

文章编号: 1001-3806(2014)02-0161-04

用全反射法测冰醋酸和酒精的折射率

余文芳, 黄佐华*, 周进朝, 李华新

(华南师范大学 物理与电信工程学院 量子信息技术实验室, 广州 510006)

摘要: 为了研究冰醋酸溶液和酒精溶液的折射率与体积分数的关系, 采用全反射的方法测量了不同体积分数的冰醋酸溶液与酒精溶液的折射率, 得到了溶液折射率与体积分数的关系曲线。结果表明, 冰醋酸水溶液和酒精水溶液的折射率与体积分数均不存在简单的线性关系, 而是呈现出类抛物线型的变化关系。开始体积分数随折射率的增大而增大, 但在某一中间体积分数处折射率有一最大值, 即冰醋酸在体积分数为 0.90 附近存在最大折射率, 酒精在体积分数为 0.80 附近存在最大折射率。这一结果对于全面认识溶液折射率与体积分数的关系是有帮助的。

关键词: 物理光学; 折射率; 全反射; 冰醋酸; 酒精

中图分类号: O435.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.02.004

Measurement of the refractive indexes of glacial acetic acid and alcohol by means of total reflection

YU Wenfang, HUANG Zuohua, ZHOU Jinzhao, LI Huaxin

(Laboratory of Quantum Information Technology, School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to find the relationship between the refractive index and the volume fraction of acetic acid solution and alcohol solution, the principle of optical total internal reflection was chosen to measure the refractive indexes of glacial acetic acid and alcohol with different volume fractions and to obtain their relative curves. The experiments showed that the relationship between the refractive index and the volume fraction of acetic acid solution and alcohol solution was similar to the parabola. It was not the simple linear relationships. The refractive index became larger at the beginning as the solution volume fraction increased, and there was a maximum of the refractive index at a certain volume fraction. Acetic acid solution near the volume fraction of 0.90 and alcohol solution near volume fraction of 0.80 had the maximum refractive indexes respectively. The results are helpful to the comprehensive cognition of the relationship between the refractive index and the solution volume fraction.

Key words: physical optics; refractive index; total reflection; glacial acetic acid; alcohol

引言

折射率是物质重要的光学参量, 借助折射率可以进一步研究物质的光学性能、密度及体积分数等性质, 折射率还与热光系数等一些其它参量密切相关。折射率的精确快速测量在化工、食品、石油、医药等许多领域都有重要的意义。目前, 测量折射率的方法有很多, 按照测量原理可归结为三大类: 几何

光学、波动光学、光纤传感法。其中较为典型的有: 掠入射法^[1]、V 棱镜法^[2]、劈尖干涉法^[3]、光纤杨氏干涉法^[4]、迈克尔逊干涉法^[5-6]、光纤光栅法^[7]、光前端面回波法^[8]、光纤表面等离子体共振法^[9]、液体膜遮光效应法^[10]、液芯柱透镜法^[11]等方法。本文中利用全反射法测量了不同体积分数的冰醋酸溶液和酒精溶液的折射率, 并拟合出它们的折射率与体积分数的关系曲线。该测量方法操作过程方便、实验设备简单, 具有稳定性及精度高等特点。

1 测量原理与实验装置

1.1 用全反射法测液体折射率的基本原理

如图 1 所示, 在等腰棱镜底部加半圆形液体槽,

作者简介: 余文芳(1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事光电技术与系统、薄膜测量技术及光波导方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zuohuah@163.com

收稿日期: 2013-04-23; 收到修改稿日期: 2013-05-23

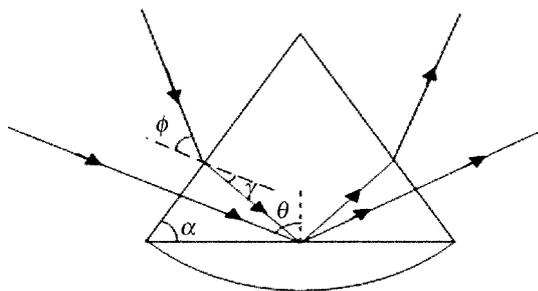


Fig. 1 Principle diagram with total reflection method to measure refractive index of liquid

棱镜的左底角为 α ，在槽中加入待测液体，使待测液体与棱镜底部紧密接触。当入射光以入射角 ϕ 入射到棱镜的左侧面时，折射角为 γ ，折射光以 θ 入射到棱镜的底部与液体的分界面上，在分界面上，一部分光发生反射回棱镜内部，一部分光发生透射进入待测液体中。

