

基于入射角扫描方式的大量程绝对折射率传感方法

方宇^{1,2}, 吴晓静³, 刘中法^{1,2}, 付饶^{1,2}, 朱思伟³, 刘筠³, 杨勇^{1,2*}¹南开大学现代光学研究所, 天津 300350;²天津市微尺度光学信息技术科学重点实验室, 天津 300350;³南开大学人民医院转化医学研究院, 天津 300121

摘要 针对石墨烯基的折射率传感系统中存在的大量程和高测量灵敏度无法兼得且仅能实现相对折射率测量的问题,提出了一种基于全内反射式的大量程绝对折射率测量方法。该方法仅通过一维线性运动,实现了大范围角度的精确调控。利用光学 $4f$ 系统,保证了采样点位置不随入射角的变化而变化。不同入射角下的扫描测量方法的折射率测量范围理论上可以达到 $1\sim 1.5168$,通过对不同质量分数的氯化钙溶液的折射率进行测量,从实验上获得 7.203×10^{-4} RIU 的测量灵敏度。

关键词 材料; 全内反射; 入射角扫描; 绝对折射率; 大量程; 石墨烯

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0816001

Large-Range Absolute Refractive Index Sensing Method Based on Incident Angle Scanning

Fang Yu^{1,2}, Wu Xiaojing³, Liu Zhongfa^{1,2}, Fu Rao^{1,2}, Zhu Siwei³,
Liu Jun³, Yang Yong^{1,2*}¹*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China;*²*Tianjin Key Laboratory of Micro-Scale Optical Information Science and Technology, Tianjin 300350, China;*³*Institute of Translational Medicine, Nankai University, Tianjin 300121, China*

Abstract In a graphene-based refractive index sensing system, the large range and high measurement sensitivity cannot be achieved simultaneously, and only the relative refractive index can be measured. In this study, a large-range absolute refractive index measurement method based on total internal reflection is proposed, which realizes the accurate regulation of a wide range of angles only through one-dimensional linear motion. The optical $4f$ system ensures that the position of the sampling point does not change with the incident angle. By the scanning measurement method at different incident angles, the measurement range of the refractive index can reach $1\sim 1.5168$ in theory. Through the refractive index measurement of calcium chloride solution with different mass fraction, the measurement sensitivity obtained in experiments is 7.203×10^{-4} RIU.

Key words materials; total internal reflection; scanning of incident angle; absolute refractive index; large range; graphene

1 引言

折射率是一个重要的物理参数,可以精确地反映物质状态的变化,通过折射率传感技术可以测量

出样品折射率随环境的微小变化,因此在物质成分、材料性质以及诸如温度压力等物理量变化的探测领域具有重要的应用价值^[1-5]。常见的光学折射率传感技术有光纤折射率传感技术^[1,6]、表面等离子体

收稿日期: 2021-10-21; 修回日期: 2021-11-08; 录用日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(12074203, 12174103, 12174104)、广东省基础与应用基础研究基金(2020B301030009)

通信作者: *yangyong@nankai.edu.cn

极化折射率传感技术^[7]等。近年来,人们发现了石墨烯材料具有偏振选择吸收效应^[8],在全内反射条件下,石墨烯对横电(TE)模式和横磁(TM)模式光的吸收有明显的差异,并且该差异对被测介质的折射率变化值敏感。利用该原理,人们发展了石墨烯基的折射率传感技术^[9],由于石墨烯具有优异的化学、物理特性,以及生物低毒害性,该技术在气体成分检测^[10]、生物传感^[11]等领域得到广泛的应用。相比于光纤折射率传感技术和表面等离子体极化折射率传感技术,石墨烯基的折射率传感技术具有灵敏度高、结构简单、成本低等特点,近年来备受关注^[12-13]。

上述所提到的折射率传感技术均工作在全内反射条件下,为了实现高测量灵敏度,需要根据被测介质折射率将入射角控制在一个很小的范围内^[14]。然而,被测介质的折射率变化较大会破坏上述测量条件,导致测量灵敏度下降。因此,大动态范围和高灵敏度往往很难兼得^[14]。为了解决该问题,在光纤折射率传感技术和表面等离子体极化折射率传感技术中,人们引入宽谱光源和光谱探测技术^[15-16],但受限于光源的谱宽和光谱仪的分辨能力,获得更大的动态范围和更高的灵敏度依然是人们追求的目标。在石墨烯基的折射率传感系统中,探测光的入射角在临界角附近时,探测灵敏度最高^[17]。为了获得高探测灵敏度,待测介质的折射率变化范围应很小,这严重限制了其应用范围。传统的折射率传感技术仅能实现相对折射率的检测,而绝对折射率的测量方法如干涉法、阿贝折射仪、光学折射法等灵敏度不是很高,且易受温度的影响^[18-20]。

