

文章编号:1005-4642(2023)08-0056-05

基于螺线形光纤的液体质量分数传感器

许鸣媛^a, 黄婉玲^a, 秦言^a, 赵改清^{a,b}, 余陨金^a, 陈郁芝^{a,c}

(深圳大学 a. 物理与光电工程学院; b. 大学物理实验教学中心;
c. 深圳市传感器技术重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要: 设计了基于螺线形光纤的液体质量分数测量装置. 在传输光纤的中间部位制作去包层裸光纤, 当裸光纤与不同质量分数的溶液接触时, 光纤中传输光的强度将随液体质量分数的升高而损耗增大, 以此建立传输光强与质量分数的对应关系. 设计了螺线形裸光纤传感器, 研究了螺线形光纤设计参量——曲率半径和圈数对液体质量分数检测灵敏度和分辨率的影响. 优化后的传感器对 NaCl 溶液的检测灵敏度为质量分数变化 1% 引起 0.626 mV 的检测电压变化, 质量分数分辨率达到 1.1×10^{-3} , 且检测重复性好.

关键词: 液体质量分数; 折射率; 光纤传感

中图分类号: TH741

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.08.008

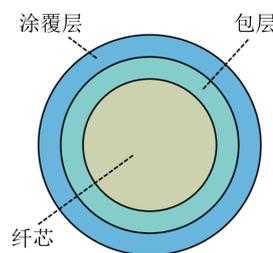
目前, 已存在许多测定质量分数的方法, 如滴定分析法^[1-2]、分光光度法^[3-4]、比重计法^[5]、旋光度法^[6]、折光法^[7-8]等. 因传感器具有环境适用性高、耗液量少、检测灵敏度高、分辨率高、小型且易于集成化的特点, 可将其引入到质量分数测量中, 可实现更加快速、准确、方便的测量, 还能增加大学物理实验的趣味性和探索性, 提高大学生的设计性实验思维和动手能力. 本文从光纤传感原理出发, 设计并搭建了基于螺线形光纤的液体质量分数测量装置. 螺线形光纤传感器具有物理结构参量多变量探索的特点, 学生通过研究变量对传感器性能的影响, 加深对光纤传感原理的理解.

1 光纤测质量分数的原理与传感器设计

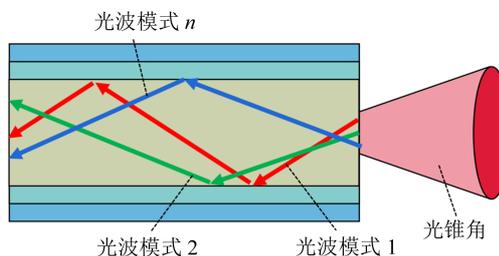
1.1 实验原理

光纤由纤芯、包层和涂覆层以同心圆柱形的方式构成, 如图 1(a) 所示. 入射到光纤端面且满足光纤传输条件的光, 呈现光锥角分布, 如图 1(b) 所示, 光纤中光波模式的传输量决定光锥角的大小. 对传输光纤的中间部位进行图 1(c) 所示的去涂覆层和包层处理, 得到传感光纤(裸光纤).

当被测液体覆盖传感光纤时, 随着液体折射率(折射率与质量分数呈正相关)的升高, 光纤中出现不能满足纤芯与液体界面全反射条件的光波模式, 则产生泄露光波模式. 泄露光波模式的量与液体质量分数的对应关系是本文的研究内容.



(a) 光纤的横截面



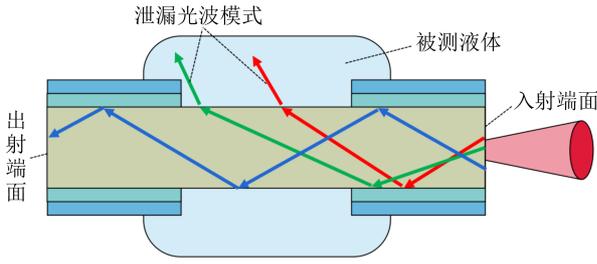
(b) 光纤传输光的原理

收稿日期: 2023-03-28; **修改日期:** 2023-05-18

基金项目: 深圳湾实验室基础研究项目 (No. SZBL2021080601012); 深圳市高等院校稳定支持计划面上项目 (No. 20200812115548001)

作者简介: 许鸣媛 (2001—), 女, 广东阳西人, 深圳大学物理与光电工程学院 2020 级本科生. E-mail: 2020271029@email.szu.edu.cn

