

## 光纤SPR传感器参数对折射率测量灵敏度的影响

陈强华, 丁锦红, 韩文远, 周胜, 关裕, 吕洪波, 孙启国

### Effect of optical fiber SPR sensor parameters on the sensitivity of refractive index measurement

引用本文:

陈强华, 丁锦红, 韩文远, 周胜, 关裕, 吕洪波, 孙启国. 光纤SPR传感器参数对折射率测量灵敏度的影响[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 329–334.

CHEN Qianghua, DING Jinhong, HAN Wenyuan, ZHOU Sheng, GUAN Yu, L Hongbo, SUN Qiguo. Effect of optical fiber SPR sensor parameters on the sensitivity of refractive index measurement[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(3): 329–334.

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. 飞秒激光制备光纤U形微结构应用于折射率传感

引用本文: 宁贵毅, 傅贵, 史萌, 等. 飞秒激光制备光纤U形微结构应用于折射率传感[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 916–920.

### 2. 基于长周期光纤光栅的光纤液位传感器

引用本文: 孙哲, 郭子龙, 李虎, 等. 基于长周期光纤光栅的光纤液位传感器[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 41–45.

### 3. 表面曲率对石英毛细管微瓶模式及传感特性影响

引用本文: 张峰, 吴根柱, 汪成程. 表面曲率对石英毛细管微瓶模式及传感特性影响[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 840–844.

### 4. 基于FPGA的光纤光栅温度传感器高速解调系统

引用本文: 王伟, 张天阳, 陈海滨, 等. 基于FPGA的光纤光栅温度传感器高速解调系统[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 849–853.

### 5. 空域无源光纤腔衰荡乙炔体积分数检测仿真

引用本文: 闵锐, 成纯富, 贺洁. 空域无源光纤腔衰荡乙炔体积分数检测仿真[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 366–371.

文章编号: 1001-3806(2023)03-0329-06

## 光纤 SPR 传感器参数对折射率测量灵敏度的影响

陈强华, 丁锦红, 韩文远, 周 胜, 关 裕, 吕洪波, 孙启国  
(北方工业大学 机械与材料工程学院, 北京 100144)

**摘要:** 为了研究光纤表面等离子体共振 (SPR) 传感器参数对折射率测量灵敏度的影响, 采用双频激光外差干涉相位测量光路结合光纤型 SPR 传感器进行了折射率测量, 并对光纤 SPR 传感器不同纤芯直径对传感器灵敏度影响进行了分析。在光纤 SPR 传感器适应的折射率范围内, 分别使用纤芯直径为 300  $\mu\text{m}$  的光纤和 400  $\mu\text{m}$  的光纤, 测量不同质量分数下的甘油、蔗糖、氯化钠溶液的相位差, 并计算对应折射率; 分析了在传感器适用的折射率范围内, 各溶液质量分数与折射率之间的关系, 并对理论结果进行了实验验证。结果表明, 纤芯直径越小, 传感器灵敏度越高, 灵敏度可达  $10^{-5}$  量级; 密度越高, 测量中的稳定性越高, 最大相位差标准差为  $0.145^\circ$ ; 分子量越大, 精度越高, 蔗糖的测量计算值与阿贝折射仪标定值之间的差值最大为  $0.52 \times 10^{-4}$ 。该研究为光纤 SPR 传感技术的进一步研究及应用提供了较好基础。

**关键词:** 传感器技术; 纤芯直径; 折射率测量; 分子量; 质量分数

**中图分类号:** TP212.9; O436 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.03.007

## Effect of optical fiber SPR sensor parameters on the sensitivity of refractive index measurement

CHEN Qianghua, DING Jinhong, HAN Wenyuan, ZHOU Sheng, GUAN Yu, LÜ Hongbo, SUN Qiguo  
(School of Mechanical and Material Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

**Abstract:** In order to study of the effect of fiber optic surface plasmon resonance (SPR) sensor parameters on refractive index measurement sensitivity, refractive index measurement experiments were carried out by using the dual-frequency laser heterodyne interferometric phase measurement optical path combined with the optical fiber SPR sensor. The effect of different core diameters on sensor sensitivity of fiber optic SPR sensors was theoretically analyzed. Within the refractive index range adapted by fiber optic SPR sensors, optical fibers with a core diameter of 300  $\mu\text{m}$  and fibers with a core diameter of 400  $\mu\text{m}$  were used to measure the phase difference of glycerol, sucrose and sodium chloride solutions under different mass fractions, and to calculate the corresponding refractive index. The relationship between the mass fraction and refractive index of each solution within the refractive index range adapted by the sensor was analyzed, and the theoretical results were experimentally verified. The results show that the smaller the diameter of the core, the higher the sensitivity of the sensor, and the sensitivity can reach  $10^{-5}$  orders of magnitude; The higher the density, the higher the stability in the measurement, and the maximum phase difference standard deviation is  $0.145^\circ$ ; The larger the molecular weight, the higher the accuracy, and the difference between the measured calculation of sucrose and the calibration value of the Abbe refractometer is up to  $0.52 \times 10^{-4}$ . This research provides a good foundation for the further research and application of optical fiber SPR sensing technology.

