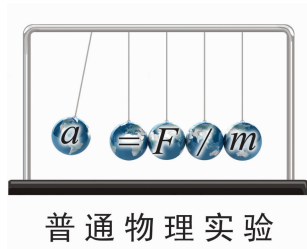


文章编号:1005-4642(2022)03-0022-06



基于线偏振光测量液体折射率与反射率的研究

姚星星,刘书悉,厉位阳

(浙江大学 物理学系,浙江 杭州 310013)

摘 要:自制了测量溶液折射率和反射率的实验装置. 利用对称交换法获得特征方向线偏振光在液面的反射率曲线,通过理论公式拟合得到溶液的折射率;研究了折射率与溶质质量分数的关系,结果表明二者在一定范围内线性度较好;测量和比较了不同颜色溶液对某一单色偏振光的反射率,发现颜色越深、折射率越大,并采用位移极化理论对该实验现象做出了解释.

关键词:折射率;反射率;线偏振光;布儒斯特角

中图分类号:O435.1;O436.3

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2022.03.004

折射率是介质光学特性的重要参量,通过折射率可以了解物质的光学性能、纯度、浓度以及色散等^[1]. 物理实验中测量介质折射率的方法较多,如最小偏向角法、布儒斯特角法、干涉法及椭圆偏振法等^[2]. 其中较为常用的是分光计实验中的最小偏向角法和光的偏振实验中的布儒斯特角法^[3-5]. 干涉法利用相干光形成薄膜等厚干涉条纹的原理来确定薄膜厚度和折射率^[6]. 椭圆偏振法是利用椭圆偏振光入射样品表面,通过检测和分析入射光和反射光的偏振状态,获得薄膜厚度及折射率的非接触测量方法^[7]. 本文首先通过对称变换法确定出偏振方向,再利用非线性拟合法得到溶液的折射率. 运用理论和实验研究了溶质质量分数如何影响折射率,并测量出混合溶液折射率与各组分质量分数之间的线性叠加关系. 该装置和方法不仅可以测量溶液,也能测量镀膜材料的光学性质,且具有实验光路调节简单、数据处理简便、精确度高等优点.

1 实验原理

1.1 对称变换法确定偏振片的特征方向

在光具座上插上激光器和偏振片(带刻度

盘),在右端测量偏振光通过偏振片后产生的光电流,如图 1 所示. 现要测定光源和偏振片的偏振角度,即光源偏振方向与竖直方向的夹角 ψ ,以及当偏振片偏振方向处在竖直方向时,刻度盘指针的读数 ϕ .

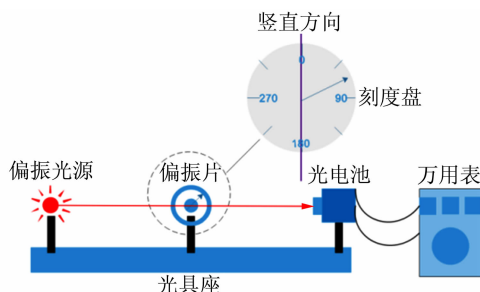


图 1 偏振片特征方向确定实验原理图

为后续表述方便,规定 $-90^\circ < \psi, \phi \leq 90^\circ$,当角度为负数时,表示从竖直方向逆时针(正视偏振片刻度盘视角来定义)转动锐角达到待测方向;当角度为正数时,表示顺时针转动锐角达到待测方向.

