

用液芯柱透镜快速测量液相扩散系数-折射率空间分布瞬态测量法

孟伟东 孙丽存 翟影 杨瑞芬 普小云

Rapid measurement of the diffusion coefficient of liquids using a liquid-core cylindrical lens: a method for analysing an instantaneous diffusive picture

Meng Wei-Dong Sun Li-Cun Zhai Ying Yang Rui-Fen Pu Xiao-Yun

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 114205 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.114205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于太赫兹时域光谱技术的伪色彩太赫兹成像的实验研究

[False-color Terahertz Imaging System based on Terahertz Time Domain Spectroscopy](#)

物理学报.2015, 64(11): 114206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114206>

可见光域多波长叠层衍射成像的实验研究

[Experimental study on multi-wavelength ptychographic imaging in visible light band](#)

物理学报.2015, 64(8): 084203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084203>

基于分块速度域改进迭代运动目标检测算法的红外弱小目标检测

[A block-based improved recursive moving-target-indication algorithm](#)

物理学报.2014, 63(7): 074208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074208>

基于数字全息及复用技术的全场偏振态测试方法

[Full-field detection of polarization state based on multiplexing digital holography](#)

物理学报.2013, 62(22): 224204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224204>

单摄像机下基于眼动分析的行为识别

[Eye movement analysis for activity recognition based on one web camera](#)

物理学报.2013, 62(17): 174203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.174203>

用液芯柱透镜快速测量液相扩散系数-折射率空间分布瞬态测量法*

孟伟东 孙丽存 翟影 杨瑞芬 普小云†

(云南大学物理科学技术学院物理系, 昆明 650091)

(2014年9月30日收到; 2014年12月15日收到修改稿)

本文提出了一种快速测量液相扩散系数的方法, 该方法以液芯柱透镜作为液相扩散池和成像元件, 利用柱透镜成像过程中特有的折射率空间分辨测量能力, 只需记录一幅瞬态扩散图像, 根据图像的像宽与折射率的对应关系, 基于扩散定律快速计算出液相扩散系数. 实验研究了室温 (25 °C) 下乙二醇和纯水间的扩散过程, 用折射率空间分布法测量了扩散系数, 和其他测量方法得到的结果进行了分析对比, 结果表明: 用折射率空间分布法测量液相扩散系数具有数据采集耗时短 (~20 ms)、测量速度快 (< 1 s)、精度高 (相对误差 < 3%) 和操作简单的特点, 为快速测定液相扩散系数提供了一种有效的新方法.

关键词: 扩散系数, 快速测量, 折射率空间分布, 液芯柱透镜

PACS: 42.30.-d, 07.60.-j, 07.05.Fb, 47.27.Qb

DOI: 10.7498/aps.64.114205

1 引言

扩散系数是研究传质过程, 计算传质速率及化工设计与开发的重要基础数据 [1,2], 目前研究较多的是固体金属离子间的扩散 [3,4]. 平均间距比气体分子小、形状不及固体排列规则的液相扩散系数的数据相当匮乏. 而液相扩散系数又广泛的应用于研究生物、化工、医学及环保等行业中 [5-7]. 因此就需要一种快速、准确测量液相扩散系数的方法. 目前测量液相扩散系数的方法主要是通过间接地测量溶液由于扩散过程形成的浓度随空间和时间的分布, 根据描述扩散过程的 Fick 定律 [8] 计算出液相扩散系数. 从测量扩散过程中溶液浓度分布的实验方法来看, 目前存在折射率测量 [9]、动态光散射测量 [10]、荧光分子示踪测量 [11]、放射性元素示踪测量 [12] 等方法, 广泛采用的是折射率测量的方法, 尤其以折射率测量中的全息干涉法 [13,14] 的使用最为

普遍. 这种方法对实验装置的稳定性要求高, 测量时间较长, 对实验相关仪器设备要求较高. 为了解决这些存在的问题, 我们提出了在玻璃毛细管 [15] 和液芯柱透镜 [16,17] 中测量液相扩散系数的方法——等折射率薄层测量法. 该方法在保证测量精度的前提下, 将测量时间从传统方法的 120 min 以上缩减到 40 min 以下. 但是, 等折射率薄层测量法需要采集不同扩散时刻的多幅扩散图像, 多幅图像采集的要求使得该方法仍是一种耗时较长的测量方法. 本文在如上工作的基础上提出一种液相扩散系数的瞬态测量方法, 采用这种新方法, 只需在扩散过程中适当时刻采集一幅扩散图像 (耗时 ~20 ms), 根据图像反映的扩散介质在空间的折射率分布规律, 即可用图像特征提取和处理程序快速计算出液相扩散系数. 用这种方法测量液相扩散系数的耗时小于 1 s、相对误差小于 3%, 实现了瞬态、准确地测量液相扩散系数的目的.