**Key words:** sensor technique; core diameter; refractive index measurement; molecular weight; mass fraction

## 引 言

折射率是一种可以反映物质物理特性和化学特性的重要参数。折射率的值常常会随着环境的变化而相应发生改变<sup>[1-2]</sup>。通过折射率可以判断物质的纯净度、浓度等物理量。光纤表面等离子体共振 (surface plasmon resonance, SPR) 指介电常数为相反数的金属与介质, 在金属介质的表面存在的自由电荷密度波被激发, 随后沿金属与非金属介质交界处传播的物理现象<sup>[3-4]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52075004; 50475177; 51775044; 11774030); 北京市教育委员会科研计划资助项目 (KM202110009010); 北方工业大学科研启动基金资助项目 (110051360002)

作者简介: 陈强华 (1978-), 男, 工学博士, 副教授, 现主要从事光学精密测量方面的研究。

E-mail: chenqianghua@tsinghua.org.cn

收稿日期: 2012-04-25; 收到修改稿日期: 2022-07-14

SPR 传感技术具有可以对待测物质进行即时测量、不需要进行标记、灵敏度较高等优点<sup>[5-7]</sup>。

SPR 对环境的折射率变化较敏感,通过对待测物质的测量,可以精确地分析其光学性质。1902年,WOOD 教授等人发现了 SPR 现象<sup>[8-9]</sup>。1968年,OTTO 和 KRETSCHMANN 发明了棱镜耦合的 SPR 激发装置<sup>[10-11]</sup>。1988年,ZHANG 等人提出了基于光纤耦合的 SPR 传感装置<sup>[12]</sup>。相较于传统的棱镜耦合型 SPR 传感器,光纤 SPR 传感器可以实现长距离的测量,并且可以适应环境恶劣的工作环境。光纤 SPR 传感器具有灵敏度高、可实时检测等优点,因此,该传感器在分析生物化学、食品监控等众多领域皆有应用<sup>[13-18]</sup>。

2018年,北京理工大学光学精密测量课题组建立了基于 Kretschmann 结构的光纤 SPR 传感器<sup>[19]</sup>。该传感器的传感区域共 4 层结构,对光线进行抛磨处理后,在纤芯表面依次蒸镀上铬膜金膜。通过仿真分析各层数据如下:第 1 层纤芯 ( $\varepsilon_1 = 2.1240, d_1 = 300 \mu\text{m}$ );第 2 层铬膜 ( $\varepsilon_2 = -0.9 + 20.86i, d_2 = 2 \text{ nm}$ );第 3 层金属 ( $\varepsilon_3 = -10.92 + 1.49i, d_3 = 40 \text{ nm}$ );第 4 层待测介质,传感长度  $L = 3 \text{ mm}$ 。由于相位调制相较于强度调制和光波长调制的灵敏度更高。该传感器使用相位信号解调方法,适用范围是折射率在 1.333 ~ 1.336 区间的物质<sup>[20]</sup>。

光纤 SPR 传感器在不同参数下所展现的性能也不相同。待测溶液的分子量、密度、质量分数以及光纤自身的纤芯直径,均对光纤 SPR 传感器的灵敏度等性能造成影响。甘油、蔗糖、氯化钠的分子量分别为:92.09, 342.297, 58.443;密度分别为:1.261  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 1.77  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 2.165  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。本文中在满足折射率范围要求的前提下,采用双频激光外差干涉相位测量光路结合光纤型 SPR 传感器进行了折射率测量,并研究了纤芯直径对光纤 SPR 传感器灵敏度的影响,以及不同溶液、不同质量分数时的传感器灵敏度。