调节偏振片偏振方向,使万用表电流读数达到最大,记录刻度盘指针所指角度 θ_1 ($0^\circ \leq \theta_1 < 360^\circ$);转动偏振片所在的支架 180° ,使偏振片的

“第 11 届全国高等学校物理实验教学研讨会”论文

收稿日期:2021-07-09;修改日期:2021-10-25

基金项目:浙江大学物理学系 2021 年本科教学研究项目

作者简介:姚星星(1987—),男,安徽桐城人,浙江大学物理学系实验师,硕士,从事物理实验教学. E-mail:yaoxx705@zju.edu.cn

通讯作者:厉位阳(1965—),男,浙江杭州人,浙江大学物理学系副教授,硕士,主要从事物理实验教学与管理. E-mail:sunlight@zju.edu.cn

另一面正对光源,顺时针旋转偏振片,使万用表读数再次达到最大,记录指针所指角度 θ_2 ($0^\circ \leq \theta_2 - \theta_1 < 180^\circ$). 下面分情况讨论:

1) 若 $\psi < 0$ (逆时针偏转), 如图 2(a) 所示, 激光偏振方向原为 1, 偏振片转动 180° 后, 激光偏振方向在刻度盘上的位置关于竖直轴对称变换到 $1'$, 故偏振片需要旋转的角度为

$$-2\psi_1 = \theta_2 - \theta_1 \Rightarrow \psi_1 = -\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}. \quad (1)$$

此时, 刻度盘指针的读数 ϕ 有 3 种情况, 如图 2(b) 所示. 当 θ_1 在区域 I 时, $\phi_1 = \theta_1 - \psi_1$, 即 $\phi_1 = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$; 当 θ_1 在区域 II 时, $\phi_2 = \theta_1 - \psi_1 - 180^\circ$, 即 $\phi_2 = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - 180^\circ$; 当 θ_1 在区域 III 时, $\phi_3 = \theta_1 - \psi_1 - 360^\circ$, 即 $\phi_3 = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - 360^\circ$.

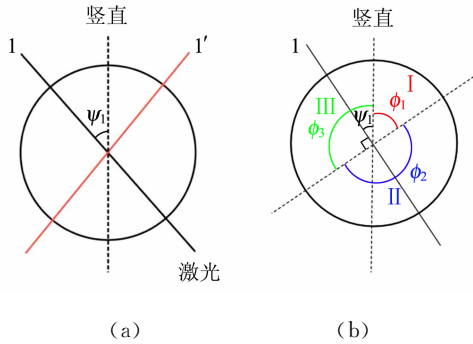


图 2 激光光路示意图 1

2) 若 $\psi > 0$ (顺时针偏转), 如图 3(a) 所示, 激光偏振方向由 2 变为 $2'$, 偏振片需要旋转角度

$$180^\circ - 2\psi_2 = \theta_2 - \theta_1 \Rightarrow \psi_2 = 90^\circ - \frac{\theta_2 - \theta_1}{2}. \quad (2)$$

同样, 刻度盘指针的读数 ϕ 也有 3 种情况, 如图 3(b) 所示. 当 θ_1 在区域 I 时, $\phi_1' = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - 90^\circ$; 当 θ_1 在区域 II 时, $\phi_2' = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - 270^\circ$; 当 θ_1 在区域 III 时, $\phi_3' = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - 450^\circ$.

根据规定 ($-90^\circ < \phi \leq 90^\circ$), 刻度盘指针读数表示为

$$\phi \in \left\{ \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - 90^\circ n \right\}, n = 0, 1, 2 \dots \quad (3)$$

显然, 每次测量都会得到 2 个不同的 ϕ 值, 2 个值符号相反, 差为 90° , 分别对应着偏振方向和与偏振方向垂直的方向 (统称特征方向). 至于哪

个方向为偏振方向, 还需要通过其他方法进一步确定.

