of Experimental Physics, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083)

Abstract Optical fiber sensors, known for their small size and high sensitivity, are widely used to measure physical quantities like concentration, temperature, and vibration. In this paper, we present a fiber optic intensity modulated sensor designed for solution concentration measurement. Our work focuses on optimizing the experimental setup by adjusting the fiber curvature radius to enhance measurement precision. We use a fiber spectrometer for precise photonic count measurements and improve the setup with optical components like splitters. A calibration curve is established by measuring the relationship between known solution concentrations and light intensity, and we conduct a blind test on unknown concentrations. The sensor shows a resolution of 1.00% and can accurately measure liquid concentrations. Finally, we outline future optimization directions for such sensors.

Key words optical fiber sensor; optical fiber radius; liquid concentration

近年来,随着光纤通信技术的发展,光纤传感器因其体积小、灵敏度高、抗电磁干扰、耐腐蚀、耐

热等特点,在军事、安全、电力工业、工程领域得到广泛的应用^[1]。目前,光纤传感器已用于浓度、温

收稿日期: 2025-01-06

基金项目: 中国地质大学(北京)大学生创新创业训练计划项目(S202411415068)。

通信作者: 王亚芳, yfwang@cugb.edu.cn。

引文格式: 周轶, 周奕行, 王亚芳, 等. 用于测量液体浓度的光纤传感器设计[J]. 物理与工程, 2025, 35(4): 146-152.

Cite this article: ZHOU Y, ZHOU Y X, WANG Y F, et al. The design of fiber optic sensor for the measurement of liquid concentration [J]. Physics and Engineering, 2025, 35(4): 146-152. (in Chinese)

度、振动等基本物理量的测量。光纤传感器就是利用光纤作为敏感元件,通过待测量对光纤内部传输光参数的调制,改变其振幅、相位、频率或偏振态等特征参量,将出射光按一定规律转换为电信号或其他所需的形式输出,实现对待测量的测量。根据其对光信号调制参量不同,光纤传感器可分为强度调制型、相位调制型、频率调制型、偏振调制型等^[2]。强度调制型光纤传感器因其简单、可靠、经济^[3],具有多种调制、检测方法,对光纤损耗、偏振、色散等要求低^[4]而备受关注。在溶液浓度测量领域,强度调制型光纤传感器具有操作简单快速,测量精确特点^[5],除透明溶液之外,其对不透明和半透明溶液也具备一定测量能力^[6]。

基于溶液浓度调制折射率的原理,本文设计并组装了一种强度调制型 U 型光纤传感器,对经不同浓度的溶液调制后的出射光强进行测试,结果表明,相较于浮力法、重力法、静压法、折光法、振动法、同位素法、势力学法及电导法等传统浓度测量方式,其适用范围更广,操作更为便捷,并可精确测量液体浓度。

1 基本原理

根据折射率的改变可以引起光强度调制的原理,本文设计的光纤传感器如图 1 所示,在纤芯-待测液体界面处,受光纤弯曲影响,光线入射角 θ_1 小于介质中全反射角 $\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$ 时,不满足全内反射条件,光将在界面处同时产生反射与折射,一部分光从纤芯中逸出,导致光功率衰减^[7]。

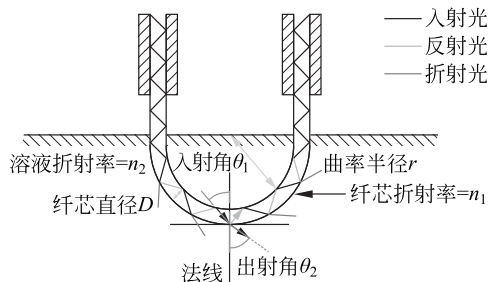


图1 U型光纤液体浓度传感器光路图

根据菲涅尔原理,界面处水平极化光反射系数 $\rho_{\parallel}$ 、垂直极化光反射系数 $\rho_{\perp}$ 为

$$\rho_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad \rho_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (1)$$