* 国家自然科学基金 (批准号: 11164033, 61465014)、云南省应用基础研究基金 (批准号: 2011FA006) 和云南省高校科技创新团队支持计划资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xytu@163.com

2 测量原理

2.1 折射率空间分布的计算方法

在液芯柱透镜内注入折射率为 n_i 的液体介质, 如图 1 所示, 当单色平行光垂直于 Z 轴通过透镜时, 会在透镜的像方焦平面上形成一条平行于 Z 轴的明锐焦线(如图 1(a) 中 l_1). 柱透镜的焦距 d_i 满足如下递推关系 [16]:

$$d_i = \frac{R_4 S_4}{[n_0 R_4 + (n_0 - 1) S_4]} + d_1, \quad (1a)$$

$$S_4 = \frac{n_0 R_3 S_3}{n_i R_3 + (n_i - n_0) S_3} - d_2, \quad (1b)$$

$$S_3 = \frac{n_i R_2 S_2}{n_0 R_2 + (n_i - n_0) S_2} - 2(d_1 - d_2), \quad (1c)$$

$$S_2 = \frac{n_0 R_1}{(n_0 - 1)} - d_2. \quad (1d)$$

式中, R_1, R_2, R_3 和 R_4 分别表示柱透镜四个曲面的曲率半径, n_0 表示透镜材料的折射率, d_1 和 d_2 分别表示中轴线到透镜边缘的距离和柱透镜的壁厚. 用实验方法测量出液芯柱透镜的焦距 d_i , 代入 (1) 式即可反解出柱透镜内部待测液体的折射率 n_i [16].

在柱透镜内先后注入两种不同折射率的扩散溶液, 经扩散后, 液体沿柱透镜轴向形成折射率的某种梯度分布, 平行光经柱透镜后会聚的焦线将是一条如图 1(a) 所示的斜线 (l_2). 在成像系统的对准平面 (α) 上, 只有折射率 $n_i = n_c$ 的液体薄层能够清晰成像; 对折射率 $n_i = n_1 < n_c$ 的液体薄层, 焦点位置在 α 后(欠聚焦), 平行光在 α 上形成宽度为 Σ_1 的弥散线段; 对折射率 $n_i = n_2 > n_c$ 的液体薄层, 焦点位置在 α 前(过聚焦), 平行光在 α 上形成宽度为 Σ_2 的弥散线段. 下面以“欠聚焦”情况为例, 用几何光学方法推导出焦距 d_i 和弥散线段 Σ_i 间的关系.

如图 1(b) 所示, 当液体薄层的折射率 $n_i = n_c$ 时, 平行光经柱透镜后在 α 上清晰成像, 柱透镜焦距为 d_c ; 当液体薄层的折射率 $n_i < n_c$ 时, 柱透镜焦距为 d_i , 平行光在 α 上形成的光斑宽度为 Σ_i . 设入射光的光束宽度为 h , 由几何关系近似可得,

$$\frac{h/2}{d_i} = \frac{\Sigma_i/2}{d_i - d_c}, \quad (2)$$

或 $d_i = hd_c/(h - \Sigma_i)$. 将 d_i 代入 (1) 式中, 可以求解出对应像宽处的折射率 n_i . 根据一幅扩散图像的像宽与位置的对应关系即可快速得出折射率的空间分布. 编制图像特征提取和处理程序, 可由

(1), (2) 两式对 CMOS 采集到的瞬态图像做折射率空间分布的实时计算.