## 1 实验原理及光路

图 1 是光纤导光示意图。激光沿  $AB$  由空气(折射率为  $n_0$ )入射进光纤,到达纤芯(折射率为  $n_1$ )与包层(折射率为  $n_2$ )界面,当激光折射进入包层的光线  $CG$  与包层法线呈  $90^\circ$ 角时,激光发生全反射,从而使得光线在光纤中不断反射传播。已知灵敏度  $S$  的表达式如下:

$$S = \Delta\varphi_{p,s} / \Delta n \quad (1)$$

式中,  $\Delta\varphi_{p,s}$  表示  $p$  光、 $s$  光的总相位差,即待测液体所

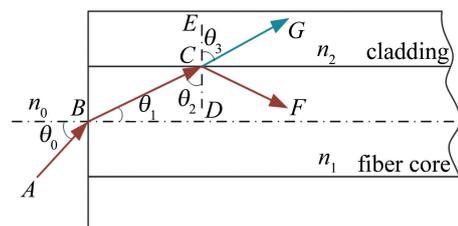


图 1 光纤导光示意图

Fig. 1 Diagram of optical fiber conducting light

对应的  $p$ 、 $s$  分量的相位差值与蒸馏水的  $p$ 、 $s$  分量的相位差值之间的变化量;  $\Delta n$  为待测液体的折射率变化量。  $S$  的值越大表示传感器的灵敏度越高。而  $p$ 、 $s$  光的总相位差的表达式为:

$$\Delta\varphi_{p,s} = m(\varphi_p - \varphi_s) \quad (2)$$

式中,  $\varphi_p$ 、 $\varphi_s$  分别为  $p$ 、 $s$  光的相位;  $m$  为全反射次数。其中全反射次数的表达式为:

$$m = L / (2d \tan\theta) \quad (3)$$

式中,  $L$  表示整个传感区域的长度;  $d$  表示纤芯直径;  $\theta$  为入射角。

由(1)式可知,  $p$ 、 $s$  光的总相位差越小,传感器灵敏度  $S$  值越小;由(2)式可知,全反射次数越少,  $p$ 、 $s$  光的总相位差越小;由(3)式可知,纤芯直径越大,全反射次数越少。因此传感器的相位响应度越小,即传感器的灵敏度越低。本文中通过实验验证了光纤直径对灵敏度的影响。

为了探究不同溶液、不同质量分数及不同纤芯直径下,相位调制的光纤 SPR 折射率传感器的灵敏度,分别测量了甘油、蔗糖、氯化钠 3 种物质在不同质量分数时的相位差以及相位差对应的折射率。

本文中的测量系统采用双频激光外差干涉相位测量光路结合光纤型 SPR 传感器的测量系统,光路见图 2。

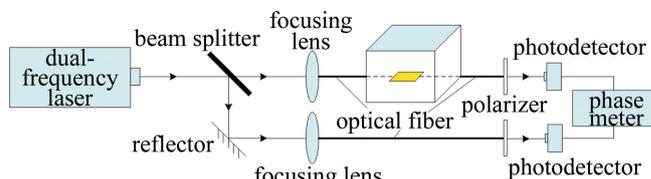


图 2 测量系统光路图

Fig. 2 Optical path diagram of measurement system

由双频氦氖激光器发射出波长为 632.8 nm 的  $s$  偏振光和  $p$  偏振光,进入分光镜,经过分光镜后激光被分为两个部分,并且两个部分均含有  $s$  偏振光和  $p$  偏振光。一部分光进入聚焦透镜后通过光纤到达待检测溶液,在传感区域发生等离子共振,随后通过光纤作为测量信号经光电检测器进入相位卡中;另一部分作为参考信号经分光镜折射进入聚焦透镜,通过光纤进入

光电检测器进入相位卡。具体实验原理及步骤请参见参考文献[3]。

参考信号及测量信号的数学表达式分别如下：

$$I_1 = I_{01} \{ \cos [ 2\pi(f_p - f_s)t ] + \varphi_{p,01} - \varphi_{s,01} \} \quad (4)$$

$$I_2 = I_{02} \{ \cos [ 2\pi(f_p - f_s)t ] + \varphi_{p,02} - \varphi_{s,02} + \Delta\varphi_{p,s} \} \quad (5)$$

式中,  $I_1, I_2$  分别为参考信号与测量信号的光强;  $I_{01}, I_{02}$  分别为参考信号与测量信号光强的最大值;  $f_p, f_s$  分别为  $p$  偏振光和  $s$  偏振光的频率;  $(\varphi_{p,01} - \varphi_{s,01})$  与  $(\varphi_{p,02} - \varphi_{s,02})$  为参考信号的  $p, s$  偏振光的相位初始差值与测量信号的  $p, s$  偏振光的相位初始差值, 两者之间的相位初始差值可表示为  $(\varphi_{p,02} - \varphi_{s,02}) - (\varphi_{p,01} - \varphi_{s,01})$ , 且为固定量。溶液相位解调过程即研究溶液折射率  $n$  与相位差  $\Delta\varphi_{p,s}$  之间的关系。