对圆偏振光,其功率反射系数 R 为

$$R = \frac{(R_{\perp} + R_{\parallel})}{2} = \frac{(\rho_{\perp}^2 + \rho_{\parallel}^2)}{2} \quad (2)$$

由式(1)、式(2),有

$$R = 1 - \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} \left\{ \left[\frac{2 \sin \theta_2 \cos \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2) \cos(\theta_2 - \theta_1)} \right]^2 + \left[\frac{2 \sin \theta_2 \cos \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right]^2 \right\} \quad (3)$$

其中, θ_1 、 θ_2 为界面处入射角、出射角, n_1 、 n_2 为纤芯、溶液的折射率。由上述公式可得,界面处反射系数与溶液折射率 n_2 有关,且随折射率增大而线性减小。

由图 2 所示,光在界面处入射角 θ_1 为

$$\theta_1 = \arcsin \left[\cos \alpha \frac{(r+h)}{(r+D)} \right] \quad (4)$$

其中, r 为光纤芯弯曲的曲率半径(单位: mm); D 为光纤芯直径(单位: mm); α 和 h 取决于选用光纤与光源性质^[8]。从上面的公式可以看到,选用光纤纤芯直径一定时,光纤弯曲半径越小,其入射角 θ_1 越小,功率反射系数随溶液折射率变化更明显,可提高仪器精度^[9]。

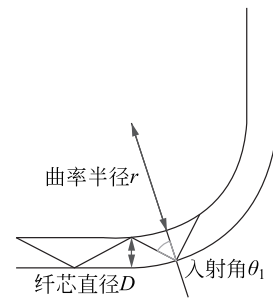


图2 入射角 θ_1 示意图

在传感器中,被测液体折射率 n_2 随浓度 C 变化而改变,对大部分溶液,在较低浓度下其关系可近似为^[10]

$$n \cong \frac{\partial n}{\partial C} \Delta C + \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial n}{\partial \lambda} \Delta \lambda \quad (5)$$

其中, n 为溶液折射率; C 为溶液浓度, mol/L; T 为溶液温度, K; λ 为光源波长, nm。根据上式,可以看到在溶液温度不变,光源波长固定时,折射率近似认为与浓度呈线性关系。由上述公式可得,反射系数与介质折射率有关,且随折射率增大而

线性减小。

在光纤探头弯曲部分长度为 L 时,其出射光强 I 与入射光强 I_0 间存在如下关系^[11]

$$I = I_0 e^{-\alpha L} \quad (6)$$

其中, L 为纤探头弯曲部分长, mm; I_0 为入射光强, lx ; α 为弯曲损耗系数。与折射率有如下关系^[12]

$$\alpha \propto R \approx \left(\frac{1 - \frac{n_2}{n_1}}{1 + \frac{n_2}{n_1}} \right)^2 \quad (7)$$

由式(3)、(5)、(6)、(7),反射系数与溶液折射率呈负相关,同时,如图3所示,在光源强度一定时,传感器出射光强度在溶液折射率 n_2 一定区间内与其近似呈线性关系^[13]。因此,光纤传感器输入光功率一定时,输出光功率与溶液浓度成负线性相关。