当棱镜底部与液体的分界面上发生全反射时，棱镜内部的各个量间有如下关系：

$$n = n_p \sin \theta_c \quad (1)$$

$$\theta_c = \alpha - \gamma_c \quad (2)$$

$$\gamma_c = \arcsin \left(\frac{n_{\text{air}} \sin \phi_c}{n_p} \right) \quad (3)$$

式中， n 为待测液体折射率， θ_c 、 ϕ_c 、 γ_c 分别为发生全反射时棱镜底面的入射角、棱镜左侧面的入射角和折射角； α 、 n_p 分别代表棱镜的底角和棱镜折射率。则由(1)式、(2)式和(3)式可得待测液体的折射率表达式为：

$$n = n_p \sin \left[\alpha - \arcsin \left(\frac{n_{\text{air}} \sin \phi_c}{n_p} \right) \right] \quad (4)$$

式中， α 、 n_p 、 n_{air} 已知，液体折射率 n 只与入射角 ϕ_c 有关，因此只要搭建光路能够精确测量 ϕ_c ，即可求出待测液体折射率 n 。

1.2 实验光路及装置

本文中利用全反射原理，本质上仍属于测角法，但光路布置及探测装置不同于传统方法。测试系统主要由光路系统、控制与采集系统和计算机三部分组成，实验装置结构图如图 2 所示，依次为激光器、小孔、起偏器、半反半透镜、 $\theta/2\theta$ 转台、探测器、步进电机、A/D 卡和计算机。光源为带准直器的半导体激光器 ($\lambda = 650\text{nm}$ ，发散度小于 1mrad)，其发出的光束，通过小孔滤除边缘光束，然后经过起偏器 (可选 TE 模或 TM 模) 选为 TE 模式的线偏振光即 s 光，继续经过半反半透镜 (20% 反，80% 透) 后，再经过小孔进一步滤除边缘光束，射向棱镜左侧表面。

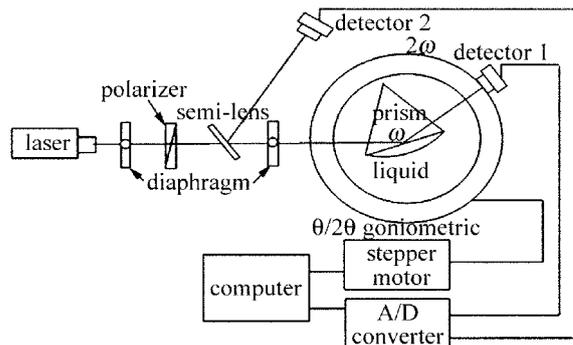


Fig. 2 Experimental device for liquid refractive index measurement

棱镜放在 $\theta/2\theta$ 转台上，即棱镜每转动 θ 角，棱镜底部与待测液体分界面的反射光线经棱镜右侧面透射后的光线转动 2θ 角，探测器 1 (硅光电池) 与外转盘相连也转过 2θ 角，因此探测器 1 能够时刻跟踪此反射光。由计算机控制的步进电机驱动样品的扫描，探测器 1 接收的光强信号放大处理后经过 A/D 卡进入计算机，得到反射光强与入射角关系的扫描曲线。半反半透镜是用来光路自准使用的，当入射光与棱镜左侧表面垂直时，入射光一部分透射、另一部分沿原路返回，经过半反半透镜反射后照射到探测器 2 上，使得探测器 2 接收到一个最大光强，在程序中扫描出探测器 2 接收到的反射光的最强点为起始点，曲线上给出的入射角度，都是相对于此自准点。

测量开始时，系统处于图 2 所示的状态，棱镜底部与待测液体的分界面上已经发生全反射，即只有反射光没有透射光，因此探测器 1 接收到很强的反射光强，探测器 2 由于棱镜左侧表面不垂直于入射光，即反射光不沿原路返回，故接收不到光强。测量开始后系统逆时针转动， θ 角逐渐减小，探测器 1 实时跟踪探测从棱镜底部反射光强度随入射角变化曲线，当棱镜转到左侧面垂直于入射光时，棱镜底部与待测液体的分界面上仍然发生全反射，故探测器 1 仍然接收到相同的很强的反射光强，而此时入射光垂直入射到棱镜左侧表面并沿原路返回，穿过小孔后经半反半透镜反射打在探测器 2 上，故探测器 2 可以接收到峰值光强，这里探测器 2 接收到峰值光强的角位置 ϕ_1 即是棱镜左侧面垂直于入射光线时棱镜的角位置；系统继续逆时针转动，探测器 1 仍然接收到相同的很强的反射光强，探测器 2 由于棱镜左侧表面不垂直于入射光，再也接收不到光强；当转台转到某一位置时，探测器 1 接收到的光强急剧减弱，探测器 1 的光强曲线形成一个台阶状，台阶处所对应的角度就是全反射时棱镜所处的角位置 ϕ_0 。

