

文章编号:1005-4642(2022)05-0053-04

基于光谱和移相技术测量溶液的旋光度

徐康怡¹, 王 军¹, 袁 梦¹, 吴抒阳¹, 韩志刚²

(1. 苏州科技大学 物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215009;

2. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘 要:对溶液旋光度测量装置进行改进,利用宽光谱光源和光谱仪替代单色光和灵敏电流计,实现了可见光范围内的旋光度测量;利用四步移相法替代寻找消光位置的方法,消除了探测器背景噪声对测量的影响. 对钠黄光波长下果糖溶液的旋光度进行测量,精度从 0.1° 提升至 0.08° .

关键词:偏振;旋光度;光谱仪;移相法

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2022.05.009

溶液的旋光度是分析溶液特性的重要参量. 在大学物理实验中,测量物质的旋光属性是在特定温度下,将单色光以偏振光的形式入射进旋光介质中,利用数字灵敏电流计将光信号转换为电信号,通过旋转检偏器的刻度盘测量物质的旋光度^[1-3]. 实验中,需要反复转动检偏器确定消光角度,可能引入较大测量误差,灵敏电流计的暗电流也对旋光度的测量造成影响. 由于采用单色光作为光源,仅能实现单一波长下旋光度的测量,无法同时获得宽光谱范围的旋光度,即旋光色散数据.

本文利用宽光谱的卤素灯作为光源,将光谱仪作为探测器,实现了同时在整个可见光范围内旋光度的测量. 与直接寻找消光位置的方法不同,本文采用四步移相法测量旋光度,避免了实验中背景噪声带来的影响. 该实验可作为大学物理实验“旋光度测量”的拓展实验项目,使学生在掌握偏振光、旋光度等知识的基础上,了解光谱和移相测量技术,具有较好的实践教学意义.

1 原 理

1.1 旋光效应

偏振光通过某种物质后其振动面将以光的传

播方向为轴线转过一定角度,这种现象称为旋光效应,振动面偏转过的角度称为旋光度. 旋光度 α 不仅与物质的化学结构有关,还与测定时溶液的浓度 c 、旋光介质的长度 L 有关^[4-7],液体旋光介质的旋光度表示为

$$\alpha(\lambda) = cmL, \quad (1)$$

其中, m 为该溶液的旋光率, λ 为入射光波长.

对于同一旋光介质,温度一定时,其旋光度随入射光的波长变化而改变,即旋光度色散.

1.2 宽光谱旋光度测量原理

1.2.1 旋光度测量系统

测量系统由宽光谱光源、起偏器、被测溶液、检偏器和光谱仪构成,如图 1 所示.

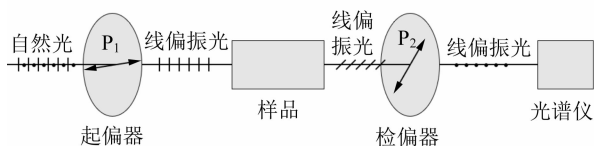


图 1 利用光谱仪测量溶液旋光度的装置示意图

如图 2 所示,设起偏器的偏振方向为 x 轴,波长为 λ 的入射光通过起偏器后琼斯矩阵为

收稿日期: 2021-06-26; **修改日期:** 2021-09-05

基金来源: 江苏省大学生创新创业训练计划项目 (No. 202110332063Y); 苏州科技大学一流课程建设项目 (No. 2020KCHH-12); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目 (No. 18KJA470004); 江苏省高等教育教学改革研究课题 (No. 2021JSJG370)

作者简介: 徐康怡 (2001—), 女, 江苏昆山人, 苏州科技大学物理科学与技术学院 2019 级本科生. E-mail: 458083447@qq.com

通讯作者: 王 军 (1981—), 男, 山东济宁人, 苏州科技大学物理科学与技术学院副教授, 博士, 从事物理实验及光学检测的研究. E-mail: wjk31@163.com

$$\mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

经过旋光溶液后,偏振光的偏振方向旋转角度(即旋光度)为 α ,其琼斯矩阵变为

$$\mathbf{E}_\lambda = A_1 \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}. \quad (3)$$

设检偏器偏振方向与 x 轴夹角为 θ ,则检偏器的矩阵为

$$\mathbf{G}_1 = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \frac{1}{2} \sin (2\theta) \\ \frac{1}{2} \sin (2\theta) & \sin^2 \theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

自检偏器出射的光矢量为

$$\mathbf{E}_{\text{出}} = A_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \frac{1}{2} \sin (2\theta) \\ \frac{1}{2} \sin (2\theta) & \sin^2 \theta \end{bmatrix} = A_1 (\cos \alpha \cos \theta + \sin \alpha \sin \theta) \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式(5)表示复偏振 $\mathbf{A} = A_1 (\cos \alpha \cos \theta + \sin \alpha \sin \theta)$ 的线偏振光.