为了解决上述问题,本文通过改变探测光的入射角,使其随被测介质折射率的变化而变化,并始终满足在临界角附近进行探测的条件,这样既可以实现大动态范围,又可保持高探测灵敏度。提出了一种光学探测系统,仅通过一维线性运动,实现了大范围角度的精确调控。利用光学 $4f$ 系统,保证了采样点位置不随入射角的变化而变化,并解决了全内反射测量系统中光线位置变化导致的光学系统中器件调整问题。此外,利用精确角度扫描的优势,可以实现对被测介质折射率绝对值的测量,克服传统折射率传感技术仅能实现相对折射率测量的缺点。

2 大量程绝对折射率传感方法及原理

2.1 石墨烯偏振选择吸收特性

入射光从光密介质传播到光疏介质时,会在介

质界面处发生折射与反射,当入射角度刚好等于全反射临界角时,只存在反射光^[21],此时介质的界面处产生倏逝波,倏逝波的相位沿着介质界面方向传播,且振幅沿着垂直界面的方向衰减,倏逝波仅存在于被穿透的介质中靠近界面附近很薄的一层内^[22]。为了验证石墨烯的偏振选择吸收差异,建立了一种图 1 所示的 BK7-石墨烯-待测样品三层结构。

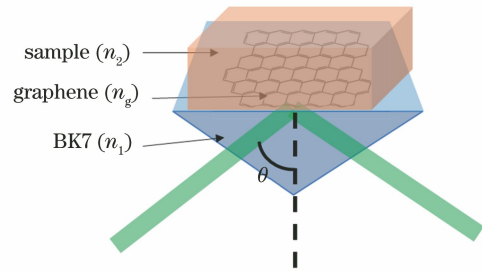


图 1 BK7-石墨烯-待测样品三层结构

Fig. 1 Three-layer structure of BK7-graphene-sample to be tested

下面将根据菲涅耳公式和多层膜耦合理论^[23],计算石墨烯在全内反射系统中的偏振吸收差异。设 r_1 为直角棱镜(BK7)与石墨烯交界面的反射系数, r_2 为石墨烯与待测样品交界面的反射系数, θ 为入射角, θ_1 为入射光从 BK7 到石墨烯的折射角, θ_2 为入射光从石墨烯到待测样品的折射角, n_1 为 BK7 的折射率, n_g 为石墨烯的折射率, n_2 为待测样品的折射率。TE 模式电磁波的反射系数^[23]为

$$\begin{cases} r_1 = \frac{n_1 \cos \theta - n_g \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta + n_g \cos \theta_1} \\ r_2 = \frac{n_g \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_g \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \end{cases}, \quad (1)$$

TM 模式电磁波的反射系数为

$$\begin{cases} r_1 = \frac{n_g \cos \theta - n_1 \cos \theta_1}{n_g \cos \theta + n_1 \cos \theta_1} \\ r_2 = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_g \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_g \cos \theta_2} \end{cases}, \quad (2)$$

整个模型的反射率为

$$R = |r|^2 = \left| \frac{r_1 + r_2 \exp(2i\beta)}{1 + r_1 r_2 \exp(2i\beta)} \right|^2, \quad (3)$$

式中: r 为整个模型的总反射系数; β 为层间的相位传递因子^[23], β 的公式为

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_g d_0 \cos \theta_1, \quad (4)$$

式中: d_0 为石墨烯层的厚度,取 10 层石墨烯, $d_0 = 3.4 \text{ nm}$; λ 为光波长。石墨烯的折射率^[24-25]为

$$n_g = n_0 + i\kappa, \quad (5)$$

式中： n_0 表示折射率的实部，决定了石墨烯的折射； κ 为折射率的虚部，也称为消光系数，决定了石墨烯的吸收^[25]。

基于以上理论，用 MATLAB 模拟得到不同偏振态的入射光反射率与入射角的关系曲线，如图 2 所示。模拟参数 $n_1 = 1.15168$, $n_2 = 1.3330$, $d_0 =$