因此传感器的测量公式为：

$$n = \Delta\varphi_{p,s} / S + 1.333 \quad (6)$$

折射率在 1.333~1.336 区间时, 相位差与折射率呈线性关系, 即折射率在该区间时, 折射率不同情况下所对应的相位数据采集卡的数据也不相同。为满足折射率区间要求, 在实验开始前, 先使用阿贝折射仪对待测溶液进行折射率测量。同时, 研究光纤 SPR 传感器在测量不同溶液的灵敏度时, 为满足控制变量法, 实验中所采用的溶液质量分数不仅满足测量系统的折射率要求, 且各溶液不同质量分数所对应的折射率都趋于相同(由于实验中不可控因素较多, 不能保证各溶液折射率完全相同), 因此, 各待测溶液所选的质量分数区间均不一样。

当待测光路与参考光路的相位差处于稳定时, 为保证实验数据的可靠性及普遍性, 将相位数据采集卡设置为每 5 s 进行一次数据采集, 共采集 25 次。为保证实验数据的可靠性, 当蒸馏水的相位差数据采集结束后, 往传感区域注入待测溶液, 使测量质量分数达到设置的质量分数, 随即继续进行测量。

## 2 不同纤芯直径下光纤 SPR 传感器的稳定性

实验中分别采用了纤芯直径为 300  $\mu\text{m}$  与 400  $\mu\text{m}$  的光纤, 对甘油、蔗糖和氯化钠进行了测量。研究激光在不同纤芯直径下对测量精度的影响, 得到不同质量分数对应的测量与参考信号的相位差均值以及相位差标准差。由图 3 可知, 纤芯直径为 300  $\mu\text{m}$  时, 3 种溶液的相位差标准差最大分别为 0.145°, 0.145° 和 0.125°, 而纤芯直径为 400  $\mu\text{m}$  时, 3 种溶液的相位差标准差最大分别为 0.150°, 0.164° 和 0.168°。所对应的溶

液间, 纤芯直径为 300  $\mu\text{m}$  的光纤 SPR 传感器的相位差标准差均小于纤芯直径为 400  $\mu\text{m}$  的光纤 SPR 传感器。因此纤芯直径为 300  $\mu\text{m}$  时, 测量的稳定性更好。

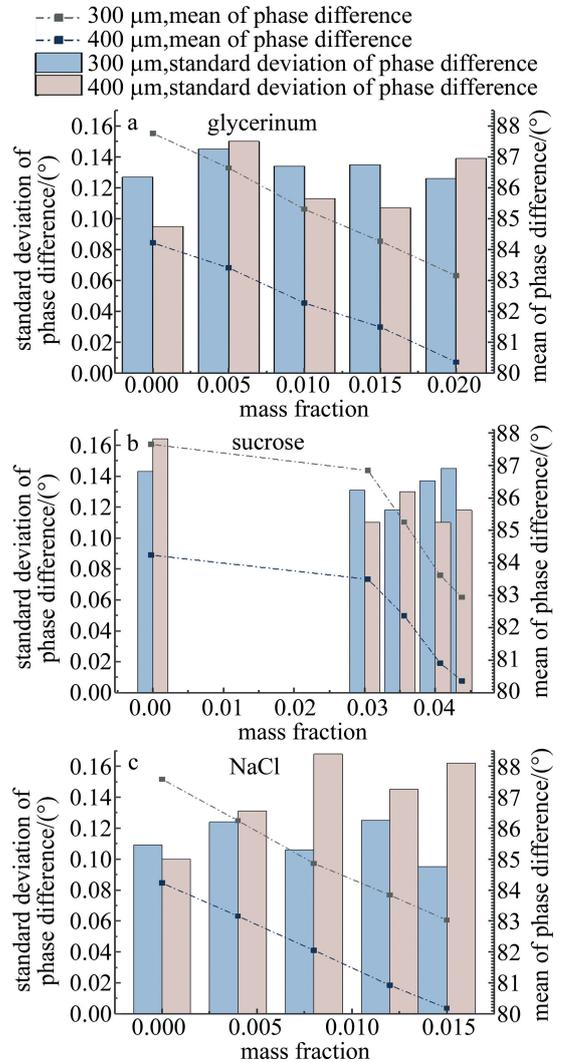


图 3 不同溶液的质量分数与相位差均值、相位差标准差之间的关系  
Fig. 3 Relationship between mass fraction of different solutions & mean of phase difference and standard deviation of phase difference

将各溶液不同质量分数对应的测量与参考信号的相位差及实验前使用阿贝折射仪测量的折射率进行线性拟合, 如图 4 所示。由于拟合线段距离较近, 拟合得到的方程按照图例顺序放置。由图 4 可知, 纤芯直径为 300  $\mu\text{m}$  时, 甘油、蔗糖、氯化钠 3 种溶液的拟合线段方程分别为:  $y = -1655x + 2293$ ,  $y = -1647x + 2283$ ,  $y = -1581x + 2195$ 。其中,  $x$  表示阿贝折射仪测量得到的折射率;  $y$  表示系统测量的相位差。