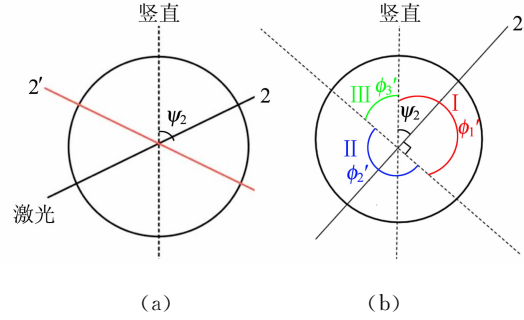


图 3 激光光路示意图 2

1.2 反射曲线拟合法测定折射率

光在界面上的光路示意图如图 4 所示, 根据菲涅耳公式, 光经介质分界面反射后, 入射光和反射光的电矢量 s, p 分量满足以下关系:

$$\begin{cases} E_{1s}' = \frac{n_1 \cos i_1 - n_2 \cos i_2}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2} E_{1s} = \frac{\sin(i_2 - i_1)}{\sin(i_2 + i_1)} E_{1s}, \\ E_{1p}' = \frac{n_2 \cos i_1 - n_1 \cos i_2}{n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} E_{1p} = \frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)} E_{1p}. \end{cases} \quad (4)$$

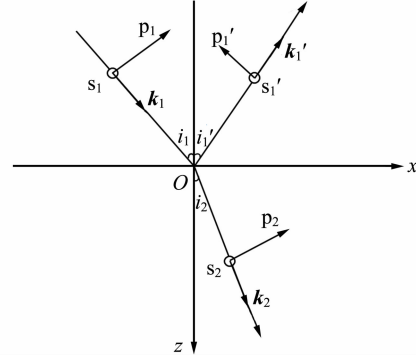


图 4 光在界面上的光路示意图

因此, 光强反射率为

$$\begin{cases} R_s = \left(\frac{E_{1s}'}{E_{1s}} \right)^2 = \left[\frac{\sin(i_2 - i_1)}{\sin(i_2 + i_1)} \right]^2, \\ R_p = \left(\frac{E_{1p}'}{E_{1p}} \right)^2 = \left[\frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)} \right]^2. \end{cases} \quad (5)$$

若从空气入射介质, $n_1 = 1$, $\sin i_1 = n_2 \sin i_2$, 线偏振光在各个入射角下的反射率就由介质的折射率 n_2 确定, 将其代入式 (5) 可以得到反射率与入射角的关系为

$$\begin{cases} R_s = \left\{ \frac{\sin [\arcsin(\sin i_1 / n_2) - i_1]}{\sin [\arcsin(\sin i_1 / n_2) + i_1]} \right\}^2, \\ R_p = \left\{ \frac{\tan [i_1 - \arcsin(\sin i_1 / n_2)]}{\tan [i_1 + \arcsin(\sin i_1 / n_2)]} \right\}^2. \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知,通过测量出不同入射角 i_1 下的 p 方向偏振光(简称 p 光)或 s 方向偏振光(简称 s 光)的反射率 R_p 或 R_s ,就可以进行拟合得到介质的折射率 n_2 .

p 光和 s 光的反射率曲线具有显著不同的特征,如图 5 所示. s 光的反射率随入射角单调递增,而 p 光存在反射率为 0 的极小值点,该点对应的入射角为布儒斯特角.

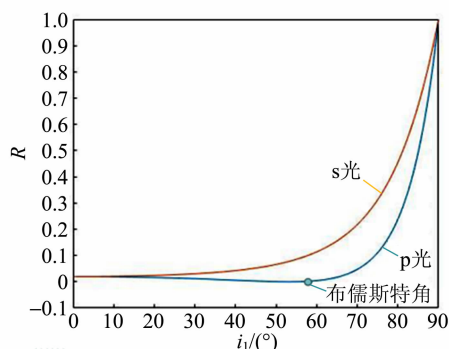


图 5 s, p 光的反射率曲线

1.3 离子溶液折射率与溶质质量分数的关系

若入射光的光强不够强,则粒子相对于平衡位置的偏移量 r 很小,假设溶液中粒子间的相互作用是弹性的,且运动阻力与其速度成正比.设固有频率为 ω_0 ,质量为 m ,阻力系数为 $m\gamma$,带电量为 q 的粒子在电矢量 E 作用下的运动方程可以表示为

$$r'' + \gamma r' + \omega_0^2 r = \frac{qE}{m} e^{-i\omega t}, \quad (7)$$

稳定时,系统将以驱动频率振动,即

$$r(t) = r_0 e^{-i\omega t}. \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)解得:

$$r_0 = \frac{qE}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega)}. \quad (9)$$