3.4 nm , $n_g = 2.6 + 1.3i$, $\lambda = 532 \text{ nm}$ 。

图 2(a) 为三层结构的 BK7-石墨烯待测样品的反射率随入射角的变化曲线，可以看出系统对 TE 模式电磁波的吸收远大于 TM 模式；图 2(b) 是两层结构 BK7 待测样品的反射率曲线，没有发现图 2(a) 所示的样品对 TE 模式和 TM 模式电磁波的偏振吸收差异，因此可以得到是石墨烯造成了这种差异。

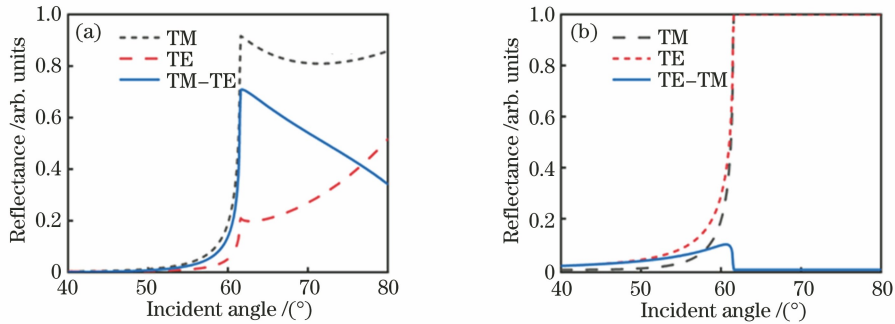


图 2 反射率曲线。(a) BK7-石墨烯-待测样品三层结构；(b) BK7-待测样品两层结构

Fig. 2 Reflectance curves. (a) Three-layer structure of BK7-graphene-sample to be tested; (b) two-layer structure of BK7-sample to be tested

2.2 入射光角度精准调节方法及装置

待测介质的折射率变化时，全反射临界角也会产生变化。为了找到灵敏度的最佳位置，当待测介质的折射率变化时，要相应地调整入射角。然而，传统的全内反射实验系统的搭建完成后，调整入射光的角度会导致反射光线位置的变化，相应地，须对其

他光学器件的位置进行调整，调整过程繁琐。为此，提出了一种光学反射系统的入射光角度精准调节方法及装置，仅通过一维线性运动即可实现探测光入射角的精确调整，调整过程中无需调整光学器件的位置。入射光角度精准调节原理图如图 3 所示。

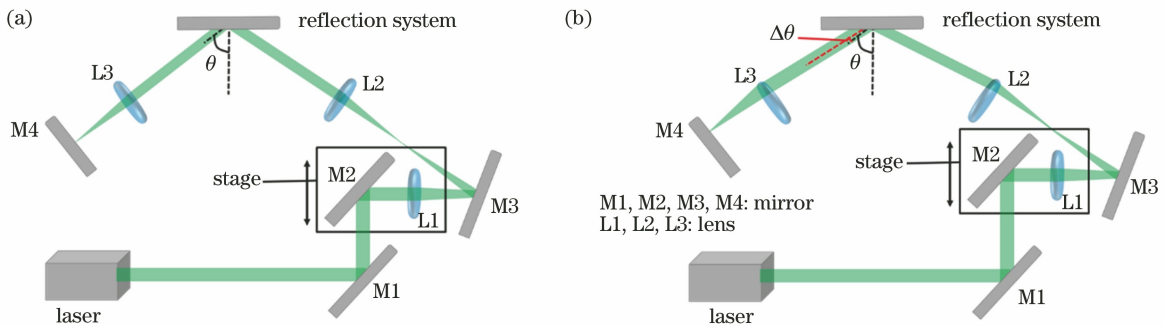


图 3 光学反射系统的入射光角度精准调节装置。(a) 角度调节前；(b) 角度调节后

Fig. 3 Accurate adjustment devices for incident light angle of optical reflection system.