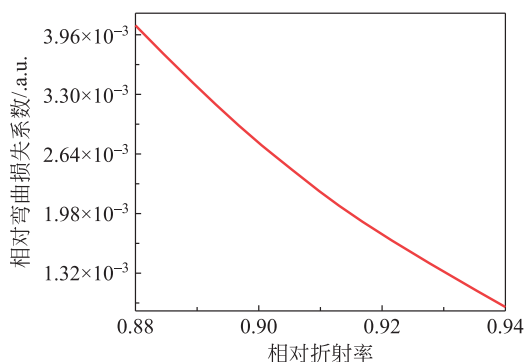


图3 仪器测量范围内传感器光强损失与溶液相对折射率近似关系

2 实验装置设计

在搭建实验装置时,传感器探头采用 Fiberhome G. 657A2 型光纤进行制备,其纤芯折射率 $n_1 = 1.468$,纤芯直径 $D = 9\mu\text{m}$,光源采用卤素灯白光光源,通过耦合器将光源和光纤进行耦合。采用 AvaSpec-ULS2048x64-EVO 光纤光谱仪作为光源传感器接收端,其测量波长范围为 200~1160nm,信噪比为 450:1,与常规光电二极管相比,光纤光谱仪对光强测量具有更好的精度,同时,可对特定波长范围内的光电子数进行数值积分,降低光源单色性差导致的测量误差^[14]。

为了制备 U 型光纤探头,通过将一段 50cm 长光纤中间 3cm 部分进行加热,以去除其涂覆层

及包层,将其两端固定在具有固定半径的圆柱上,继续加热 3 分钟以消除其内应力。

随后,在研究中对实验仪器进行了改进。首先,采用峰值波长为 635nm 的 LED 光源代替卤素灯,使光源具有更好的单色性,使折射率与浓度更好地符合线性关系。此外,在光源处增加了分光器与照度计,通过检测照度计使得入射光强保持一定,有效抑制了光源光强不稳定问题^[15],实验仪器组成如图4所示。

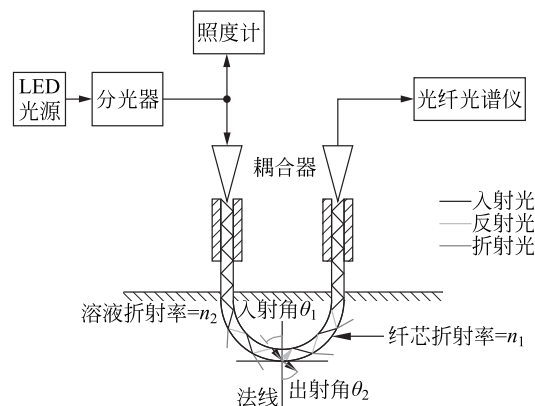


图4 加入分光器与照度计后改进的实验装置图

3 实验结果与分析

3.1 实验设计

本实验选取了氯化钠溶液和蔗糖溶液进行测量。氯化钠与蔗糖的溶解焓较小,并且在 25℃ 时两种溶质的溶解度较高,通过分析天平可以精确配置不同浓度的溶液。实验开始前,首先根据所需浓度的计算量加入溶质,充分搅拌后静置 5min 以确保所选溶质完全溶解。对每种浓度的样品进行多次测量后取平均值,为减小环境温度对测量的影响,确保总测量时间不超过 5min。同时,在更换溶液时,使用蒸馏水与乙醇溶液清洗传感器表面,以防止探头表面沾染杂质,减小测量误差^[16]。为防止纤芯断裂,通过相关标准计算得出^[17],该光纤的最小使用曲率半径为 9.9351mm,为便于制备传感器,因此在实验中使用 10.0mm 为最小曲率半径。