通信作者: 陈郁芝 (1988—), 男, 广东深圳人, 深圳大学物理与光电工程学院助理教授, 博士, 研究方向为光纤生化传感器. E-mail: chenyzhi@szu.edu.cn



(c) 传感光纤测液体质量分数
图 1 光纤测液体质量分数的传感原理

1.2 螺线形光纤传感测量液体质量分数的设计

由光纤测液体质量分数的原理可知,被测液体质量分数可调控泄露光波模式的量,进而调控光锥角. 由文献[9-10]可得到直光纤的光锥角为

$$i = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (1)$$

弯曲光纤的光锥角为

$$\varphi = \arcsin \sqrt{n_1^2 - \left[\frac{R + \frac{d}{2}}{R - \frac{d}{2}} \right]^2 n_2^2}, \quad (2)$$

其中, n_1 为光纤纤芯的折射率, n_2 为光纤包覆材料的折射率, d 为光纤纤芯的直径, R 为弯曲光纤的曲率半径.

由式(1)可知 i 与 n_2 存在对应关系, 而由式(2)可知 R 可以调控 φ 与 n_2 的对应关系, 因此设计弯曲光纤更有利于测量液体质量分数. 此外, 传感光纤的长度 L 越长, 测量时的光损耗量越大, 越有利于制作灵敏传感器.

综合以上考虑, 设计了如图 2 所示的螺线形光纤传感器, 传感器同时具备调控 R 与 L 的功能. 通过螺线形光纤绕线的曲率幅度控制 R , 绕线的圈数 N 控制 L , 设计并制作了高灵敏光纤液体质量分数传感器.

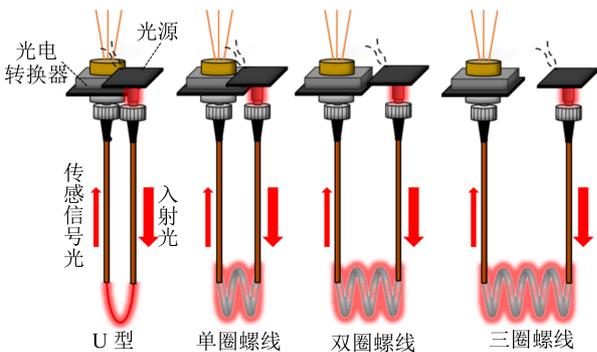


图 2 螺线形光纤传感器

2 传感器的设计仿真

2.1 直光纤和弯曲光纤对折射率响应的比较

由式(1)和式(2)分别计算直光纤以及弯曲光纤(直径为 1.0 mm 的 PMMA 光纤)对表面包覆材料折射率的响应, 2 种光纤的 L 均设为 0.2 m, 弯曲光纤的 R 设为 3.0 mm. 如图 3 所示, 随着光纤包覆材料折射率的增大, 2 种光纤的光锥角逐渐变小, 而且弯曲光纤的光锥角的变化幅度更大, 更为灵敏.

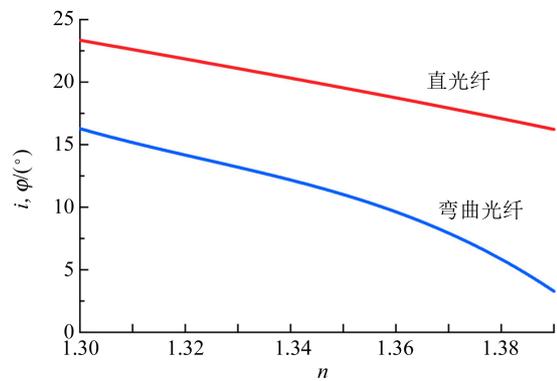


图 3 直光纤和弯曲光纤对折射率响应的比较

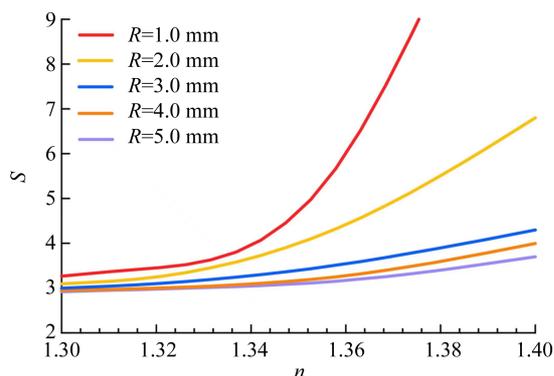
2.2 弯曲光纤对灵敏度的影响

灵敏度表征传感器对单位量待测物质变化所致响应量的变化程度. 灵敏度越高, 传感器可以感知的变化量越小.