其位移极化部分的电偶极矩为

$$p = qr_0 = \frac{q^2 E}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega)}. \quad (10)$$

假设在溶液中存在 j 种离子,其单位体积内的粒子数为 N_j ,固有频率为 ω_j ,则位移极化部分的极化强度为

$$P = \left[\sum_j \frac{N_j q_j^2}{m_j(\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma\omega)} \right] E. \quad (11)$$

由 $P = \epsilon_0(\epsilon_r - 1)E$ 和 $n = \text{Re}(\sqrt{\epsilon_r})$,可得折射率为

$$n = \text{Re} \left[\sqrt{1 + \frac{1}{\epsilon_0} \sum_j \frac{N_j q_j^2}{m_j(\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma\omega)}} \right], \quad (12)$$

其中, ϵ_0 为真空电容率. 在“稀溶液” $\left[\frac{N_j q_j^2}{m_j(\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma\omega)} \ll 1 \right]$ 中,通过泰勒展开,并取一级近似,可得

$$n = \text{Re} \left[1 + \frac{1}{2\epsilon_0} \sum_j \frac{N_j q_j^2}{m_j(\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma\omega)} \right] = 1 + \sum_j f_j(\omega) N_j, \quad (13)$$

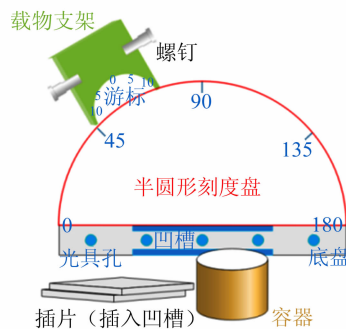
这表明在一定浓度范围内,离子溶液对单色光的折射率和离子浓度间具有线性关系.

2 实验器材与内容

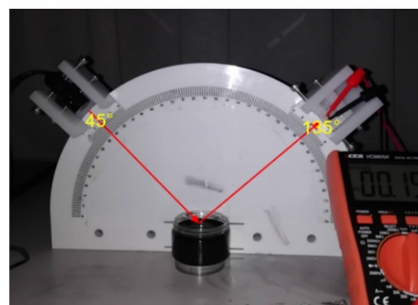
2.1 实验器材

实验器材:半导体激光器(波长约 650 nm)、S3590-082F-12 型硅光电池、VC9805A 型万用电表、带刻度盘的旋转盘、偏振膜、自制反射测角仪、载物支架、电子天平、量筒、透明容器、烧杯、NaCl 晶体、 Na_2CO_3 固体、色素、纯净水、螺钉、六角螺丝刀、固体胶.

自制反射测角仪主体由半圆形有机玻璃刻度盘和底盘拼合而成,刻度盘标示角度范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$,分度值为 1° ,游标盘精度为 0.1° . 底盘上可插入光学器件,并配有固定螺钉,水平放倒时可作为简易的短光具座使用,如图 6 所示.



(a) 示意图



(b) 实物图

图 6 自制反射测角仪

2.2 实验内容

2.2.1 偏振片特征方向的确定

具体操作步骤:

- 1)固定激光器,水平放倒反射测角仪.
- 2)滑动支架 1 和支架 2 到测角仪底盘左右两侧,在两支架之间插入带刻度盘的偏振片,调节激光器、偏振片和硅光电池探测器为等高共轴.
- 3)旋转偏振片使光电流达到最大,记录此时指针所指刻度 θ_1 .
- 4)转动偏振片所在支架 180° ,使偏振片的另一面正对光源,顺时针旋转偏振片使万用表读数再次达到最大,记录指针所指角度 θ_2 ($\theta_2 \geq \theta_1$).
- 5)旋转激光器,重复测量 6 次,由式(3)计算出特征方向 ϕ ,结果如表 1 所示.

