

利用光拍频波测量液体浓度^{*}

杨天基 陈静 李陈南 岳雨星 宋金士
易庭丰 吕宪魁 郑永刚 刘文广 冯洁

(云南师范大学物理与电子信息学院 云南昆明 650500)

(收稿日期:2023-08-21)

摘要:以溶液浓度与其折射率之间的联系作为出发点,通过理论推导得出当光在液体中的传播路程一定时,液体的浓度变化量与光通过液体后波形移动的距离成线性关系.基于该关系,用具有低频性的光拍频波为波源,搭建了一套表征并测量液体浓度的实验装置,验证该线性关系并得出线性相关参数,再利用该线性关系实现液体浓度的测量.

关键词:液体浓度;光速测量仪;光拍频波;线性关系

液体在医疗、食品生产等各个领域都有着广泛的应用,简便、快速、准确地测量液体的浓度,在科研和生产实践中都具有重要价值.目前常见的液体浓度测量方法有:滴定分析法^[1]、旋光法^[2]、折射法^[3]等.但上述实验方法都存在不足之处,例如:滴定分析法会改变液体的物理或化学性质;旋光法只可以测量具有旋光效应的透明液体;折射法采样样本少,操作复杂.因此,本文介绍一种通过测量光拍频波(光拍频波是根据振动叠加原理,将两列速度相同、振面相同、频差较小而同向传播的光波的叠加形成的,可以大大降低频率,增加波长^[4])通过液体后的相位计算出液体浓度的测量方案,实现不改变被测样品理化性质,可测量溶液种类多,采样量大,操作简单.

1 实验原理

一定范围内,液体的折射率 n 与其质量百分比浓度 c 成线性关系^[5]

$$n = a + bc \quad (1)$$

其中 a 为常数, b 为比例常数,不同溶质的 b 值有所差异.光波通过长度均为 d ,浓度分别为 c_0 和 c_1 的两种溶液,其相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(c_1 - c_0)bd \quad (2)$$

当光波的相位改变 $\Delta\varphi$ 时,在示波器上可观察到波形移动,移动的距离为 Δt .波形移动距离 Δt 与相位差 $\Delta\varphi$ 的关系为

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta t}{T} \cdot 2\pi \quad (3)$$

其中 T 为被测信号周期,可从示波器上读得.又由光波的波速等于其波长与频率的乘积可得

$$\Delta t = \frac{Tfdb}{v_c}(c_1 - c_0) \quad (4)$$

其中 v_c 为真空中的光速; f 为光拍频波的频率.

设比例系数 K 和溶液浓度变化量 Δc 分别为

$$K = \frac{Tfdb}{v_c} \quad (5)$$

$$\Delta c = (c_1 - c_0) \quad (6)$$

则式(4)可改为

^{*} 国家级线下一流课程“基础物理学实验(二)”;云南省省级线下一流课程“基础物理学实验(二)”;高等学校教学研究项目,项目编号:DWJZW202235xn.

作者简介:杨天基(2000—),男,在读本科生.

通讯作者:易庭丰(1976—),男,博士,副教授,主要研究方向为高能天体物理和近代物理实验教学.

$$\Delta t = K \Delta c \quad (7)$$

即示波器上波形的移动距离 Δt 与液体浓度变化量 Δc 成正比, 比例系数为 K . 通过用已知浓度的一组溶液进行实验, 记录 Δt 和 Δc 并进行线性拟合, 得出比例系数 K .

由式(6)、(7)有

$$c_1 = c_0 + \frac{\Delta t}{K} \quad (8)$$

得出比例系数 K 后, 用已知浓度的溶液(浓度为 c_0 , 可为零)和待测溶液(浓度为 c_1) 进行实验, 测

出波形移动的距离为 Δt , 代入上式, 即可求出待测液体浓度 c_1 .