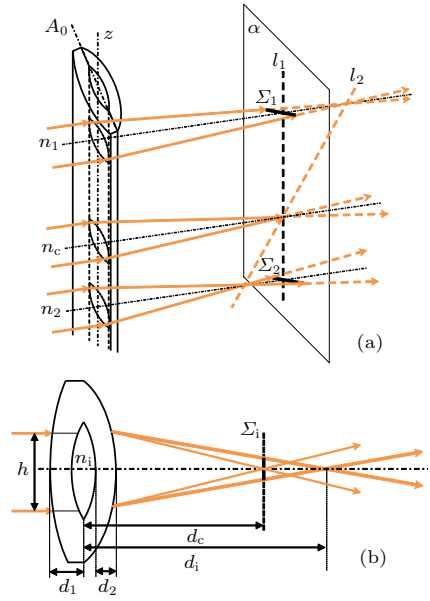


图 1 液芯柱透镜的成像光路图 (a) 三维成像示意图; (b) 二维成像示意图

Fig. 1. Imaging light path diagram of the liquid core cylindrical lens: (a) schematic diagram of three-dimensional imaging; (b) schematic diagram of two-dimensional imaging.

2.2 液相扩散系数的测量方法

将两种溶液沿柱型透镜轴向 (Z 轴) 的扩散看成一维自由扩散过程, 设两种扩散溶液分别为 A 和 B, A 在 B 中的浓度是 C , C 沿 Z 轴的扩散过程遵循 Fick 第二定律. 设扩散开始前 ($t < 0$) 两种溶液在界面 ($Z = 0$) 两边的初始浓度分别为 C_1 和 C_2 (对于乙二醇和纯水之间的扩散 $C_1 = 1, C_2 = 0$), 则 Fick 第二定律表达式的解满足 [9]

$$C(Z, t) = \frac{C_1 + C_2}{2} + \frac{C_1 - C_2}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{Z}{2\sqrt{Dt}}\right), \quad (3)$$

式中, $C(Z, t)$ 是 t 时刻在位置 Z 处的浓度; D 是扩散系数; Z 是距扩散界面的距离;

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-t^2) dt$$

是高斯误差函数. 用 $n(Z, t)$ 表示 t 时刻 Z 位置处的折射率, 通过实验方法可以预先求出溶液浓度与折射率的函数关系, $C = f(n)$ 或 $C(Z, t) = f[n(Z, t)]$. 两种扩散溶液接触时间和接触面分别记为 $t = 0$ 和 $Z_0 = 0$, 数据采集点距 Z_0 的相对位置记为 Z_i . 由于最初的接触界面不平整和实验操作过程中实际 Z_0 的选取导致的位置偏差 ΔZ [15,17], 实际测量位

置 Z'_i 可以修正为 $Z'_i = Z_i - \Delta Z$. (3) 式可以写为 Z'_i 的函数

$$Z'_i = 2\sqrt{Dt} \cdot \operatorname{erfinv} \left\{ \frac{f[n(Z'_i, t)] - \frac{C_1 + C_2}{2}}{\frac{C_1 - C_2}{2}} \right\} - \Delta Z,$$

以下均以乙二醇和纯水之间的扩散为例, 代入 C_1 , C_2 可得

$$Z'_i = 2\sqrt{Dt} \cdot \operatorname{erfinv} \left\{ \left[f[n(Z'_i, t)] - \frac{1}{2} \right] / \left(\frac{1}{2} \right) \right\} - \Delta Z. \quad (4)$$

对一个折射率为 n_c 的液体薄层,

$$\operatorname{erfinv} \left\{ \left[f[n_c(Z'_i, t)] - \frac{1}{2} \right] / \left(\frac{1}{2} \right) \right\}$$

是一个常数, 随着扩散的进行, 该液体薄层清晰成像的位置 Z'_i 会随着时间 t 的推移而发生变化, Z'_i 和 \sqrt{t} 之间是一一对应关系. 对实验中的 Z'_i 与 \sqrt{t} 进行线性拟合得到的一次项系数

$$k_1 = 2\sqrt{D} \operatorname{erfinv} \left\{ \left[f[n_c(Z'_i, t)] - \frac{1}{2} \right] / \left(\frac{1}{2} \right) \right\},$$

由此可计算出扩散系数值

$$D = k_1^2 / 4 \left(\operatorname{erfinv} \left\{ \left[f[n_c(Z'_i, t)] - \frac{1}{2} \right] / \left(\frac{1}{2} \right) \right\} \right).$$

该方法即为等折射率薄层测量法^[15,17].