经计算,得到偏振片的 2 个特征角度分别为:负值特征角度 $\phi_1 = -19.1^\circ \pm 0.4^\circ$,正值特征角度 $\phi_2 = 70.9^\circ \pm 0.4^\circ$.

表 1 激光特征方向的测量

$\theta_1 / (^\circ)$	$\theta_2 / (^\circ)$	$\phi_1 / (^\circ)$	$\phi_2 / (^\circ)$
46.2	97.0	-18.4	71.6
105.7	214.7	-19.8	70.2
141.0	181.2	-18.9	71.1
194.8	306.8	-19.2	70.8
289.8	392.2	-19.0	71.0
332.5	348.5	-19.5	70.5

2.2.2 s/p 光的制作和离子溶液折射率的测量

具体操作步骤:

- 1)转动偏振片使指针指向特征角度 ϕ_1 ,此时竖直方向和水平方向均为偏振片的特征方向.
- 2)转动激光器使光电流达到最大,此时激光偏振方向为竖直或水平方向,并分别垂直或平行于半圆形刻度盘(即入射面).由此,制作出 s 光或 p 光.
- 3)竖立反射测角仪,移动 2 个载物支架调节入射角 $i_1 = 40^\circ$,调节待测溶液液面高度使反射光点落在光电池中心.
- 4)记录光电流和遮挡激光后的背景光电流.每次按步长为 0.5° 或 1° 增大 i_1 ,测量光电池的光电流和背景光电流.直到反射角 $i_1' = 65^\circ$,绘制反射率曲线.

若绘制出的反射率曲线单调递增,表明得到

的偏振光是 s 光,则 ϕ_1 为偏振片的偏振角度.反之,得到的偏振光就是 p 光,即 ϕ_2 为偏振片的偏振角度.

2.2.3 探究溶液颜色对偏振光反射率的影响

分别制作 s 光和 p 光,测量待测有色溶液的反射率曲线.操作方法和步骤与 2.2.2 相同.改变有色溶液的颜色,测量其反射率曲线,分析实验数据反映出的规律.

3 实验结果与讨论

3.1 离子溶液折射率与浓度的关系

通过 2.2.2 中的操作步骤得到偏振片的偏振角度为 $\phi = \phi_2 = 70.9^\circ \pm 0.4^\circ$,即得到 p 光.再利用 p 光下的反射率曲线,依据式(13)拟合得到待测液体折射率 n .换用不同质量分数、种类的离子溶液或混合溶液,测量其折射率,研究折射率与质量分数之间的关系,实验结果如表 2 所示.

表 2 不同种类、质量分数的溶液拟合得到的折射率

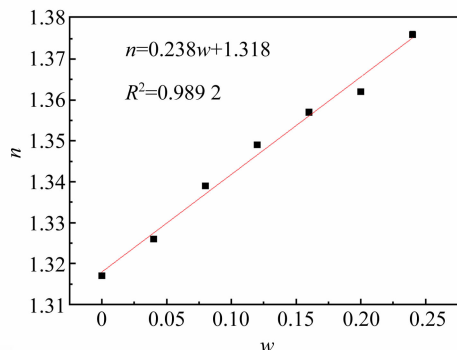
待测溶液	w	n	R^2
纯水	0%	1.316 5	0.999 0
	4%	1.325 7	0.998 9
	8%	1.338 6	0.999 0
	12%	1.348 7	0.999 3
	16%	1.357 3	0.999 6
	20%	1.362 5	0.997 9
	24%	1.375 7	0.999 5
NaCl	5%	1.331 2	0.999 2
	10%	1.354 7	0.999 3
	15%	1.367 4	0.999 6
	20%	1.378 8	0.997 8
	25%	1.388 2	0.999 6
	12%+5%	1.357 4	0.999 0
	12%+10%	1.377 2	0.988 4
NaCl+CaCl ₂	12%+15%	1.392 4	0.996 2
	6%+10%	1.358 1	0.998 6
	9%+10%	1.376 4	0.999 6

进一步分析离子溶液的质量分数与折射率的关系,绘制表 2 中不同质量分数 w 的 NaCl 溶液和 CaCl₂ 溶液的折射率 n 的关系图,得到质量分数与折射率的线性关系,如图 7 所示.