由(1)式以及上述方程可知, 甘油、蔗糖、氯化钠每变化一个折射率单位 (refractive index unit, RIU), 相应的相位改变量即相位响应度, 分别为: 1655°/RIU, 1647°/RIU 和 1581°/RIU。由图 3 可知, 纤芯直径为

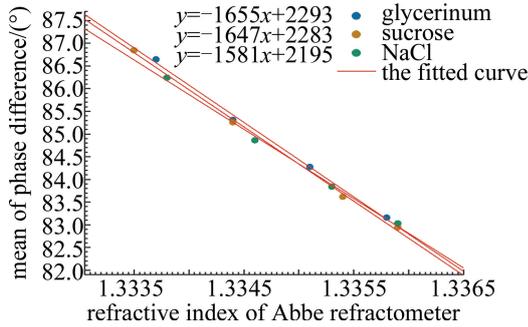


图4 纤芯直径为 300  $\mu\text{m}$  时,相位差均值与阿贝折射仪折射率的线性拟合图

Fig. 4 Linear fitting diagram of mean of phase difference & refractive index of Abbe refractometer with core diameter of 300  $\mu\text{m}$

300  $\mu\text{m}$  时,甘油、蔗糖、氯化钠溶液质量分数为 0,即初始相位差分别为:87.763°,87.561°和 87.581°。根据(6)式可知,甘油、蔗糖、氯化钠 3 种溶液当纤芯直径为 300  $\mu\text{m}$  时的测量公式分别为:

$$n = \frac{\Delta\varphi - 87.763}{-1655} + 1.333 \quad (7)$$

$$n = \frac{\Delta\varphi - 87.651}{-1647} + 1.333 \quad (8)$$

$$n = \frac{\Delta\varphi - 87.581}{-1581} + 1.333 \quad (9)$$

式中, $n$  为待测溶液折射率, $\Delta\varphi$  为待测介质的相位差。

应用上述相同的方式,对纤芯直径为 400  $\mu\text{m}$  的传感器的相位差与阿贝折射仪测量得到的折射率进行线性拟合,如图 5 所示。甘油、蔗糖、氯化钠 3 种溶液的拟合线段方程分别为: $y = -1376x + 1918$ 、 $y = -1369x + 1910$ 、 $y = -1415x + 1970$ 。甘油、蔗糖、氯化钠的相位响应度分别为:1376°/RIU、1369°/RIU、1415°/RIU。3 种溶液对应的相位响应度均小于 300  $\mu\text{m}$  时的相位响应度。

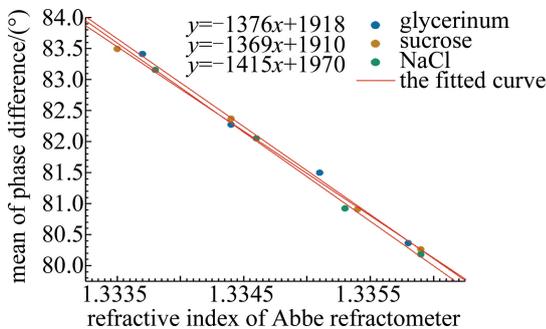


图5 纤芯直径为 400  $\mu\text{m}$  时,相位差均值与阿贝折射仪折射率的线性拟合图

Fig. 5 Linear fitting diagram of mean of phase difference & refractive index of Abbe refractometer with core diameter of 400  $\mu\text{m}$

纤芯直径为 400  $\mu\text{m}$  时,甘油、蔗糖、氯化钠溶液质量分数为 0,即初始相位差分别为:84.22°、84.241°、

84.23°。根据(6)式可知,甘油、蔗糖、氯化钠 3 种溶液当纤芯直径为 400  $\mu\text{m}$  时的测量公式分别为:

$$n = \frac{\Delta\varphi - 84.22}{-1376} + 1.333 \quad (10)$$

$$n = \frac{\Delta\varphi - 84.241}{-1369} + 1.333 \quad (11)$$

$$n = \frac{\Delta\varphi - 84.23}{-1415} + 1.333 \quad (12)$$

### 3 不同溶液及纤芯直径下光纤 SPR 传感器的灵敏度

为验证纤芯直径越小,光纤 SPR 传感器的灵敏度越高。使用(7)式~(9)式分别计算了纤芯直径为 300  $\mu\text{m}$  时各相位差均值所对应的折射率,使用(10)式~(12)