3.2 传感器曲率半径为 12.5mm

图5展示了在传感器曲率半径为 12.5mm 情况下测量得到的不同浓度氯化钠溶液与蔗糖溶液的光谱图及光强积分图。实验过程中,环境温度

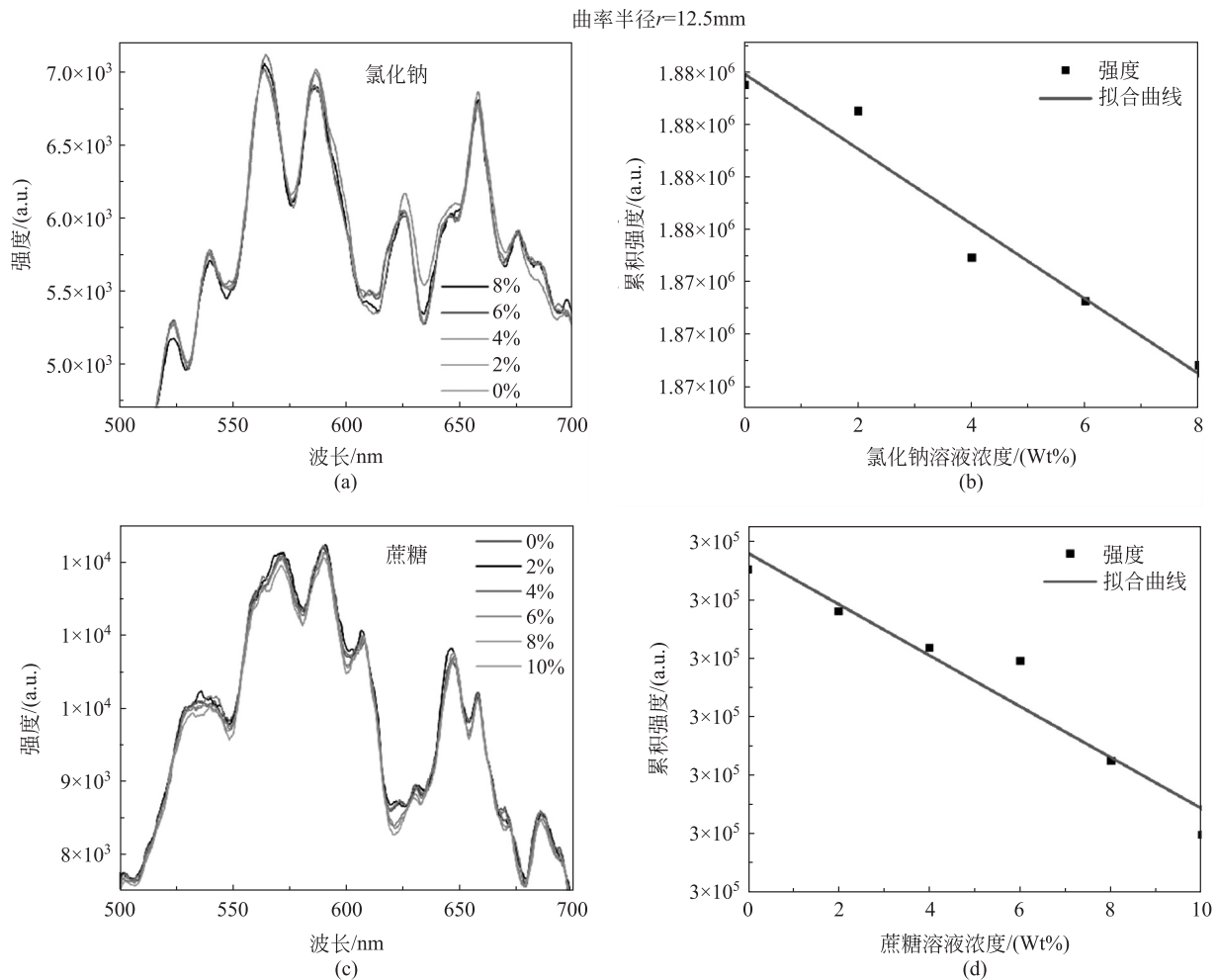


图5 传感器曲率半径 $r=12.5\text{mm}$;氯化钠(a)与蔗糖(c)溶液不同浓度下光电子接收数量图;
氯化钠(b)与蔗糖(d)质量浓度-光强关系图

恒定为 25°C 。图 5(a)与(c)分别为不同浓度的氯化钠溶液与蔗糖溶液的光谱图,图 5(b)与(d)为在选取特定波段($550\text{nm} \sim 650\text{nm}$)下积分后获得的不同浓度下接收的光电子数量,随后对光子数和溶液浓度进行线性拟合,氯化钠溶液数据相关系数 $R^2=0.93668$,蔗糖溶液数据相关系数 $R^2=0.91922$,这表明该传感器可以用来测量这两种溶液的浓度。