(a) Before angle adjustment; (b) after angle adjustment

图 3 中 M1、M2、M3、M4 为平面反射镜，L1、L2、L3 为双凸透镜，stage 为一维平移台，由激光器输出的准直光经过反射镜 M1 和 M2 的反射，入射到透镜 L1，其中 M2 和 L1 固定在一维平移台上。由透镜 L1 透射的光线经过反射镜 M3 的反射，入射到透镜 L2，其中，透镜 L1 的焦点与透镜 L2 的焦点重合。准直光束依次经过透镜 L1 和 L2，由于 L1 的焦点与 L2 的焦点重合，从 L2 的透射光线为准直

光束，该光束与反射系统的法线夹角为入射角。透镜 L2 与透镜 L3 的焦点重合，且焦点位于反射系统的反射点处。反射镜 M4 位于透镜 L3 的焦面上，且反射镜 M4 与透镜 L1 和 L2 的共焦面共轭。从透镜 L3 透射的光束会聚在反射镜 M4 表面，并由反射镜 M4 反射后原路返回，经过透镜 L3 的透射光束为准直光束，其第二次经过反射系统，且反射点为原入射位置。

改变入射到反射系统表面的入射角是通过控制一维平移台的移动实现的,如图 3(a)中箭头所示。当平移台沿箭头方向往复移动时,经过透镜 L1 的光束会聚在透镜 L1 和 L2 的共焦面上,且焦点的位置会随平移台的移动在共焦面上移动,且光轴与透镜 L2 的主平面垂直。由于透镜 L2 是固定的,所以经过透镜 L2 的光束的光轴必定经过 L2 的焦点,即在反射系统表面的入射点,又由于经过 L2 之前的光束在 L2 前焦面会聚,所以经过 L2 的光束为准直光。经过反射系统表面反射的光束经过透镜 L3,由于反射系统表面的入射点在透镜 L3 的焦点上,所

以从透镜 L3 透射的光束的光轴必垂直于反射镜 M4 表面;由于 M4 位于透镜 L3 的焦面上,光线会聚在 M4 表面,并经 M4 反射后原路返回。综上所述可以看出,利用平移台的移动可以实现入射到反射系统表面的入射角的调整,且入射点的位置始终保持不变。由于光束原路返回,所以在平移台的移动过程中,无需调整任何光学器件。图 3(b)为入射光角度经调节后的装置图。

2.3 基于石墨烯的大量程绝对折射率传感系统

依据上述原理搭建了石墨烯折射率传感系统,系统原理图如图 4 所示。

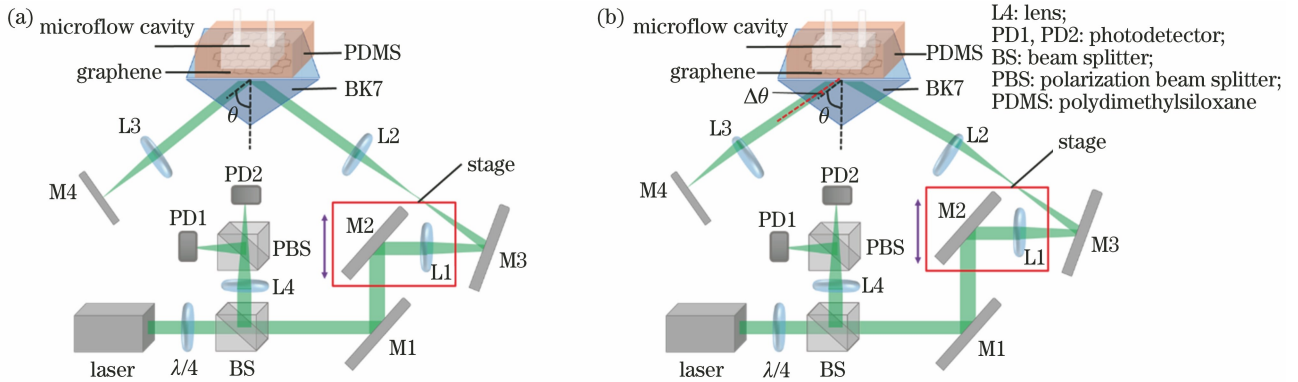


图 4 基于石墨烯的大量程绝对折射率传感系统。(a)角度调节前;(b)角度调节后
Fig. 4 Large range absolute refractive index sensing system based on graphene.