理论上,探测器 1 和探测器 2 将接收得到如图 3 所示的曲线,横坐标 ϕ 为棱镜所处的角位置,纵坐标 I 为探测器所测得的光强。曲线 1 为探测器 1 测得的光强曲线,曲线 2 为探测器 2 测得的曲线。计算待测液体折射率所需要用到的入射角 ϕ_c ,既是全反射时入射光线与棱镜左侧面法线的夹角,又是棱镜从左侧面垂直于入射光线到发生全发射时法线

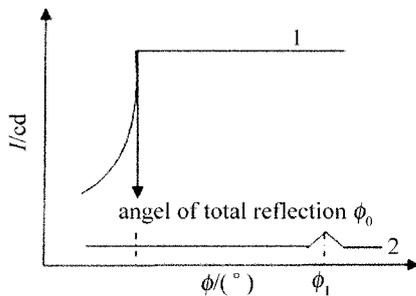


Fig. 3 Curve of the total reflection

所转过的角度,而棱镜法线转过的角度就等于棱镜本身转过的角度,故 $\phi_c = |\phi_1 - \phi_0|$ 。

计算机软件可自动将 ϕ_1 平移到 60° ,继续读取曲线上的拐点所对应的角度 ϕ_0 ,即可求出 ϕ_c 。实际操作中可以由计算机软件进行快速定位完成。

2 实验及其结果分析

2.1 待测液体的制备

用冰醋酸和蒸馏水配置 0.10 ~ 1 等一系列不同体积分数的冰醋酸水溶液。用酒精和蒸馏水配置 0.10 ~ 1 等一系列不同体积分数的酒精溶液。

2.2 测量过程和实验结果

在室温 16°C 和湿度 68% 的条件下,将待测样品依次用注射器注入棱镜底部的小槽中,逐次测量记录数据。测量上述两种溶液的折射率结果见表 1。

Table 1 Measurement results of acetic acid solution

volume fraction	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1
$\phi_0/(^\circ)$	37.62	38.16	38.68	39.44	39.88	40.48	41.04	41.44	41.68	41.72	41.44
$\phi/(^\circ)$	22.38	21.84	21.32	20.56	20.12	19.52	18.96	18.56	18.32	18.28	18.56
n_p	1.3323	1.3383	1.3440	1.3524	1.3572	1.3638	1.3699	1.3742	1.3769	1.3773	1.3742

Table 2 Measurement results of alcohol solution

volume fraction	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1
$\phi_0/(^\circ)$	37.62	37.96	38.44	39.08	39.52	39.96	40.28	40.52	40.64	40.60	40.36
$\phi/(^\circ)$	22.38	22.04	21.56	20.92	20.48	20.04	19.72	19.48	19.36	19.40	19.64
n_p	1.3323	1.3361	1.3414	1.3484	1.3533	1.3581	1.3616	1.3642	1.3655	1.3651	1.3625

为了验证测量的准确性,本文中用阿贝折射仪对纯酒精做验证实验,在 24°C 时,纯酒精的折射率为 1.3569;用 650nm 的激光在 16°C 时,测量纯酒精的折射率为 1.3625。考虑温度和波长对折射率的影响,从验证结果可以看出,本文中的测量精度是有保障的。

本实验的重复性好,液体折射率的测量精度主要取决于测量全反射角 ϕ 与棱镜底角 α 的精度,根据误差理论可给出 n 的绝对误差公式:

$$\Delta n = n_p \cos \left[\alpha - \arcsin \left(\frac{n_{\text{air}} \sin \phi_c}{n_p} \right) \right] \cdot \Delta \alpha - n_p \cos \left[\alpha - \arcsin \left(\frac{n_{\text{air}} \sin \phi_c}{n_p} \right) \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_{\text{air}} \sin \phi_c}{n_p} \right)^2}} \cdot \frac{n_{\text{air}}}{n_p} \cdot \cos \phi_c \cdot \Delta \phi_c \quad (5)$$

而底角精度为 $\Delta \alpha = \pm 1''$,全反射角精度 $\Delta \phi_c =$

$\pm 0.01^\circ$,因此液体折射率的绝对误差为 ± 0.0004 。

2.3 结果分析

将冰醋酸水溶液和酒精水溶液的折射率与体积分数的关系用曲线表示出来如图 4 及图 5 所示,曲线表明,两种溶液的折射率随体积分数变化的关系是类抛物线型的,冰醋酸在体积分数为 0.90 附近存在最大折射率,酒精在体积分数为 0.80 附近存在最