弯曲光纤灵敏度为光锥角对包覆材料折射率的导数. 由式(2)求导可得弯曲光纤的检测灵敏度表达式为

$$S = \frac{-n_2(2R+d)^2}{\sqrt{n_1^2 - \frac{n_2^2(2R+d)^2}{(2R-d)^2}} (2R-d)^2 \sqrt{\frac{n_2^2(2R+d)^2}{(2R-d)^2} - n_1^2 + 1}} \quad (3)$$

由式(3)研究弯曲光纤灵敏度 S 与 R 的关系, 如图 4 所示. 在 $T=25.0\text{ }^\circ\text{C}$, $d=1.0\text{ mm}$ 时, S 随 R 的减小而升高, 在 R 相同时, S 随检测折射率 n_2 的升高而升高, R 的减小带来了 S 的剧烈变化. S 的剧烈变化不利于传感器测量的线性标定, 由图 4 结果, $R > 2.0\text{ mm}$ 时, S 随着 n 的变化非常小且平缓, 在一小段折射率区间内, 可近似认为 S 为常量; 另外, 应该尽量考虑传感器的小型化, 因此后续实验中, 选择 $R=2.5, 3.0, 4.0\text{ mm}$ 进行实验研究.

图 4 弯曲光纤 R 对灵敏度 S 的影响

3 实验设计与装置

实验装置由螺旋形光纤传感器、650 nm 激光光源(具有自动补偿激光光源输出功率的负反馈电路,以此保证光源的稳定性)、光电转换器、PASCO 数据采集接口和计算机组成,如图 5 所示.螺旋形光纤传感器测量液体时所引起的光锥角变化可用于表示输出光强的变化,进而通过光电转换器转换为电压变化,该电压信号由 PASCO 数据采集接口采集,并通过计算机实时输出.

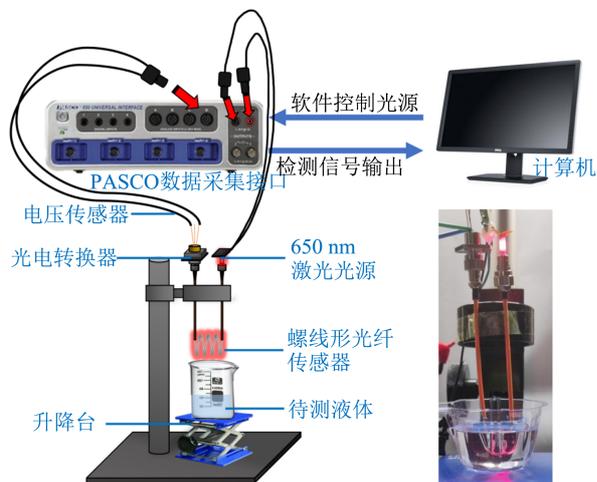


图 5 实验装置整体示意图

分别制作 $R=2.5, 3.0, 4.0$ mm 的弯曲光纤,对比研究不同 R 下,传感器的 S 和平均标准偏差 σ (σ 为传感器测量不同质量分数的溶液时,1 min 内检测电压波动的平均值).由 S 和 σ 可进一步计算质量分辨率

$$A = \frac{\sigma}{S}. \quad (4)$$

通过对比分析,选择最优 R 参量制作 U 形及

单、双、三螺旋形光纤传感器,研究最优传感器的 N 值.

采用 R 与 N 实验参量优化后的传感器进行梯度质量分数的 NaCl 溶液的重复性测试,研究传感器的 S 和 A ,并对其测量的稳定性进行评估.

4 实验结果

在 $T=25.0$ °C, $d=1.0$ mm, $R=2.5$ mm 时,三螺旋形光纤传感器连续测量质量分数增加的系列 NaCl 溶液的检测信号时序图如图 6 所示.在质量分数为 0~20% 的区间内,随着质量分数的升高,电压信号逐渐降低,且呈现良好的阶梯分布,检测电压信号能够区分不同质量分数^[11-12],因此螺旋形光纤传感器测量液体质量分数的方案可行.