3.3 传感器曲率半径为 10mm

图 6 展示了传感器曲率半径调整为 10.0mm 后,对氯化钠溶液与蔗糖溶液的测试结果,除了曲率半径,所有测试条件和数据处理均与前实验相同。其中氯化钠溶液数据相关系数 $R^2=0.96024$,蔗糖溶液数据相关系数 $R^2=0.97170$ 。将该数据与传感器曲率半径为 12.5mm 时所测得数据对比,可得出如下结论:在其他条件保持不变情况

下,测得数据相关性和传感器半径成负相关,即减小传感器曲率半径可提高其测量精度。但是遗憾的是,传感器曲率半径不能无限制减小,减小到一定程度会导致光纤纤芯断裂^[17]。

3.4 测量精度分析

为评估该传感器实际测量精度,采用曲率半径为 10.0mm 的传感器测量已知浓度的蔗糖溶液并建立标准曲线,随后,配置质量浓度分别为 3.00% 与 9.00% 的蔗糖溶液,并进行盲测,实验结果如图 7 所示,图 7(b)中星形标点为盲测数据点,具体数据汇总如表 1。实验结果显示,测得的蔗糖溶液浓度分别为 2.91% 与 9.14% ,与标准值相比,其百分比误差为 3.0% 与 1.6% 。