2 实验方案

2.1 实验器材

2.1.1 实验装置

实验装置由 FB801 型光速测量仪, UTD7102B 型数字示波器, 自制透明水槽, 自制限位装置组成. 整体实验装置如图 1 所示.

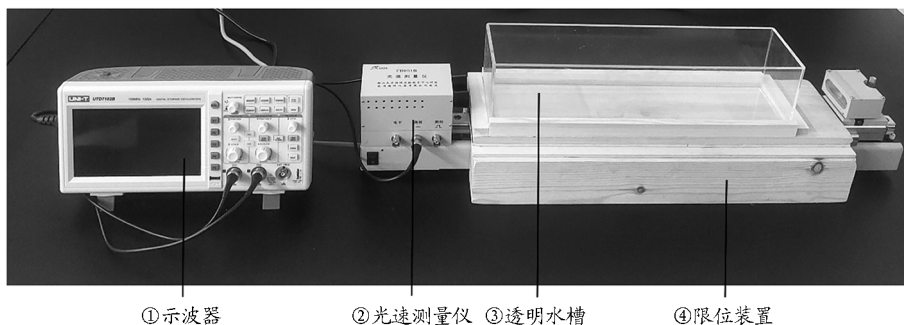


图 1 整体实验装置图

实验装置简介: 光速测量仪的发射端发出光拍频波, 光拍频波通过装有液体的透明水槽到达棱镜小车, 由棱镜小车反射, 再次经过水槽, 回到光速测

量仪的接收端, 接收到的光波信号由示波器显示出来. 另外限位装置使透明水槽每次放置在同一位置, 减小实验误差. 实验装置示意图如图 2 所示.

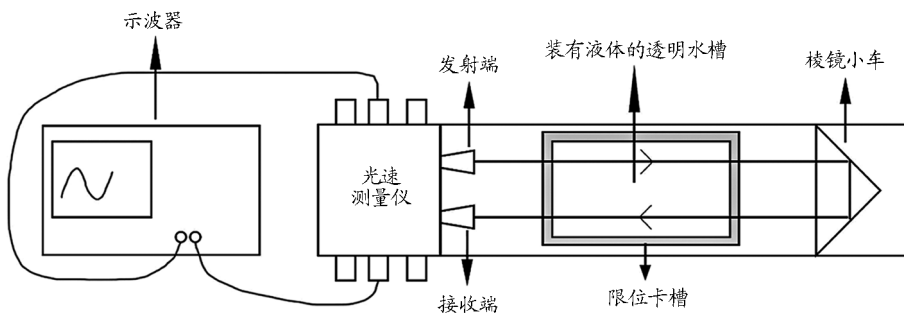


图 2 实验装置示意图

2.1.2 其他实验器材

电子天平, 蔗糖, 纯净水, 玻璃棒, 量筒.

2.2 实验步骤

2.2.1 仪器调节

组装实验装置, 打开光速测量仪与示波器的电源开关, 调节好光速测量仪和示波器. 让仪器预热一段时间, 待其工作稳定.

2.2.2 测定 K 值

(1) 配制一定质量百分比浓度的溶液, 将其倒

入水槽, 移动示波器的一个游标使其与波形交于示波器网格的某一水平线作为基准(该操作在下文中简称定标).

(2) 依次称量一定量的水加入水槽, 搅拌溶液使其浓度均匀. 移动另一游标使其与波形交于同一水平线, 两游标间的距离即为波形移动距离(示波器屏幕截图如图 3 所示). 记录每次加入水槽的水的质量和对应的波形移动距离. 处理数据, 拟合波形移动距离与溶液浓度改变量的线性方程, 线性方程的比

例系数即为 K 值.