(a) Before angle adjustment; (b) after angle adjustment

图 4 是基于石墨烯的大量程绝对折射率传感系统,激光器(Laser Quantum, Ventus 532)输出波长为 523 nm 的准直光束,准直光束经过 1/4 波片后变为圆偏振光,经过分光棱镜(BS)的透射后被反射镜(M1)反射到一维平移台(stage),再经平移台上的反射镜(M2)反射到双凸透镜(L1, 焦距 $f = 120 \text{ mm}$),光束经双凸透镜(L1)聚焦、反射镜(M3)反射后会聚于 L1 和双凸透镜(L2, $f = 60 \text{ cm}$)的共焦面上,再经 L2 后到达传感系统。传感系统由棱镜、石墨烯(化学气相沉积法制得 10 层)、微流腔(PDMS)组成,微流腔接入两导管,注入待测样品。光经棱镜发生全反射后,反射光由双凸透镜(L3, $f = 60 \text{ mm}$)聚焦后到达反射镜(M4),再经 M4 原路返回。返回的光信号由 BS 反射并进入差分探测系统(PD1、PD2),再经计算机处理得到差分信号。一维平移台由计算机控制,可以记录移动的距离。根据前文的分析,通过控制一维平移台的移动可以控制全内反射装置的入射角度的变化。图 4(b)为入射角度调整后的装置图。

一维平移台移动距离与入射角度对应关系的计

算方法如下。

设图 4(a)中 L2 和 L3 的焦距均为 f ,可以算出光线平移距离与角度满足

$$\tan \theta_v = \frac{d}{f}, \quad (6)$$

式中: θ_v 为入射光线或反射光线角度的变化量; d 为平移台移动的距离; f 为 L2 和 L3 双凸透镜的焦距,对等式两边取微分,可得

$$\frac{1}{\cos^2 \theta_v} \Delta \theta = \frac{1}{f} \Delta d, \quad (7)$$

式中: Δd 为平移台移动距离的微小变化量; $\Delta \theta$ 为入射光或反射光角度的微小变化量,可以表示为

$$\Delta \theta = \frac{\cos^2 \theta_v}{f} \Delta d, \quad (8)$$

在光路的近轴区域,有 $\cos^2 \theta_v \approx 1$,可以近似得到光线平移距离与角度的变化满足

$$\Delta \theta \approx \frac{1}{f} \Delta d. \quad (9)$$

2.4 绝对折射率的计算

不同的物质具有不同的折射率,同一种物质在温度、气压、光波长、浓度不同时,折射率也会产生变

$$\Delta\theta' = \frac{\cos(\theta_0 + \Delta\theta_0 - 45^\circ)}{\sqrt{n_1^2 - \sin^2(\theta_0 + \Delta\theta_0 - 45^\circ)}} \Delta\theta. \quad (17)$$

待测介质的折射率最终可以表示为

$$n_2 = n_1 \cos \theta_w \Delta\theta' + n_w = n_1 \cos \theta_w \frac{\cos(\theta_0 + \Delta\theta_0 - 45^\circ)}{\sqrt{n_1^2 - \sin^2(\theta_0 + \Delta\theta_0 - 45^\circ)}} \times \left\{ \arctan \left[\frac{\Delta d}{f} + \tan(\Delta\theta_0) \right] - \Delta\theta_0 \right\} + n_w. \quad (18)$$

用去离子水标定后, (18) 式中多项都为常数, 可以简化为

$$n_2 = n_1 \cos \theta_w \Delta\theta' + n_w = a \left[\arctan \left(\frac{\Delta d}{f} + b \right) - c \right] + n_w, \quad (19)$$

其中

$$a = n_1 \cos \theta_w \frac{\cos(\theta_0 + \Delta\theta_0 - 45^\circ)}{\sqrt{n_1^2 - \sin^2(\theta_0 + \Delta\theta_0 - 45^\circ)}}, \quad (20)$$

$$b = \tan(\Delta\theta_0), \quad (21)$$

$$c = \Delta\theta_0. \quad (22)$$

反射信号到达峰值时平移台移动距离与折射率的变化关系如图 7 所示, 结合 (19) 式可以看出, 平移台的移动距离与折射率的变化关系是非线性关系。

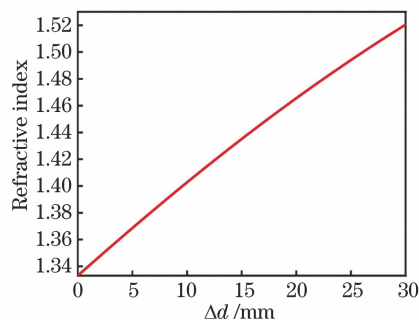


图 7 平移台的移动距离与折射率的变化关系

Fig. 7 Relationship between moving distance of translation table and refractive index