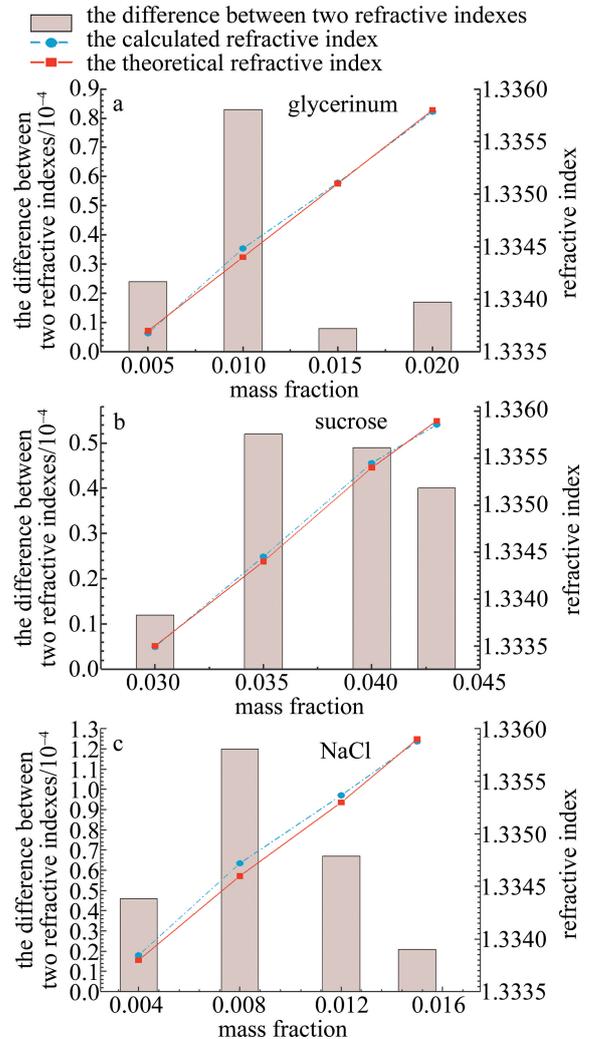


图6 纤芯直径为 300  $\mu\text{m}$  时,不同溶液的不同质量分数和折射率实测值、理论值以及两者差值之间的关系

Fig. 6 With core diameter of 300  $\mu\text{m}$ , relationship between different mass fraction of different solutions & the calculated refractive index, the theoretical refractive index and the difference of two indexes

式分别计算了纤芯直径为 400 μm 时各相位差均值所对应的折射率,并用得到的值对纤芯直径为 300 μm 和 400 μm 的光纤 SPR 传感器灵敏度进行了比较。

图 6 为纤芯直径为 300 μm 时,甘油、蔗糖、氯化钠 3 种溶液在不同质量分数下,通过测量得到的相位差计算后所对应的折射率与通过阿贝折射仪标定的折射率理论值,以及两值之间的差(由于阿贝折射仪的测量精度为 10<sup>-4</sup>,测量系统分辨率达 10<sup>-5</sup> 量级,实验得到的差值有 10<sup>-5</sup> 量级的误差)。由图 6a 可知,甘油所产生的差值最大为 0.83×10<sup>-4</sup>;由图 6b 可知,蔗糖所对应的差值最大为 0.52×10<sup>-4</sup>;由图 6c 可知,当氯化钠所对应的差值最大为 1.2×10<sup>-4</sup>。由此可见,测量蔗糖时的精度最高。