对一固定的扩散体系, 从扩散开始到记录某一幅扩散图像时的时间记为 t , (4) 式中 \sqrt{Dt} 为一常数. 在固定的时刻 t , 溶液的折射率 $n(Z'_i, t)$ 随 Z'_i 的空间分布是确定的, 即 Z'_i 与

$$\operatorname{erfinv} \left\{ \left[f[n(Z'_i, t)] - \frac{1}{2} \right] / \left(\frac{1}{2} \right) \right\}$$

是一一对应的函数关系. 在扩散过程中取一瞬态图像, 根据图像中 Z'_i 和折射率 n_i 之间的对应关系, 对实验中的 Z'_i 与

$$\operatorname{erfinv} \left\{ \left[f[n_i(Z'_i, t)] - \frac{1}{2} \right] / \left(\frac{1}{2} \right) \right\}$$

进行线性拟合后得到一次项系数 $k_2 = 2\sqrt{Dt}$, 由此可计算出扩散系数值 $D = k_2^2 / (4t)$. 由于拟合数据取自一幅瞬态图像, 我们称这种方法为折射率空间分布的瞬态测量法.

3 实验结果

实验装置详情见文献^[15, 17]报导. 在室温 (25 °C) 下配置不同浓度的乙二醇水溶液, 用阿贝折射仪测量不同浓度的乙二醇水溶液对应的折射率后, 拟合出乙二醇浓度和折射率之间满足线性关系, $C = f(n) = 10.129n - 13.517$, (相关系数 $R^2 = 0.998$). 为了测量室温下乙二醇和纯水的扩散系数, 首先用纯水 ($n = 1.3330$) 对液芯柱透镜的焦距进行标定. 标定后, 在柱透镜内缓慢注入 25 mm 高的乙二醇溶液, 静置 300 s 以减小液面的波动. 用相同的方法在柱透镜中乙二醇的液面上注入 25 mm 高的纯水. 图 2 是选择 $n_c = 1.3434$ 的折射率薄层从接触到扩散 1620 s 的过程中, 每隔 120 s 得到的扩散图像.

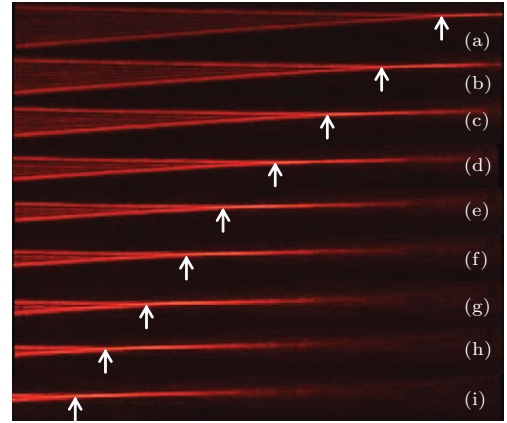


图 2 乙二醇在纯水中扩散过程图 ($n_c = 1.3434$, 箭头指出焦点位置) (a) $t = 660$ s; (b) $t = 780$ s; (c) $t = 900$ s; (d) $t = 1020$ s; (e) $t = 1140$ s; (f) $t = 1260$ s; (g) $t = 1380$ s; (h) $t = 1500$ s; (i) $t = 1620$ s

Fig. 2. Ethylene glycol and water diffusion process image, $n_c = 1.3434$: (a) $t = 660$ s; (b) $t = 780$ s; (c) $t = 900$ s; (d) $t = 1020$ s; (e) $t = 1140$ s; (f) $t = 1260$ s; (g) $t = 1380$ s; (h) $t = 1500$ s; (i) $t = 1620$ s. The arrow is the focus position.

图 3 为第一组实验数据记录完后, 重新选取 $n_c = 1.3522$ 的折射率薄层, 每隔 180 s 得到的扩散图像.

3.1 瞬态法测量结果

用瞬态法测量液相扩散系数时, 只需在扩散过程中的任一时刻拍摄一幅扩散图像, 在该图像上选取 m 个采样点, 测量出各采样点的成像宽度 Σ_i 以及 Z'_i 即可快速测量出测量扩散系数. 如图 4 所示, 以 1740 s 采集得到的图像为例, 在图像上若干个采

样点, 测量出各采样点的像宽 Σ_i 和 Z'_i . 将 Σ_i 代入 (1) 和 (2) 式, 可得到空间折射率的值 n_i .