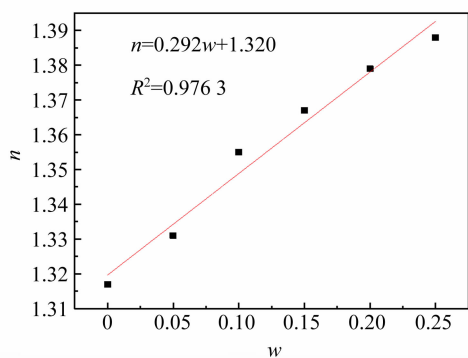
由于该 2 种溶液混合不发生化学反应,根据理论分析,离子溶液的折射率与离子浓度成正比,因此,二者的混合溶液的折射率与各成分的质量

分数之间均呈现线性关系,即

$$n_{\text{mix}} \approx 0.238w_{\text{NaCl}} + 0.292w_{\text{CaCl}_2} + 1.319. \quad (14)$$



(a) NaCl 溶液



(b) CaCl₂ 溶液

图 7 NaCl 与 CaCl₂ 溶液的质量分数与折射率的关系

利用几种混合溶液的测量结果对上式进行验证,如表 3 所示. 由表 3 可知实验测量值与理论值的相对偏差均在 $\pm 0.5\%$ 以内,表明实验结果与理论分析基本吻合.

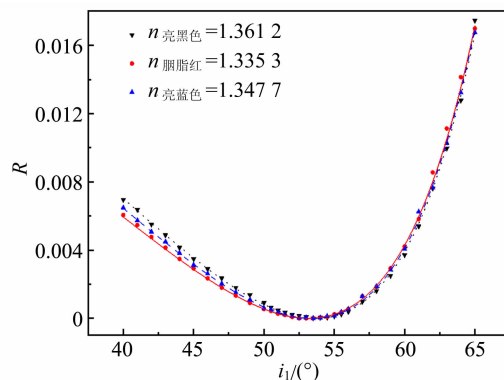
表 3 混合溶液折射率的测量值与理论值

混合溶液	$w_{\text{NaCl}} + w_{\text{CaCl}_2}$	n		E_r
		理论值	实验值	
1	12% + 5%	1.362	1.357	0.37%
2	12% + 10%	1.377	1.377	0.00%
3	12% + 15%	1.391	1.392	-0.07%
4	6% + 10%	1.362	1.358	0.29%
5	9% + 10%	1.370	1.376	-0.44%

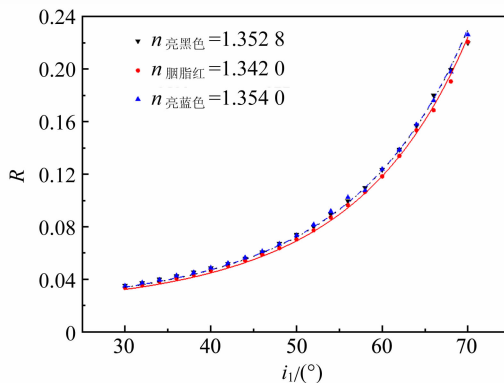
3.2 有色溶液反射率与颜色的关系

由于反射法测量只依赖于液体的表层反射,对于很薄的液体层,吸收率可忽略不计. 因此,对于质量分数均为 10% 的有色溶液(存在光的吸收),s/p 光的反射率曲线仍然与菲涅耳公式拟合