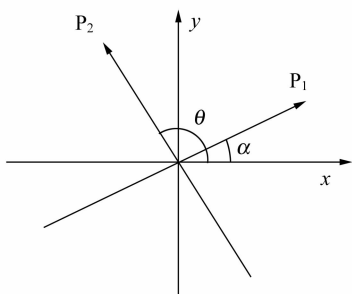


图 2 实验系统右视角简化图

设 $I_0 = A_1^2$,则其光强为

$$I = \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^* = I_0 \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos (2\alpha - 2\theta) \right], \quad (6)$$

上式可写为

$$I = m + n \cos (2\alpha - 2\theta), \quad (7)$$

其中, $m = n = \frac{1}{2} I_0$.

利用移相法即可计算出式(7)中的相位值,即旋光度 α . 光谱仪可同时获取可见光范围内所有波长光的强度,因此可在 1 次测量中获得不同波长下的旋光度数据,从而实现可见光范围内溶液旋光度色散数据的测量.

1.2.2 移相法原理

采用四步移相法进行测量^[8],在完成第 1 次测量后需再旋转 3 次检偏器,每次旋转 45° ,形成 4 个不同角度,使 $2\theta_i = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° . 将 $2\theta_i$ 代入式(7),则有

$$\begin{cases} I_1 = m + n \cos (2\alpha) \\ I_2 = m + n \sin (2\alpha) \\ I_3 = m - n \cos (2\alpha) \\ I_4 = m - n \sin (2\alpha) \end{cases}, \quad (8)$$

解得波长为 λ 的光经过起偏器后的角度(即旋光度)为

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3} \right). \quad (9)$$

2 实 验

2.1 实验光路

实验光路如图 3 所示,光源为卤素灯,探测器为海洋光学 QE65000 光谱仪,分别配置了 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 g/mL 的果糖溶液并作为被测溶液进行实验.

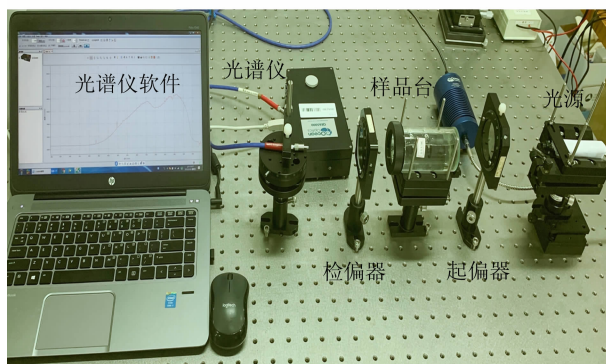


图 3 实验装置图

2.2 实验数据处理

图 4 所示为 0.4 g/mL 果糖溶液的 4 次光谱数据 I_1, I_2, I_3 和 I_4 ,利用四步移相法,可计算出整个可见光谱范围内的旋光度. 图 5 所示为实验测得 5 种不同浓度溶液的旋光度数据.

如图 6 所示,以钠黄光波长 $\lambda = 589.3 \text{ nm}$ 为例,经过拟合得到直线方程为: $\alpha = -104.4c + 95.176$. 计算该波长下果糖溶液的旋光率为 $-94.90^\circ \text{ g}^{-1} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{dm}^{-1}$ (其中,样品池长度 $L = 1.1 \text{ dm}$,室温 $T = 20^\circ \text{C}$).

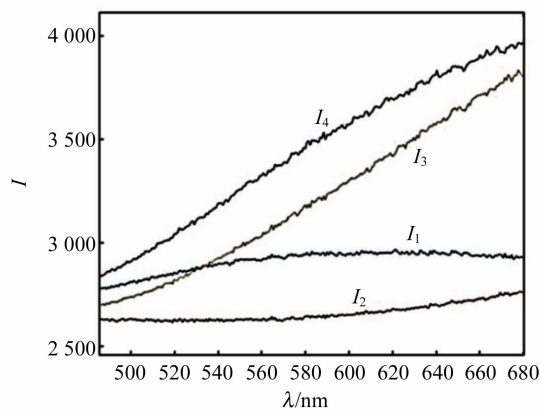


图4 0.4 g/mL 果糖溶液的光谱数据

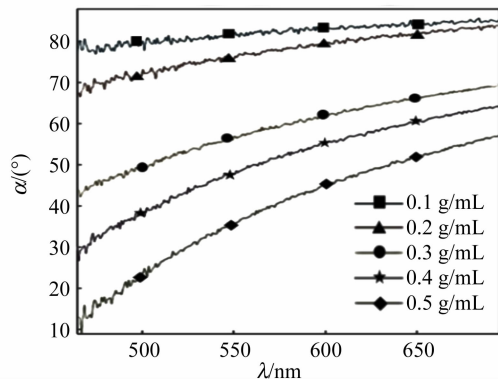
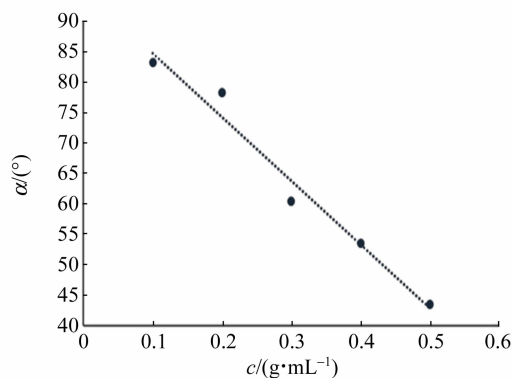