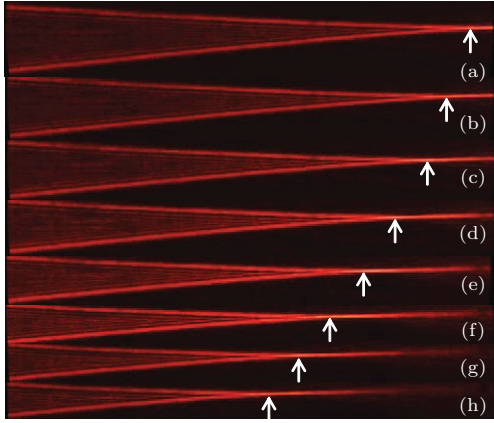


图3 乙二醇在纯水中扩散过程图像 ($n_c = 1.3522$, 箭头指出焦点位置) (a) $t = 1740$ s; (b) $t = 1920$ s; (c) $t = 2100$ s; (d) $t = 2280$ s; (e) $t = 2460$ s; (f) $t = 2640$ s; (g) $t = 2820$ s; (h) $t = 3000$ s

Fig. 3. Ethylene glycol and water diffusion process image, $n_c = 1.3522$: (a) $t = 1740$ s; (b) $t = 1920$ s; (c) $t = 2100$ s; (d) $t = 2280$ s; (e) $t = 2460$ s; (f) $t = 2640$ s; (g) $t = 2820$ s; (h) $t = 3000$ s. The arrow is the focus position.

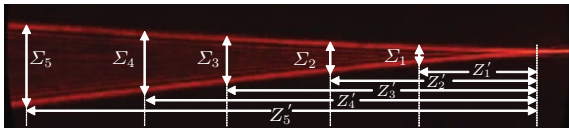


图4 瞬态扩散图像数据采样示意图 ($t = 1740$ s)

Fig. 4. The data sampling schematic diagram of the transient diffusion image ($t = 1740$ s).

根据 (4) 式计算出在 $t = 1740$ s 时, 不同位置处扩散样品的浓度值 $C_i(Z'_i)$ 和反误差函数, 测量数据如表 1 所示.

对表 1 中采样点的位置 Z'_i 与反误差函数 $\text{erfinv}\left\{\left[\frac{f[n_i(Z'_i, t)] - \frac{1}{2}}{\left(\frac{1}{2}\right)}\right]\right\}$ 进行线性拟合, 拟合结果为

$$Z'_i = 2828.9 \text{erfinv}\left\{\left[\frac{f[n_i(Z'_i, t)] - \frac{1}{2}}{\left(\frac{1}{2}\right)}\right]\right\} - 1789.9, \quad (R^2 = 0.9893), \quad (5)$$

由 (5) 式可知 $\Delta Z = 1789.9 \mu\text{m}$, 一次项系数 $k_3 = 2828.9 = 2\sqrt{Dt}$. 代入数据即可计算得到 $t = 1740$ s 时刻的扩散系数 $D = 1.150 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{s}$.

对图 2 和图 3 中其他时刻的图像进行位置 Z'_i (在拟合结果中用 y 表示) 与反误差函数 $\text{erfinv}\left\{\left[\frac{f[n_i(Z'_i, t)] - \frac{1}{2}}{\left(\frac{1}{2}\right)}\right]\right\}$ (在拟合结果中用 x 表示) 拟合, 计算结果如表 2 所示.

表 1 1740 s 时刻折射率空间分布法数据

Table 1. The data of the refractive index spatial distribution method ($t = 1740$ s).

$Z'_i/\mu\text{m}$	$\Sigma_i/\mu\text{m}$	n_i	C_i	反误差函数
135	83.6	1.3506	0.1630	0.6946
180	105.6	1.3501	0.1586	0.7071
250	123.2	1.3499	0.1560	0.7148
300	136.4	1.3494	0.1509	0.7303
340	154.0	1.3489	0.1457	0.7462
390	171.6	1.3483	0.1396	0.7652
430	189.2	1.3477	0.1335	0.7847
465	202.4	1.3474	0.1310	0.7933
500	220.0	1.3470	0.1266	0.8079
555	237.6	1.3465	0.1214	0.8258
615	264.0	1.3459	0.1154	0.8474
650	281.6	1.3454	0.1102	0.8665
670	303.6	1.3451	0.1076	0.8764
720	312.4	1.3448	0.1042	0.8897