3.5 适用范围分析

为进一步评估该传感器的适用范围,配制了接近饱和浓度的氯化钠溶液并进行了实验,结果

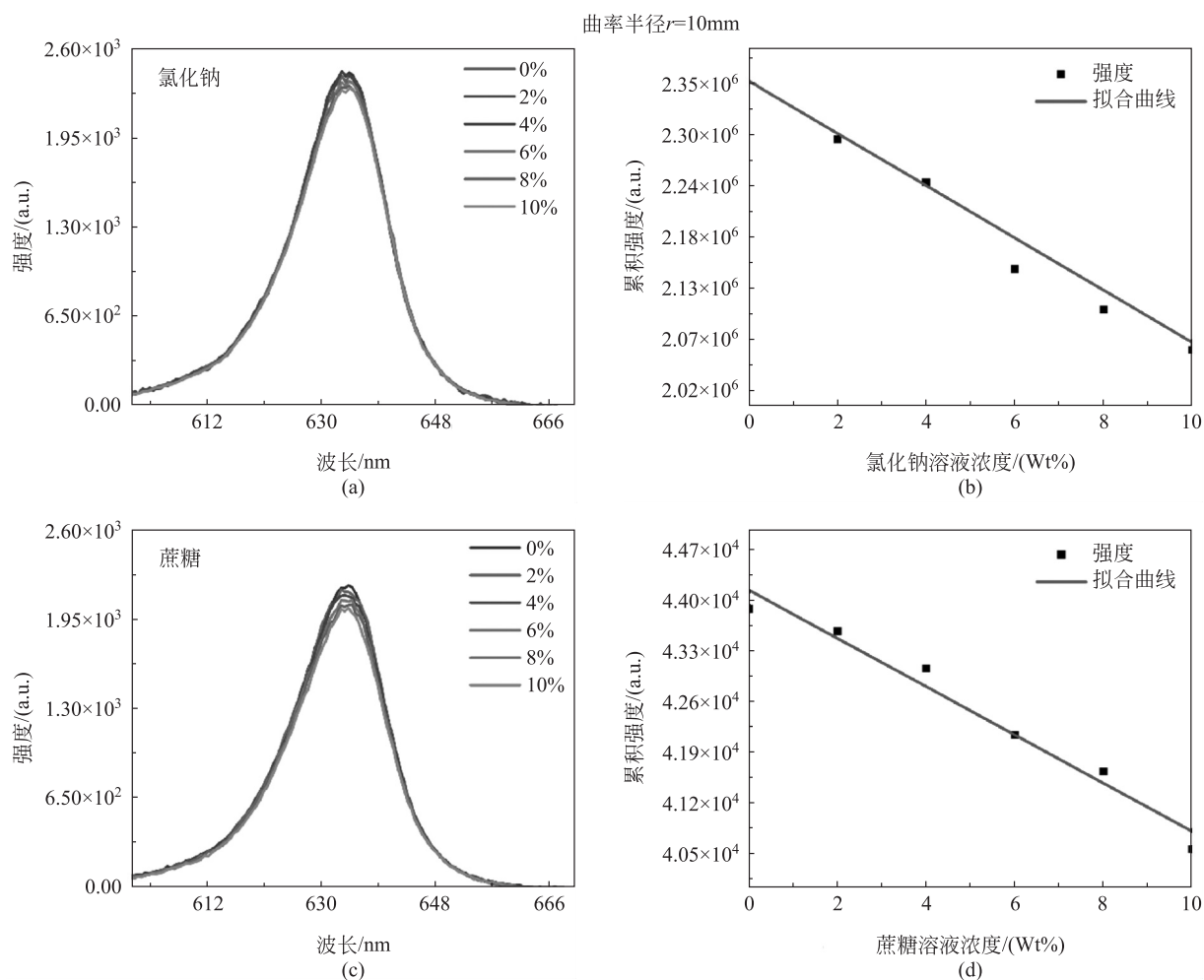


图6 传感器曲率半径 $r=10.0\text{mm}$ ；氯化钠(a)与蔗糖(c)溶液不同浓度下光电子接收数量图；氯化钠(b)与蔗糖(d)质量浓度-光强关系图

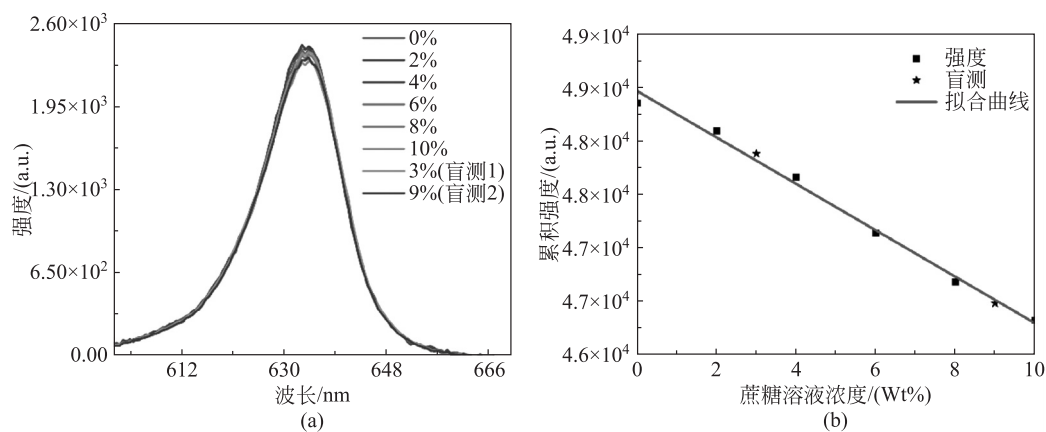


图7 传感器曲率半径 $r=10.0\text{mm}$ 蔗糖溶液的盲测数据与理论值对比图

(a) 蔗糖溶液不同浓度下光电子接收数量图；(b) 蔗糖质量浓度-光强关系图

表 1 盲测数据与实际浓度对比表

	实际浓度/ (Wt%)	测量浓度/ (Wt%)	误差
盲测 1	3.00%	9.00%	3.00%
盲测 2	2.91%	9.14%	1.56%

如图 8 所示,当质量浓度小于 30.00% 时,测量结果与实际值吻合较好;当质量浓度大于 30.00% 时,误差相对较大。在 25℃ 时氯化钠溶解度为 360g/L,对应的质量浓度为 36.00%,因此当传感器在测量接近饱和的溶液时,精度会有所下降。