3 结果与分析

3.1 溶液质量分数与折射率的关系

为了验证实验系统的可行性, 分别配制了不同质量分数的氯化钙溶液。根据质量分数的计算公式, 先用电子秤(精度为 0.001 g)称量一定量的氯化钙固体置于烧杯中, 再用移液枪取相应的去离子水于烧杯中, 用玻璃棒搅拌至充分溶解后, 将其装入密封的离心管中, 整个溶液配制过程快速, 从而可减小氯化钙在空气中吸水带来的影响。氯化钙溶液的质量分数 C 可表示为

$$C = \frac{m}{m + M} \times 100\%, \quad (23)$$

式中: m 为溶质质量; M 为去离子水的质量。首先配制质量分数为 0.01% 的氯化钙溶液, 用电子秤称量 0.1 g 的氯化钙固体, 按照上述步骤加入 999.9 g 的去离子水, 将其充分溶解后取适量装入密封离心管中, 这样待测溶液就配制好了。重复该操作, 分别配制质量分数为 0.01%, 0.1%, 1%, 5%, 10%, 12%, 14%, 16%, 18%, 20%, 24% 的氯化钙溶液。

用图 4 所示的系统对不同质量分数氯化钙溶液的折射率进行测量, 先用已知折射率的去离子水 ($n_w = 1.3330$) 对系统进行标定。用注射器将去离子水注入到微流腔中, 通过控制平移台的移动控制入射角度以对系统进行角度扫描, 取反射信号峰值对应的平移台的位置为 0, 再分别将不同质量分数的氯化钙溶液注入微流腔中, 测量过程中记录平移台的相对位移 Δd , 用 (19) 式计算出溶液折射率大小, 记录的数据见表 1, 室温为 26 °C, 激光器波长为 532 nm。

表 1 不同质量分数的氯化钙溶液对应的折射率

Table 1 Refractive index of calcium chloride solution with different concentration

$C / \%$	$\Delta d / \text{mm}$	Refractive index
0.01	0.004	1.33303
0.1	0.227	1.33464
1	0.243	1.33476
5	1.554	1.34419
10	3.272	1.35642
12	3.970	1.36135
14	4.775	1.36700
16	5.502	1.37207
18	6.364	1.37803
20	6.994	1.38237
24	8.187	1.39050

很明显, 氯化钙的质量分数为 0.1% 时测量结果有明显的误差, 去除该点后不同质量分数的氯化钙溶液与折射率的对应关系及拟合直线方程如图 8 中实线所示。

图 8 中虚线为参考文献[26]中 25 °C 时测量得到的氯化钙溶液质量分数与折射率的关系的拟合直线, 实线为系统测得的数据的拟合直线, 右下角插图为两直线的放大图。可以看出, 参考文献中的氯化钙溶液质量分数与折射率的关系与系统测得的结果一致, 这证明了系统的可靠性。

$$y = 1.33187 + 0.24764x, \quad (24)$$

$$y = 1.33238 + 0.24655x, \quad (25)$$

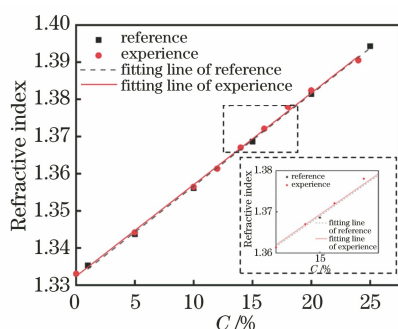


图 8 氯化钙溶液的质量分数与折射率的关系

Fig. 8 Relationship between mass fraction of calcium chloride solution and refractive index

式中: y 表示折射率; x 表示氯化钙溶液质量分数。(24)式为参考文献[26]中氯化钙溶液质量分数与折射率关系的拟合直线方程,(25)式为本文实验系统所测氯化钙溶液质量分数与折射率关系的拟合直线方程。

从图 8 中可以看出,参考文献[26]中不同质量分数氯化钙溶液的折射率拟合直线方程与本文实验所得的拟合直线方程有微小差异,其原因可能在于:环境温度不同、探测光波长的不同、配制溶液误差或系统偏差。这个差异很小,是可以接受的。