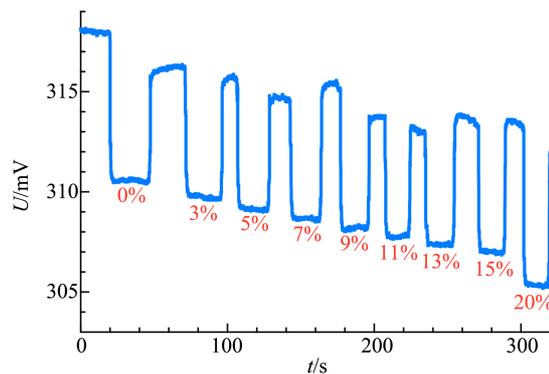


图 6 螺旋形光纤传感器测量不同质量分数 NaCl 溶液的检测信号时序图

进一步研究 R 对传感器性能的影响,表 1 为在 $T=25.0$ °C, $d=1.0$ mm, $N=1$ 时,不同 R 下弯曲光纤传感器的性能. R 小的传感器具有更高的灵敏度,与理论结果相符合.而 σ 主要由采集系统的固有噪声决定,实验测得不同 R 下的 σ 基本一致. $R=2.5$ mm 的弯曲光纤传感器具有最好的质量分辨率,因此实验确定最优传感器对应的参量 R 为 2.5 mm.

表 1 R 对弯曲光纤传感器性能的影响

R/mm	S/mV	σ/mV	A
2.5	0.393	0.062	1.6×10^{-3}
3.0	0.330	0.066	2.0×10^{-3}
4.0	0.295	0.063	2.1×10^{-3}

注: S 为 NaCl 溶液的质量分数每变化 1% 所引起的检测电压变化.

传感器的参量 L 由螺线形绕圈的圈数 N 控制,表 2 为 $T=25.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $d=1.0\text{ mm}$, $R=2.5\text{ mm}$ 时,不同圈数螺线形光纤传感器的性能表现. 圈数多的传感器具有更高的灵敏度,同时也具有更好的分辨率,但是增加圈数的同时也增大了传感器的体积. 考虑到小型化传感器检测的便携性,不能无限增大体积,因此选择三螺线形光纤传感器进行后续实验.

表 2 圈数 N 对螺线形光纤传感器性能的影响

N	S/mV	σ/mV	A
U 形	0.450	0.065	1.4×10^{-3}
1	0.494	0.065	1.3×10^{-3}
2	0.552	0.065	1.2×10^{-3}
3	0.626	0.067	1.1×10^{-3}

注: S 为 NaCl 溶液的质量分数每变化 1% 所引起的检测电压变化.

经过实验参量优化后,采用 $R=2.5\text{ mm}$ 的三螺线形光纤传感器($d=1.0\text{ mm}$)在 $T=25.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时进行 NaCl 溶液质量分数的重复测量,研究传感器的稳定性.

重复 10 次测量溶液质量分数梯度增加的实验,结果如图 7 所示,传感器具有较好的检测一致性,对同一液体质量分数重复检测的平均偏差为 0.066 mV ;多次测量均能保持较好的线性响应,传感器的平均灵敏度为质量分数每变化 1% 引起 0.626 mV 的检测电压变化.

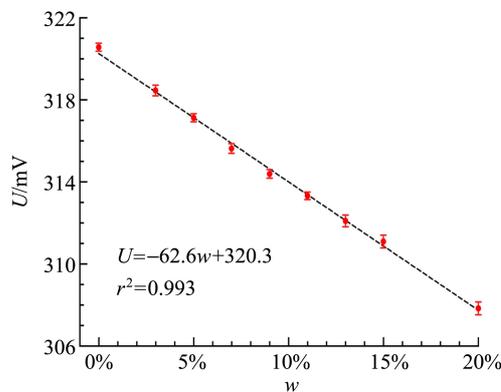


图 7 $R=2.5\text{ mm}$ 的三螺线形光纤传感器的测量结果

5 结 论

利用塑料光纤可塑形的优势,设计了螺线形

光纤传感器,用于测量液体质量分数. 实验中探讨了光纤传感器的多个参量对装置检测性能的影响,通过理论与实验相结合的方式,最终确定了传感器的优化参量为 $R=2.5\text{ mm}$, $N=3$. 实验制作的三螺线形光纤传感器在质量分数为 $0\sim 20\%$ 的 NaCl 溶液的检测灵敏度为质量分数每变化 1% 引起 0.626 mV 的检测电压变化,质量分数分辨率为 1.1×10^{-3} ,并且检测具有良好的重复性. 本实验设计将光纤传感原理引入大学物理实验中,具有可操作性和探索性,有助于学生对新型光学检测原理产生浓厚的兴趣和自主学习动力.