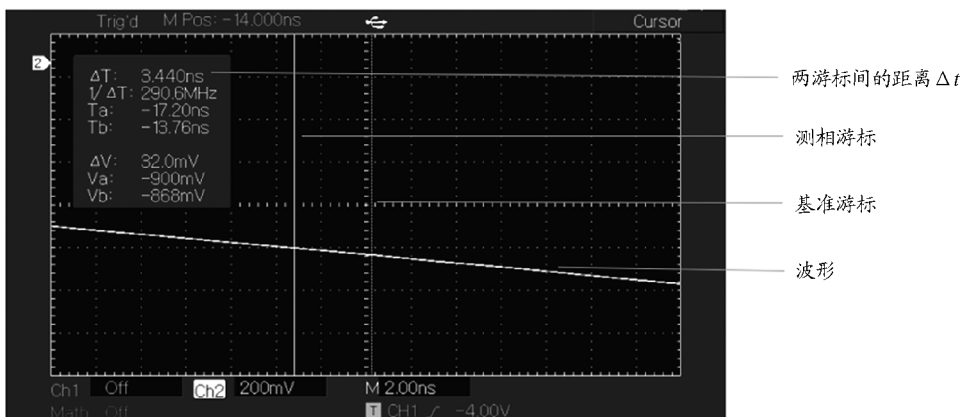


图3 示波器屏幕截图

2.2.3 测量待测溶液浓度

(1) 将已知浓度的溶液倒入水槽, 移动游标进行定标.

(2) 将水槽中的溶液换为待测溶液, 移动另一游标测量波形移动距离. 计算待测液体浓度.

3 实验数据测量与处理

以蔗糖溶液的浓度测量为例.

3.1 线性参数 K 的测定

设溶质质量为 $m_{\text{蔗糖}}$, 依次加入水槽的水的质量为 $m_{\text{水}}$, 溶液总质量为 $m_{\text{总}}$, 溶液浓度为 c , 溶液浓度变化量为 Δc , 波形移动距离为 Δt .

按照实验步骤进行实验, 得到的实验数据如表1所示.

表1 蔗糖溶液值测定

$m_{\text{蔗糖}} / \text{g}$	$m_{\text{水}} / \text{g}$	$m_{\text{总}} / \text{g}$	c	Δc	$\Delta t / \text{ns}$
180	600.00	780.00	0.230 8	0.000 0	0.00
	74.65	854.65	0.210 6	-0.020 2	-1.04
	90.85	945.50	0.190 4	-0.040 4	-3.04
	111.37	1 056.87	0.170 3	-0.060 5	-4.88
	141.75	1 198.62	0.150 2	-0.080 6	-6.92
	184.53	1 383.15	0.130 1	-0.100 6	-8.24
	252.37	1 635.52	0.110 1	-0.120 7	-9.92
	363.04	1 998.56	0.090 1	-0.140 7	-11.76
	570.32	2 568.88	0.070 1	-0.160 7	-13.16
635.41	3 204.29	0.056 2	-0.174 6	-14.40	

将 Δt 、 Δc 导入 Origin 软件中进行线性拟合, 拟合直线如图4所示.

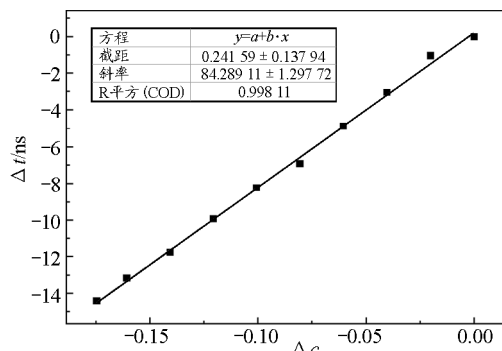


图4 蔗糖溶液 $\Delta t - \Delta c$ 拟合直线图

拟合得到的直线为 $\Delta t = 84.289 1 \Delta c + 0.241 6$, 其中 0.241 6 为误差项, 即 $K = 84.289 1$.