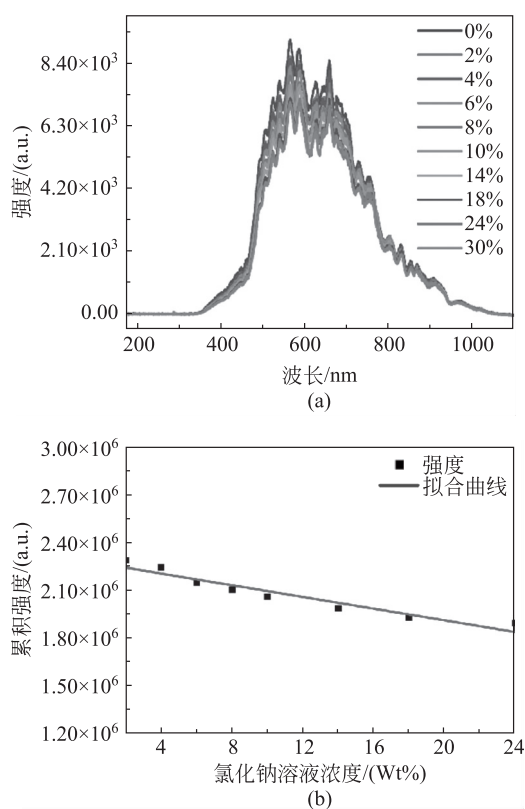


图 8 传感器曲率半径 $r=10\text{mm}$ 的适用范围测量图
(a) 氯化钠溶液不同浓度下光电子接收数量图; (b) 氯化钠质量浓度-光强关系图

4 结语

本文设计了一种简单、具有较高测量精度的溶液浓度传感器。为了提高其测量精度,通过多种方式对仪器进行了优化设计,通过对两种溶解热效应较小的溶液进行测量,验证了该传感器的有效性。并且通过数据表明其最佳质量浓度分辨率可达 1.00%。此外,本文还测量了该传感器的

适用范围。在此过程中也发现由于光纤的脆性,其在弯曲时容易断裂,且使用寿命较短,因此本项工作后续实验的重点是寻找合适的固定方法以提高传感器寿命,并探索该传感器测量半透明、不透明和油类液体浓度的可行性。

参 考 文 献

- [1] 侯俊芳,裴丽,李卓轩,等. 光纤传感技术的研究进展及应用[J]. 光电技术应用, 2012, 27(1): 49-53.
HOU J F, PEI L, LI Z X, et al. Development and application of optical fiber sensing technology[J]. Electro-Optic Technology Application, 2012, (1): 49-53. (in Chinese)
- [2] 王秀彦,吴斌,何存富,等. 光纤传感技术在检测中的应用与展望[J]. 北京工业大学学报, 2004, (4): 406-411.
WANG X Y, WU B, HE C F, et al. Application and prospect of optical fiber sensing technology in detection[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2004, (4): 406-411. (in Chinese)
- [3] 李叶芳,王晓旭. 一种反射式强度调制型光纤传感器的设计与实现[J]. 物理与工程, 2009, 19(4): 24-25+28.
LI Y F, WANG X X. Design and realization of a reflective intensity modulation optical fiber sensor[J]. Physics and Engineering, 2009, 19(4): 24-25+28. (in Chinese)
- [4] 张娜,范乃梅,陈燕,等. U型光纤传感器液体浓度测量系统的研究[J]. 光学技术, 2011, 37(4): 451-454.
ZHANG N, FAN N M, CHEN Y, et al. Investigation of liquid concentration measurement system by U-shaped fiber optic sensor[J]. Optical Technique, 2011, 37(4): 451-454. (in Chinese)
- [5] 苏百顺. 基于光纤光栅的乳化液浓度传感器的研究[D]. 中国矿业大学(北京), 2012.
SU B S. Research of the emulsion concentration sensor based on fiber grating[D]. China University of Mining and Technology-Beijing, 2012. (in Chinese)
- [6] 马健,郑羽,余海湖. 基于腐蚀光纤的温度及葡萄糖溶液浓度传感器[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 142-149.
MA J, ZHENG Y, YU H H. A temperature and glucose solution concentration sensor based on etched optical fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 142-149. (in Chinese)
- [7] 张娜. 光纤传感器液体浓度检测系统的研究[D]. 山东大学, 2005.
ZHANG N. Research on fiber optic sensor liquid concentration detection system[D]. Shandong: Shandong University, 2005. (in Chinese).
- [8] 钟丽云,杨齐民,吕晓旭,等. 折射率调制型光纤传感器在溶液浓度测量中的应用[J]. 光子学报, 1998(5): 62-65.