3.2 系统灵敏度与误差分析

已知折射率传感器的灵敏度可以用测量值的标准偏差去表示,3.1 节已经得到了实验系统所测氯化钙溶液质量分数与折射率关系的拟合直线方程[(25)式],拟合直线方程的标准偏差计算公式为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_n)^2}{n-1}}, \quad (26)$$

式中: x_i 为拟合直线方程对应的折射率; x_n 为实验测得的折射率; n 为测得的实验数据点数; S 为拟合直线方程的标准偏差。基于测得的实验数据与理论数据,计算得到拟合直线方程的标准偏差为 7.203×10^{-4} , 因此系统灵敏度为 7.203×10^{-4} RIU。系统灵敏度与平移台运动的精度和稳定性有直接关系,换用移动精度更高、运动更稳定的平移台可进一步提高系统灵敏度。

再配制质量分数为 15% 的氯化钙溶液,配制方法与上文所述一致,其折射率的测量值与理论值分别为 1.36929 和 1.36936。

折射率的测量值与理论值的差值为 7×10^{-5} , 造成这一差异的原因可能是配制溶液过程中产生的误差、实验室环境的温度变化和噪声信号干扰等。

后续可以通过换用移动精度更高、更稳定的平移台或控制实验室环境及温度来提高系统的灵敏度及稳定性。

本实验中对氯化钙溶液质量分数的测量范围为 0%~24%, 折射率的变化范围为 1.3330~1.39, 受系统中反射镜与透镜尺寸的限制以及配制溶液的限制,能测量的折射率范围为 1.3330~1.39。通过增大系统中反射镜与透镜尺寸、增加反射镜使光多次反射、改变透镜焦距、换用折射率差异更大的材料等方法都可以增大折射率测量范围,理论上的测量范围可以达到 1~1.5168。这也为后续实验装置的改进提供了一个思路。

4 结 论

提出了一种反射系统的入射光角度调节方法及装置,利用一维平移台对入射角度进行调整,可将入射角度的变化转变为一维平移台的位移变化,不用改变其他装置或光学器件的位置就可以对入射角进行调整,这解决了光学反射系统调整入射光角度时所遇到的困难。将该装置与石墨烯传感系统结合,搭建了石墨烯折射率传感系统,通过移动平移台对入射角进行扫描,得到反射率曲线。根据发生全内反射时平移台的相对位移,计算得到样品折射率的绝对值,该方法可以方便、实时地测量样品的折射率。实验结果表明,基于石墨烯的折射率传感系统的灵敏度为 7.203×10^{-4} RIU, 理论上的量程可达 1~1.5168。该测量方法简单、快捷、量程大、实时性好,并且可以用于检测物质成分变化,也能为检测生物医学中细胞的各种生化过程提供一种新的方法。

参 考 文 献

- [1] Shi Q Y, Wang Y P, Cui Y F, et al. Resolution-enhanced fiber grating refractive index sensor based on an optoelectronic oscillator [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(23): 9562-9567.
- [2] Bao Y N, Liu X H, Hu J H, et al. High-performance optical refractive index sensor based on concave resonant grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0913001. 包益宁, 刘秀红, 胡劲华, 等. 基于凹型谐振光栅的高性能光学折射率传感器 [J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0913001.
- [3] Antonacci G, Goyvaerts J, Zhao H L, et al. Ultra-sensitive refractive index gas sensor with functionalized silicon nitride photonic circuits [J]. APL Photonics, 2020, 5(8): 081301.