表 2 不同时刻瞬态折射率空间分布法数据

Table 2. The data of the refractive index spatial distribution method at different time.

t/s	采样点数	拟合结果/ μm	相关系数 (R^2)	$D/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	相对误差/%
660	14	$y = 1881.9x - 1737.9$	0.9898	1.342×10^{-5}	14.70
780	12	$y = 2071.7x - 1910.1$	0.9987	1.376×10^{-5}	17.61
900	10	$y = 2164.1x - 1986.8$	0.9987	1.301×10^{-5}	12.20
1020	8	$y = 2115.2x - 1924.9$	0.9963	1.097×10^{-5}	6.24
1140	5	$y = 2216.1x - 2062.6$	0.9973	1.077×10^{-5}	7.95
1740	14	$y = 2828.9x - 1789.9$	0.9893	1.150×10^{-5}	1.71
1920	13	$y = 3032.8x - 1956.4$	0.9779	1.198×10^{-5}	2.39
2100	13	$y = 3104.9x - 1996.0$	0.9882	1.148×10^{-5}	1.88
2280	12	$y = 3223.5x - 2068.5$	0.9949	1.139×10^{-5}	2.65
2460	11	$y = 3357.2x - 2151.4$	0.9949	1.145×10^{-5}	2.14
2640	10	$y = 3553.3x - 2283.0$	0.9906	1.196×10^{-5}	2.22
2820	8	$y = 3697.2x - 2382.0$	0.9920	1.212×10^{-5}	3.59
3000	7	$y = 3545.1x - 2223.1$	0.9893	1.047×10^{-5}	10.51

表3 等折射率薄层位置随时间演变的记录表
Table 3. The data of equivalent refractive index location varies with time.

折射率薄层 $n_c = 1.3434$			折射率薄层 $n_c = 1.3522$		
时间 t/s	\sqrt{t}	测量位置 $Z'_i/\mu\text{m}$	时间 t/s	\sqrt{t}	测量位置 $Z'_i/\mu\text{m}$
660	25.69	120.6	1740	41.71	73.8
780	27.93	252	1920	43.82	162
900	30.00	414	2100	45.83	241.2
1020	31.94	536.4	2280	47.75	327.6
1140	33.76	653.4	2460	49.60	423
1260	35.50	759.6	2640	51.38	502.2
1380	37.15	867.6	2820	53.10	574.2
1500	38.73	988.2	3000	54.77	653.4
1620	40.25	1060.2	—	—	—

3.2 等折射率薄层法测量结果

用等折射率薄层法对 $n_c = 1.3434$ 和 $n_c = 1.3522$ 的两个薄层中位置 Z'_i 随时间 t 的变化情况如表 3 所示.

对表 3 中 $n_c = 1.3434$ 的数据 Z'_i 和 \sqrt{t} 进行线性拟合, 拟合结果为 $Z'_i = 65.466\sqrt{t} - 1561.1 \mu\text{m}$, (相关系数 $R^2 = 0.9990$). 将 $f[n_c(Z'_i, t)]$ 代入 (4) 式即可得

$$2\sqrt{D} \cdot \operatorname{erfinv} \left\{ \left[10.129n_c - 13.517 - \frac{1}{2} \right] / \left(\frac{1}{2} \right) \right\} = 65.466, \quad (6)$$

代入数据计算可得 $D = 1.195 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$.

对表 3 中 $n_c = 1.3522$ 的数据拟合结果为 $Z'_i = 44.718\sqrt{t} - 1798.9 \mu\text{m}$, (相关系数 $R^2 = 0.9991$), 计算可得 $D = 1.187 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$.

4 结果讨论

4.1 瞬态折射率空间分布法分析

比较表 1 数据 (图像采集时间 $t = 1740 \text{ s}$) 的计算结果 ($D = 1.150 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$) 和与文献报道值 [18] ($D = 1.17 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$), 相对误差为 1.71%. 从表 2 的测量结果可以看出, 在 1740—2640 s 的扩散期间采集图像, 得到扩散系数与文献值之间的相对误差小于 3%.