3.2 待测溶液浓度计算与误差分析

用浓度 $c_0 = 0.1$ 的溶液定标, 测量待测溶液, 得到波形移动距离 $\Delta t = 4.08 \text{ ns}$. 将 c_0 、 Δt 、 K 带入式(8), 计算得待测溶液浓度 $c_1 = 0.148 4 \pm 0.002 4$, 该测量值 c_1 与溶液实际浓度 $c_{\text{标}} = 0.15$ 的相对误差 $\epsilon = 1.063\%$, 与目前光学方面其他液体浓度测量工作的测量误差基本相近(超声光栅法测量的相对误差 $\epsilon = 1.12\%$ ^[6], 光电效应法测量的相对误差 $\epsilon = 1\%$ ^[7]),

具有较高的准确度。

分析实验误差来源与进一步改进该实验思路如下:

(1) 使用更加稳定、低频率的光拍频波和分辨率更高、可测量范围更广的示波器来提高测量精度和测量范围;

(2) 实验过程中液体会受到温度、空气杂质等外界因素影响,后续工作中可以封装液体避免液体蒸发和空气杂质混入,以及建立更加稳定的环境条件减小误差。

4 结束语

本文以大学物理实验常用的光速测量仪为基础,结合示波器和一些自制装置实现了液体浓度的测量,改变了目前利用光速测量仪测量液体性质的其他研究中所用的测量方法——移动棱镜小车并测量小车移动距离的等相位法^[8],直接从示波器上用游标功能读取波形移动的距离,提高了实验数据的精度。

本测量方案不仅简化了实验装置和实验操作,还可广泛用于其他折射率与浓度成一定关系的液体浓度的测量,为液体浓度的测量工作提供了一定的

参考价值。例如在液体传输通道中搭建该装置,光波信号经计算机处理直接显示出液体浓度,实时监测液体在传输过程中的浓度变化等,拓宽了该实验的应用领域。

参考文献

- [1] 杨雪. 滴定分析用标准溶液的探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(2): 4-6.
- [2] 苗永平, 刘小奕, 张鑫慧, 等. 旋光性透明液体浓度测量研究[J]. 大学物理实验, 2023, 36(4): 32-36, 50.
- [3] 郭山河, 田云霞, 乔亚力, 等. 折射法检测透明液体浓度的研究[J]. 光学技术, 1996(5): 36-37.
- [4] 杨选民, 黄宗华, 陈永强. 用光的拍频波测量光速[J]. 应用激光, 1981(4): 41-42.
- [5] 白泽生, 刘竹琴, 徐红. 几种液体的折射率与其浓度关系的经验公式[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2004(1): 33-34, 36.
- [6] 李一飞, 刘云, 李博, 等. 基于超声液体光栅的透明溶液浓度测量[J]. 科学技术创新, 2023(7): 37-40.
- [7] 冯宇, 王俊杰, 梁申, 等. 利用光电效应实验仪测量液体浓度[J]. 大学物理实验, 2023, 36(1): 20-22.
- [8] 陈泉霖, 许孟强, 芦立娟. 用光速测量仪探究纯碱溶液折射率与浓度的关系[J]. 大学物理实验, 2013, 26(5): 1-5.

Measurement of Liquid Concentration Using Optical Beat Frequency Wave

YANG Tianji CHEN Jing LI Chennan YUE Yuxing SONG Jinshi

YI Tingfeng LYU Xiankui ZHENG Yonggang LIU Wenguang FENG Jie

(School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500)

Abstract: Based on the relationship between the concentration of the solution and its refractive index, it is theoretically deduced that when the distance of the light in the liquid propagation is constant, the concentration change of the liquid is linearly related to the distance of the waveform movement when the light wave passes through the liquid. Based on this relationship, an experimental device for characterizing and measuring liquid concentration was built with a low-frequency optical beat wave as the wave source. The linear relationship and linear correlation parameters were verified and obtained, and then the linear relationship was used to measure the liquid concentration.

Key words: liquid concentration; light speed measuring instrument; optical beat wave; linear relationship