- ZHONG L Y, YANG Q M, LYU X X, et al. Application of refractive index modulation type optic-sensor to the solution density measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998(5): 62-65. (in Chinese)
- [9] 姚逸云, 马思娟, 张志华, 等. 光纤的弯曲及浸没溶液折射率对光纤输出功率的影响[J]. *物理与工程*, 2017, 27(S1): 234-237, 244. (in Chinese)
- YAO Y Y, MA S J, ZHANG Z H, et al. Influence of fiber-bending and refractive index of solution immersed on output power of optical fiber[J]. *Physics and Engineering*, 2017, 27(S1): 234-237, 244. (in Chinese)
- [10] SU H, HUANG X G. Fresnel-reflection-based fiber sensor for on-line measurement of solute concentration in solutions [J]. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 2007, 126(2): 579-582.
- [11] 谢昕. 单模光纤弯曲损耗的实验研究[D]. 北京交通大学, 2016.
- XIE X. Experimental study of bending loss in single-mode fiber[D]. Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [12] 吴昌, 许立新, 张先明. 光纤弯曲损耗系数随环境变化的研究[J]. *量子电子学报*, 2018, 35(6): 752-758.
- WU C, XU L X, ZHANG X M. Alteration of fiber bending loss coefficient with environment[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2018, 35(6): 752-758. (in Chinese)
- [13] 彭星玲, 茶映鹏, 叶建雄. U形光纤液体折射率传感性能分析[J]. *南昌工程学院学报*, 2019, 38(3): 97-100.
- PENG X L, CHA Y P, YE J X. Analysis of liquid refractive index sensing performance of U-shaped optical fiber [J]. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2019, 38(3): 97-100. (in Chinese)
- [14] 孙德藩, 刘鹏. 基于光纤光谱仪的溶液浓度测量系统[J]. *大学物理实验*, 2019, 32(3): 82-85.
- SUN D P, LIU P. Solution concentration measurement system based on optical fiber spectrometer[J]. *Physical Experiment of College*, 2019, 32(3): 82-85. (in Chinese)
- [15] 苏辉, 黄旭光, 郭怡婷. 强度调制型光纤折射率传感器的设计与研究[J]. *光子学报*, 2008, (4): 713-716.
- SU H, HUANG X G, WU Y T. Design and study of fiber refractive index sensor based on intensity modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, (4): 713-716. (in Chinese)
- [16] 焦佳. 强度调制型光纤传感器液体浓度检测系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- JIAO J. Research on Intensity Modulated Optical Fiber Sensor for Liquid Concentration Testing System[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese).
- [17] ITU-T for ITU Telecommunication Standardization Sector. Guidance on optical fibre and cable reliability: ITU-T G. Sup59 [S]. Geneva: International Telecommunication Union, 2018.