图5 5种浓度果糖溶液的旋光度

图6 $\lambda=589.3\text{ nm}$ 时溶液旋光度变化趋势

3 分析

实验中使用的光谱仪具备扣除暗光谱(环境杂散光的信号)的功能,可有效消除环境杂散光对寻找消光角度的影响。

在利用移相法计算旋光度时,设探测器的背景噪声为 δ ,则四步法探测的实际光谱值分别为 $I_1 + \delta$, $I_2 + \delta$, $I_3 + \delta$ 和 $I_4 + \delta$,在式(9)中, $I_2 - I_4$

和 $I_1 - I_3$ 光谱相减,消除了背景噪声 δ ,减少了测量误差。

传统测量方法需要寻找消光位置,测量精度取决于检偏器旋转精度(为 0.1°)。本实验使用的旋转装置的精度也为 0.1° 。四步法的相位恢复误差为

$$\Delta\alpha \approx e \cos(4\alpha + 2e), \quad (10)$$

其中, $e=0.1^\circ$ 为旋转装置的精度。以钠黄光波长 $\lambda=589.3\text{ nm}$, 0.4 g/mL 的果糖溶液为例,四步移相法理论上可使旋光度 $\Delta\alpha$ 的测量精度提升至 0.08° ,通过使用更精密的旋转装置可以进一步提高测量精度。

4 结束语

本文对大学物理实验“溶液旋光度测量”实验进行改进,利用卤素灯和光谱仪替代激光器和灵敏电流计,实现了可见光光谱范围内的旋光度测量;利用四步移相法替代寻找消光位置的方法,消除了探测器背景噪声对测量的影响,提高了测量精度。实验对5种不同浓度的果糖溶液进行测量,测得了可见光谱范围内的旋光度色散,利用该数据计算钠黄光波长下的旋光度。将光谱仪等高精度科研仪器和移相算法引入该实验,不仅拓展了实验内容,还有利于提升学生的创新实践能力。

参考文献:

- [1] 厉桂华,丛晓燕,张红,等. 两种旋光仪测量葡萄糖溶液浓度的教学研究[J]. 大学物理实验,2021,34(2):48-51.
- [2] 王晓萌,王世燕,李静. 蔗糖溶液旋光效应的实验研究[J]. 实验科学与技术,2016,14(5):79-80,128.
- [3] 罗奎全,焦志阳,宋海晨. 蔗糖溶液旋光率测量方法改进[J]. 大学物理实验,2016,29(5):19-21.
- [4] 种晴,袁志峰,范婷. 利用折射率衡量蔗糖水解反应的进程[J]. 物理实验,2017,37(8):48-50,53.
- [5] 汪一帆,陈良雷,陈余行,等. D-葡萄糖溶液变旋规律的研究[J]. 物理实验,2012,32(10):45-46.
- [6] 张思慧,周小岩,辛琨,等. 蔗糖溶液浓度与折射率、旋光度关系的实验研究[J]. 大学物理实验,2017,30(6):30-33.
- [7] 李百芳,孙宝良. 对葡萄糖溶液旋光度实验的改进[J]. 物理通报,2013(9):87-88.
- [8] 蔡长青,贺玲凤. 基于四步相移的相位差提取方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2011,39(9):93-96.

Measuring optical rotation by spectroscopy and phase shifting technique

XU Kang-yi¹, WANG Jun¹, YUAN Meng¹, WU Shu-yang¹, HAN Zhi-Gang²

(1. School of Physical Science and Technology,

Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The optical rotation measurement in the visible light range was realized by using a wide-spectrum light source and spectrometer instead of monochromatic light and galvanometer, and the influence of the background noise of the detector on the measurement was eliminated by using the four-step phase shifting method instead of the method of finding the extinction position. The optical rotation of the fructose solution was measured at the wavelength of the sodium yellow light, and the precision was improved by 0.1° to 0.08° .

Key words: polarize; optical rotation; spectrometer; phase shifting method

[责任编辑:郭 伟]

(上接 52 页)

Measuring diffusion coefficient of liquid phase based on hollow prism lens

LU Ying-jie, XU Jin-hui, CHEN Li-jie, WU Ke-yan,

HUANG Man-li, LUO Guo-ping, GU Di

(School of Science, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China)

Abstract: Based on the hollow triangular liquid column lens, the experimental method of simultaneously measuring the refractive index and diffusion coefficient of the transparent liquid phase was introduced. The refractive index of liquid was calculated by the refractive index distribution curve formed by the refraction of the light beam of the liquid phase diffusion layer in the triangular prism liquid column lens to the light screen, and the concentration of the liquid to be measured was obtained. According to the solution of Fick's second law under one-dimensional infinite diffusion, the diffusion coefficient $D=1.50 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ NaCl solution in pure water was obtained, which was conform to the reference value.

Key words: hollow triangular prism lens; liquid column lens; refractive index distribution; liquid diffusion coefficient

[责任编辑:郭 伟]