出的曲线符合较好($R^2 > 0.998$),如图 8 所示. 当入射角 $i_1 < 53^\circ$ 时,黑色、蓝色溶液对 p 光的反射率 R 高于红色溶液,如图 8(a) 所示;而对于任意入射角,黑色、蓝色溶液对 s 光的反射率 R 均高于红色溶液,如图 8(b) 所示. 虽然有色溶液中的食用色素成分均为有机物,但可以发现无论用 p 光还是 s 光照射,根据反射曲线拟合得到相同质量分数的有色溶液折射率满足关系: $n_{\text{胭脂红}} < n_{\text{亮蓝色}} \leq n_{\text{亮黑色}}$,即对于相同质量分数的有色溶液,颜色越深,折射率越大.



(a) p 光



(b) s 光

图 8 不同颜色溶液的 p 光和 s 光的反射曲线

对于出现以上现象的原因可以借用位移极化的机理进行解释:无极分子发生位移极化和有极分子发生取向极化时,均要从电场中获得能量,用于补偿振动过程中的能量损耗. 溶液呈现红色的原因是分子对红色波长的光吸收较少,因此用红色激光照射时,分子仅能获得少部分的光能用于极化振动,即极化强度越小,折射率也越小.

4 结束语

采用非线性拟合法测量溶液的折射率不仅克

服了布儒斯特角附近光强较小、难以准确界定的缺陷,还有效利用了实验数据,提高了折射率的测量精度。另外,提出了确定偏振片特征方向的简单方法——对称变换法,该方法思想巧妙,操作简单,具有较高的精确度,再配合反射率曲线,最终能够确定出偏振片的偏振方向。本文在理论和实验上研究了溶液质量分数对折射率的影响,并测量出了混合溶液折射率与各组分浓度之间的线性叠加关系。该实验对折射率的测量不依赖于折射光,因此适合用于测量有色溶液的折射率。溶液折射率与离子质量分数的关系研究为测量(混合)溶液中的离子质量分数提供了可行思路。

参考文献:

[1] 李硕,赵婉婷,罗浩,等. 增加平面玻璃板的反射率

测量不同浓度 NaCl 液体折射率[J]. 大学物理实验,2019,32(2):25-27.

[2] 魏茂金,杨崴崴,刘德功. 基于线偏振光反射率测量介质折射率的研究[J]. 应用光学,2010,31(1):100-104.

[3] 符栋梁,王伟. 综合光学实验课教学设计[J]. 实验室科学,2020,23(6):126-127,130.

[4] 谢金哲,戴瑞,贾艳. 指向物理观念建构的高中物理教学设计[J]. 中学物理,2021,39(3):42-45.

[5] 邱学军,姚文俊,曹振洲,等. 光的偏振综合实验设计[J]. 大学物理实验,2020,33(5):52-55.

[6] 丁文革,王崇,张荣香,等. 界面反射光的偏振态分析[J]. 物理与工程,2021,31(1):82-87,103.

[7] 谢一凡,胡雪莹. 全反射对偏振态的改变规律及实验验证[J]. 物理实验,2020,40(8):46-49.

Measuring liquid refractive index and reflectivity based on linearly polarized light

YAO Xing-xing, LIU Shu-xi, LI Wei-yang

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310013, China)

Abstract: An experimental device for measuring the refractive index and reflectivity of the solution was set up. The reflectivity curve of linearly polarized light in the characteristic direction on the liquid surface was obtained by the symmetric exchange method, and the refractive index of the solution was obtained by the theoretical formula fitting. Besides, the relationship between the refractive index and the solute mass fraction was studied. The results showed that the refractive index and the solute mass fraction had better linearity within a certain range. The reflectivity of different color solutions to monochromatic polarized light was measured and compared, and it was found that the darker the color, the greater the refractive index. And the displacement polarization theory was used to explain the experimental phenomenon.

Key words: refractive index; reflectivity; linearly polarized light; Brewster angle

[责任编辑:郭伟]