参考文献:

- [1] Golovko D A, Sharma V K, Suprunovich V I, et al. A simple potentiometric titration method to determine concentration of ferrate(vi) in strong alkaline solutions [J]. Analytical Letters, 2011,44(7): 1333-1340.
- [2] Grossi M, Ricco B. An automatic titration system for oil concentration measurement in metalworking fluids [J]. Measurement, 2017,97:8-14.
- [3] Cheng W, Zhang X F, Duan N, et al. Direct-determination of high-concentration sulfate by serial differential spectrophotometry with multiple optical pathlengths [J]. Science of the Total Environment, 2022,811:152121.
- [4] Shams-Nateri A. Prediction of dye concentrations in a three-component dye mixture solution by a PCA-derivative spectrophotometry technique [J]. Color Research and Application, 2010,35(1):29-33.
- [5] 杨柳. 利用线性回归法在比重计上测试药品浓度的分析方法[J]. 信息记录材料,2017,18(2):18-20.
- [6] 庄旭琴. 旋光度法测定盐酸氨基葡萄糖片的含量[J]. 安徽医药,2006(12):930-931.
- [7] 贺国旭,李宝怡,田刚,等. 折光法测定咪唑类离子液体与十二烷基硫酸钠复配体系的 CMC[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2021,46(2):103-108.
- [8] 张欢,段亚军,朱珍,等. 折光法检测食品添加剂乳酸的含量[J]. 食品安全质量检测学报,2020,11(9):3052-3055.
- [9] 曲直,孙秀平,何杰,等. 单模双折射光纤弯曲传输损耗的研究[J]. 物理实验,2004,24(9):40-42.
- [10] 包令杰. 塑料光纤传光原理[J]. 科技风,2010(3): 197.
- [11] 孙秀平,冯克成,张喜和,等. 塑料光纤拉曼散射的研究[J]. 光谱学与光谱分析,2005,25(12):2002-

2004.
[12] 王彦,梁大开,欧启标,等. 测量液体折射率与浓度

的光纤光栅传感器[J]. 传感器与微系统,2007,26
(7):24-26,30.

Liquid mass fraction sensor based on spiral fiber

XU Mingyuan^a, HUANG Wanling^a, QIN Yan^a, ZHAO Gaiqing^{a,b},
YU Yunjin^a, CHEN Yuzhi^{a,c}

(a. College of Physics and Optoelectronic Engineering; b. College Physics Experiment Teaching Center;
c. Shenzhen Key Laboratory of Sensor Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: A liquid mass fraction measuring device based on spiral fiber was designed, where uncoated bare fiber was prepared in the middle of the transmission fiber. When the bare fiber entered NaCl solution with different mass fraction, the transmission loss of incident light in the fiber increased with the increasing liquid mass fraction. Thus, the corresponding relationship between the transmission light intensity and the mass fraction was established. In this paper, the influence of radius of curvature and turns on the sensitivity and resolution of the proposed sensor was studied. After the optimization of structural parameters, the results showed that the sensitivity of the designed spiral fiber sensor was obtained to be 0.626 mV per 1% for NaCl solution detection, and the mass fraction resolution reached 1.1×10^{-3} , while the detection repeatability also has good performance.

Key words: liquid mass fraction; refractive index; fiber optic sensing

[编辑:任德香]

(上接 55 页)

Adaptive noise reduction method for sound sources based on acoustic imaging

JIANG Xuanming^a, ZHENG Yu^b, WANG Xinhua^c

(a. School of Physical Science and Technology; b. School of Information Science and Engineering;
c. National Demonstration Center for Experimental Physics Education,
Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Aiming at the dilemma of weak dynamic adaptability of existing sound localization technology, a sound source adaptive noise reduction method based on a microphone array group composed of 21 MSM261S4030H0 and TDOA algorithm was proposed. On the basis of acoustic imaging, the new method which could balance the accuracy and real-time performance of localization by adjusting parameters according to the specific situation of the sound source in a composite noise reduction process that included removing outliers and iterative correction. The adaptive sound location of the sound source within 8 meters was achieved.

Key words: sound localization; acoustic imaging; sound source self-adaptive; composite noise reduction

[编辑:任德香]