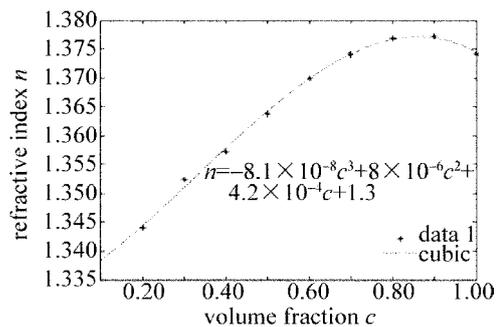


Fig. 4 The relationship between the refractive index and the volume fraction of acetic acid solution

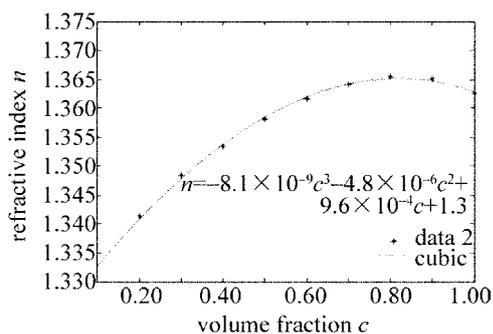


Fig. 5 The relationship between the refractive index and the volume fraction of alcohol solution

大折射率。

将两种溶液折射率与体积分数的关系拟合成 3 次方程,拟合曲线与实际曲线吻合较好。冰醋酸溶液与酒精溶液的折射率与体积分数的关系可分别表达为 3 次方程: $n = -8.1 \times 10^{-8} c^3 + 8 \times 10^{-6} c^2 + 4.2 \times 10^{-4} c + 1.3$; $n = -8.1 \times 10^{-9} c^3 - 4.8 \times 10^{-6} c^2 + 9.6 \times 10^{-4} c + 1.3$,其中 n 是液体折射率, c 为体积分数。用拟合方程,则可在精度要求不高的情况下,直接计算求得冰醋酸水溶液与酒精水溶液任意体积分数时所对应的折射率。

3 结 论

利用全反射原理测量了冰醋酸水溶液和酒精水溶液在不同体积分数下所对应的折射率,并对实验结果进行了拟合分析。实验测量结果表明,冰醋酸水溶液和酒精水溶液的折射率随体积分数的变化关系是类抛物线型的,均存在某一中间体积分数处对应着溶液折射率的最大值。即冰醋酸在体积分数为 0.90 附近存在最大折射率,酒精在体积分数为 0.80 附近存在最大折射率。这种规律与蔗糖溶液和氯化钠溶液的体积分数与折射率呈线性相关的规律不

同。原因是冰醋酸和酒精等液体溶于水时,液体分子相互渗透,在某一特定的体积分数配比下,混合液体的密度达到最大,折射率也最大。

参 考 文 献

- [1] XIN D Q, ZHU M, XIE Y L, *et al.* Several measuring methods of the refractive index of liquid[J]. College Physics, 2007, 26(1): 34-37 (in Chinese).
- [2] XING M N, BAI R, PU X Y. Novel measuring method for refractive index of micro-quantity liquid[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(7): 1196-1202 (in Chinese).
- [3] YU Sh G. Analysis on measurement of liquid refractive index[J]. Optical Instruments, 2007, 29(4): 1-6 (in Chinese).
- [4] SUN J H, WANG M. Measuring the refractive index of liquid by optical fiber Young's interference experiment[J]. Physical Experiment of College, 2005, 18(1): 8-10 (in Chinese).
- [5] YUAN J H, ZHOU L Sh, ZHAO F L, *et al.* Measurement of liquid refractive index with michelson interferometer and regulation of the instrument[J]. Optical Technology, 1998(1): 42-45 (in Chinese).
- [6] WANG X Ch, YANG B E, HE D H. A method to measure refractive index of transparent liquid based on Michelson interferometer[J]. Optical Instruments, 2012, 34(5): 1-4 (in Chinese).
- [7] IADICICCO A, CUSANO A, CUTOL O R, *et al.* Thinned fiber Bragg gratings as high sensitivity refractive index sensor[J]. IEEE Photon Technology Letters, 2004, 16(4): 1149-1151.
- [8] SU H, HUANG X G, ZHAO W H. Fluid refractive index sensor base on return strength from fiber end[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(1): 107-110 (in Chinese).
- [9] MATTHISA N, ANDREAS K. Intrinsic fiber optical gas sensor based on surface plasmon resonance spectroscopy[J]. SPIE, 1995, 2508: 303-311.
- [10] MIAO R C, GAO M L, HAN P B, *et al.* Light obstructing effect of liquid membrane[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(7): 1101-1105 (in Chinese).
- [11] LI Q, PU X Y. Measuring refractive index of liquid with liquid-core cylindrical lens[J]. College Physics, 2013, 32(1): 52-56 (in Chinese).