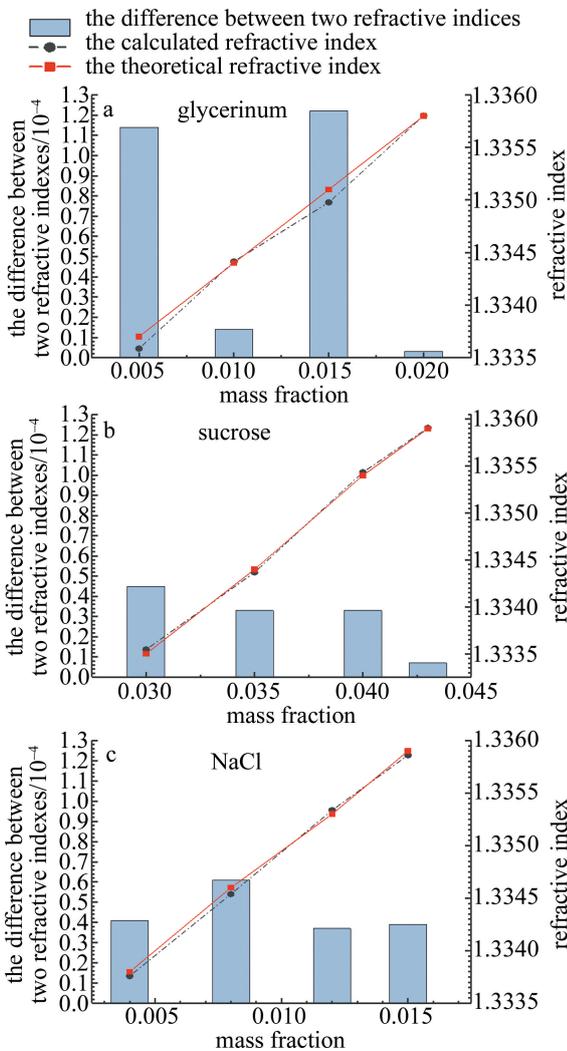


图 7 纤芯直径为 400 μm 时,不同溶液的不同质量分数和折射率实测值、理论值以及两者差值之间的关系

Fig. 7 With core diameter of 400 μm, relationship between different mass fraction of different solutions & the calculated refractive index, the theoretical refractive index and the difference of two indexes

图 7 为纤芯直径为 400 μm 时,甘油、蔗糖、氯化钠 3 种溶液在不同质量分数下,计算得到的折射率与阿贝折射仪的标定值,以及两值之间的差值。甘油、蔗糖、氯化钠的最大差值分别为 1.22×10<sup>-4</sup>,0.45×10<sup>-4</sup> 和 0.61×10<sup>-4</sup>。测量蔗糖的精度相对最高。

将 300 μm 和 400 μm 折射率计算值与阿贝折射仪标定值的差值最大值进行比较,可知 300 μm 的光纤精度更高。由图 8 可知,3 种溶液的质量分数与折射率之间的关系式分别为:  $y=0.0014x+1.333$  (甘油溶液),  $y=0.00187x+1.333$  (蔗糖溶液),  $y=0.00189x+1.333$  (氯化钠溶液),其中  $x$  表示质量分数, $y$  表示折射率。

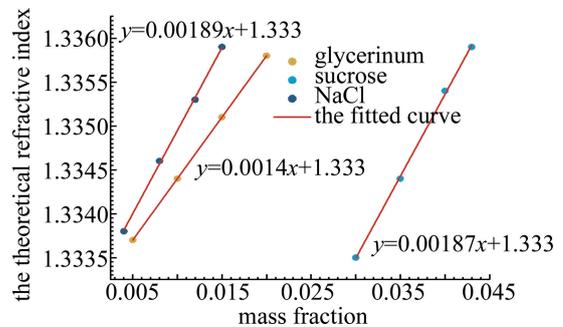


图 8 甘油、蔗糖、氯化钠的质量分数和理论折射率的线性拟合图  
Fig. 8 Linear fitting diagram of mass fraction and the theoretical refractive index of glycerinum, sucrose and NaCl

#### 4 结果与讨论

由图 6 和图 7 可知,相对于 400μm 的直径,纤芯直径为 300μm 时,光纤 SPR 传感器灵敏度更高。其原因可由(1)式~(3)式与图 1 解释,纤芯直径越大,全反射次数越少, $p$  光、 $s$  光的总相位差越小,使得灵敏度越小。因此纤芯直径越小,测量的精度越高。

进一步比较图 6 中甘油、蔗糖、氯化钠 3 种溶液的实验测量值与阿贝折射仪的标定值的差值,可知相对分子质量较大的蔗糖精度更高。这是由于相对分子质量越大,所携带电荷越多,表面等离子体越多,促进 SPR 现象的产生,因此分子量较大的溶液,测量精度更高。

此外,比较图 3 中甘油、蔗糖、氯化钠 3 种溶液的测量稳定性,可知密度较高的氯化钠溶液的稳定性最高。这是由于介电常数表示物质保持电荷的能力,物质的密度越大,表征单位空间内电性子总量越多,同时介电常数越大,即物质保持电荷的能力越强。当发生表面等离子体共振时,使倏逝波能量保持稳定,此时反射波的能量也稳定。因此在实验中,当密度越大时,测量的稳定性更高。

## 5 结论

在光纤 SPR 传感器适用的折射率范围内,分别使用纤芯直径为 300  $\mu\text{m}$  和 400  $\mu\text{m}$  的光纤 SPR 对不同质量分数的甘油、蔗糖、氯化钠溶液进行了测量实验。结果表明,纤芯直径越小,传感器灵敏度越高;密度越大,测量稳定性越高,相位差标准差最大为 0.145°;分子量越大,测量精度越高,其中,测量中分子量较大的蔗糖,精度相较于另外两种溶液更高,其测量结果与阿贝折射仪标定结果之间的差值最大为  $0.52 \times 10^{-4}$ ,并通过上述实验浅析了各溶液质量分数与折射率之间的关系。