- [4] Sultana J, Islam M S, Ahmed K, et al. Terahertz detection of alcohol using a photonic crystal fiber sensor[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(10): 2426-2433.
- [5] Zhao H X, Cheng P H, Ding Z Q, et al. Refractive index sensor based on alternating grating and graphene composite structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0728001.
赵洪霞, 程培红, 丁志群, 等. 基于交替光栅和石墨烯复合结构的折射率传感器[J]. *光学学报*, 2021, 41(7): 0728001.
- [6] Lin H, Zhang X, Zhu X S, et al. Refractive index sensor based on hollow optical fiber with metal-dielectric-metal multilayered films structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0606006.
林华, 张娴, 朱晓松, 等. 基于金属-介质-金属多层膜结构的空芯光纤折射率传感器[J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0606006.
- [7] Li T S, Zhu L Q, Yang X C, et al. A refractive index sensor based on H-shaped photonic crystal fibers coated with Ag-graphene layers[J]. *Sensors*, 2020, 20(3): 741.
- [8] Bao Q L, Loh K P. Graphene photonics, plasmonics, and broadband optoelectronic devices [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(5): 3677-3694.
- [9] Xing F, Liu Z B, Deng Z C, et al. Sensitive real-time monitoring of refractive indexes using a novel graphene-based optical sensor[J]. *Scientific Report*, 2012, 2: 908.
- [10] Xing F, Yang Y, Shen J F, et al. Ultra-high sensitivity, multi-parameter monitoring of dynamical gas parameters using a reduced graphene oxide microcavity[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 235: 474-480.
- [11] Zhang H Q, Sun L X, Yang Y Z, et al. Graphene-based optical biosensor using functionalized magnetic nanoparticles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1117001.
张慧琴, 孙立勋, 杨艺哲, 等. 一种基于功能化修饰磁性纳米颗粒的石墨烯基光学生物传感器[J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1117001.
- [12] Patel S K, Parmar J, Trivedi H, et al. Highly sensitive graphene-based refractive index biosensor using gold metasurface array [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(12): 681-684.
- [13] Li C, Gao J J, Shafi M, et al. Optical fiber SPR biosensor complying with a 3D composite hyperbolic metamaterial and a graphene film [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(3): 379-388.
- [14] Chen P C, Shu X W, Cao H Y, et al. High-sensitivity and large-dynamic-range refractive index sensors employing weak composite Fabry-Perot cavities[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(16): 3145-3148.
- [15] Lan X W, Cheng B K, Yang Q B, et al. Reflection based extraordinary optical transmission fiber optic probe for refractive index sensing [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 193: 95-99.
- [16] Hlubina P, Kadulova M, Ciprian D, et al. Reflection-based fibre-optic refractive index sensor using surface plasmon resonance [J]. *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, 2014, 9: 14033.
- [17] Xing F, Meng G X, Zhang Q, et al. Ultrasensitive flow sensing of a single cell using graphene-based optical sensors [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(6): 3563-3569.
- [18] Zhang H, Chen M H, Li Z Y, et al. The measurement of the concentration of glucose solution by using optical low coherence interferometry [J]. *Optical Technique*, 2018, 44(3): 287-290.
张浩, 陈明惠, 李振洋, 等. 测量葡萄糖浓度的光学低相干干涉法 [J]. *光学技术*, 2018, 44(3): 287-290.
- [19] Maswati N I, Yusibani E. Influence of the apex angle of a hollow prism made from an ordinary commercial glass plate as a simple refractometer to the accuracy of the refractive index measurement of the edible oil [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 352: 012045.
- [20] Valentine J, Zhang S, Zentgraf T, et al. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index[J]. *Nature*, 2008, 455(7211): 376-379.
- [21] Kim M, Lee D, Nguyen T H Y, et al. Total reflection-induced efficiency enhancement of the spin Hall effect of light [J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(9): 2705-2712.
- [22] Shen Z, Cheng Y, Deng H C, et al. Analysis of trapping force of beak-shaped optical tweezers with annular core fibers for particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 1808001.
申泽, 成煜, 邓洪昌, 等. 鸟喙形环形芯光纤光镊粒子捕获受力分析 [J]. *光学学报*, 2021, 41(18): 1808001.
- [23] Zhao K H. *New concept physics course*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 286-288.
赵凯华. *新概念物理教程-光学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 286-288.
- [24] Li Q, Ding Y, Yang L J, et al. Nanostructure and electrochemical performance of graphene oxide by irradiation of femtosecond laser [J]. *Chinese Journal*

of Lasers, 2021, 48(8): 0802022.

李强, 丁焯, 杨立军, 等. 飞秒激光辐照氧化石墨烯的纳结构与电化学性能研究 [J]. 中国激光, 2021, 48(8): 0802022.

- [25] Wang X, Chen Y P, Nolte D D. Strong anomalous optical dispersion of graphene: complex refractive index measured by Picometrology [J]. Optics

Express, 2008, 16(26): 22105-22112.

- [26] Tan C Y, Huang Y X. Dependence of refractive index on concentration and temperature in electrolyte solution, polar solution, nonpolar solution, and protein solution [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2015, 60(10): 2827-2833.