### 参 考 文 献

- [1] SUN D F, LIU P. Solution concentration measurement system based on optical fiber spectrometer[J]. Physical Experiment of College, 2019, 32(3): 82-85(in Chinese).  
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.
- [2] WANG Q. Preparation and performance of surface plasmon resonance sensor based on fiber optics[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019: 3-5(in Chinese).  
王旗.基于光纤表面等离子共振传感器的制备及性能研究[D].南京:南京邮电大学,2019:3-5.
- [3] CHEN Q H, LIU J H, LUO H F, *et al.* Refractive index measurement system of liquid based on surface plasmon resonance[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0512002(in Chinese).  
陈强华,刘景海,罗会甫,等.一种基于表面等离子共振的液体折射率测量系统[J].光学学报,2015,35(5):0512002.
- [4] WU Sh K. Principle and development of surface plasmon resonance sensors[J]. Imaging Science and Photochemistry, 2017, 35(1): 15-25(in Chinese).  
吴世康.表面等离子共振传感器的原理与进展[J].影像科学与光化学,2017,35(1):15-25.
- [5] ZHENG X Y, LIU Y, JIA X R, *et al.* Application of surface plasmon resonance technology in drug research[J]. Journal of Pharmaceutical Research, 2021, 40(3): 196-198(in Chinese).  
郑曦妍,刘宇,贾锡荣,等.表面等离子体共振技术在药物研究中的应用[J].药学研究,2021,40(3):196-198.
- [6] LI Y, ZHONG J G, ZHANG Y L, *et al.* Surface plasmon resonance imaging biochip detection system[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(12): 2290-2293(in Chinese).  
李莹,钟金钢,张永林,等.表面等离子体共振成像生物芯片检测系统[J].光子学报,2007,36(12):2290-2293.
- [7] LI Y, LIU X, LIN Zh. Recent developments and applications of surface plasmon resonance biosensors for the detection of mycotoxins in foodstuffs[J]. Food Chemistry, 2012, 132(3): 1549-1554.
- [8] WOOD R W. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum[J]. Philosophical Magazine, 1902, 4(19/24): 396-402.
- [9] FANO U. The theory of anomalous diffraction gratings and of quasi-stationary waves on metallic surfaces (Sommerfeld's waves)[J]. Journal of the Optical Society of America, 1941, 31(3): 213-222.
- [10] OTTO A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection[J]. A Journal of Physical Sciences, 1968, 216(4): 398-410.
- [11] KRETSCHMANN E, RAETHER H. Radiative decay of non radiative surface plasmons excited by light[J]. A Journal of Physical Sciences, 1968, 23(12): 2135-2136.
- [12] ZHANG L M, UTTAMCHANDANI D. Optical chemical sensing employing surface plasmon resonance[J]. Electronics Letters, 1988, 24(23): 1469-1470.
- [13] WEI T X, DING Y H. A new method for the detection of salicylic acid based on surface plasmon resonance technology[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(6): 647-650(in Chinese).  
韦天新,丁永红.基于表面等离子体共振技术检测水杨酸的新方法[J].北京理工大学报,2016,36(6):647-650.
- [14] DOMÍNGUEZ-VEGA E, HASELBERG R, van IPEREN D, *et al.* Development of a surface plasmon resonance sensor for coupling to capillary electrophoresis allowing affinity assessment of protein mixture components[J]. Sensors & Actuators, 2018, B254: 1040-1047.
- [15] FARKA Z, JURÍK T, PASTUCHA M, *et al.* Enzymatic precipitation enhanced surface plasmon resonance immunosensor for the detection of salmonella in powdered milk[J]. Analytical Chemistry, 2016, 88(23): 11830-11836.
- [16] GUO Y, LIU R, LIU Y, *et al.* A non-competitive surface plasmon resonance immunosensor for rapid detection of triazophos residue in environmental and agricultural samples[J]. Science of the Total Environment, 2017, 613/614: 783-791.
- [17] DIAO W, TANG M, DING S, *et al.* Highly sensitive surface plasmon resonance biosensor for the detection of HIV-related DNA based on dynamic and structural DNA nanodevices[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2017, 100: 228-234.
- [18] BO L, NYLANDER C, LUNSTRÖM I. Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing[J]. Sensors & Actuators, 1983, 4(2): 299-304.
- [19] ZHANG M C. Sensor based on fiber surface plasmon resonance technology[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017: 40-41(in Chinese).  
张孟策.基于光纤表面等离子体共振技术的传感器研究[D].北京:北京理工大学,2017:40-41.
- [20] CHEN Q H, HAN W Y, KONG X Y, *et al.* Detection of solution refractive index variation based on optical fiber surface plasmon resonance[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0804003(in Chinese).  
陈强华,韩文远,孔祥悦,等.基于光纤表面等离子体共振检测溶液折射率变[J].中国激光,2020,47(8):0804003.