表 2 中 660—900 s 之间的三组数据相对误差较大. 原因可能是由于液体注入过程引起的紊流

在 900 s 内未能完全消除, 紊流改变了折射率的空间分布并造成测量误差. 随着扩散时间的增加, 紊流对扩散系数的影响逐渐减小, 但由于 1020—1620 s 之间的图像变窄造成有效采样点数量减少, 实验结果的相对误差也较大. 同理, 图像采样时间超过 2800 s 时, 有效采样点数量的减少使得相对误差又开始增大. 显然, 选择适当的扩散时间采集图像, 能够有效地提高扩散系数测量的准确性.

4.2 等折射率薄层与折射率空间分布瞬态测量法对比分析

对表 3 中实验数据的计算结果表明, 先后取 $n_c = 1.3434$ 和 1.3522 的折射率薄层做扩散测量, $D(n_c = 1.3434) = 1.195 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, $D(n_c = 1.3522) = 1.187 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$; 测量结果与文献值之间的相对误差分别为 2.14% 和 1.45%. 等折射率薄层测量法需要在一定的扩散时间内 (~40 min) 采集多幅扩散图像, 得到的液相扩散系数是在一定时间范围的统计平均值. 而用折射率空间分布瞬态测量方法, 图像采集时间 ~20 ms (本实验用 CMOS), 结合图像特征提取和处理程序, 可以在 1 秒内完成扩散系数的测量. 因此, 瞬态测量方法是一种快速测定液相扩散系数的方法.

5 结 论

本文提出并通过实验验证了一种快速测量液相扩散系数的方法: 折射率空间分布瞬态测量法.

该方法利用柱透镜成像过程中特有的折射率空间分辨测量能力, 只需记录一幅瞬态扩散图像, 根据图像的像宽与折射率的对应关系, 即可基于扩散定律快速计算出液相扩散系数. 乙二醇和纯水间的扩散实验表明: 第一, 选择适当的时间记录图像用瞬态法测量扩散系数, 测量值和文献值的相对偏差小于1.71%, 和等折射率薄层法测量值的相对偏差小于1.45%, 瞬态法具有测量精度高的特点. 第二, 瞬态法采集数据的时间~20 ms, 测量扩散系数的时间小于1 s, 是一种快速测量液相扩散系数的新方法.

参考文献

- [1] Cussler E L 1997 *Diffusion-Mass Transfer in Fluid Systems* (Cambridge: Cambridge University Press) p13
- [2] Zuo M, Han Y L, Qi L, Chen Y 2007 *Chinese Science Bulletin*. **52** 3325
- [3] Ju Y Y, Zhang Q M, Gong Z Z, Ji G F 2013 *Chin. Phys. B* **22** 083101
- [4] Ahmed A, Wu J T 2011 *Chin. Phys. B* **20** 106601
- [5] Zhang S Y, Bao S L, Kang X J, Gao S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 208703 (in Chinese) [张首誉, 包尚联, 亢孝俭, 高嵩 2013 物理学报 **62** 208703]
- [6] Wang Z Z, Wang N, Yao W J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7431 (in Chinese) [王振中, 王楠, 姚文静 2010 物理学报 **59** 7431]
- [7] Radi Z, L ábár J L, Barna P B 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 3220
- [8] Bek W J, Muttzal M K 2006 *Transport Phenomena* (New York: Wiley) p75
- [9] Zhao C W, Ma P S, He M X 2002 *Chemical Industry and Engineering* **19** 374 (in Chinese) [赵长伟, 马沛生, 何明霞 2002 化学工业与工程 **19** 374]
- [10] Cheng Y, Wei L, Chi W 2004 *J. Phys. Chem. B* **108** 11866
- [11] Culbertson C T, Jacobson S C, Ransey J M 2002 *Talanta* **56** 365
- [12] WANG J H 1952 *J. Am. Chem. Soc.* **74** 182
- [13] Chhaniwal V K, Anand A, Girhe S, Patil D, Subrahmanyam N, Narayanamurthy C S 2003 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **5** S329
- [14] Ghaleh K J, Tavassoly M T, Mansour N 2004 *J. Phys.D: Appl. Phys.* **37** 1993
- [15] Li Q, Pu X Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 094206 (in Chinese) [李强, 普小云 2013 物理学报 **62** 094206]
- [16] Li Q, Sun L C, Meng W D, Pu X Y 2012 *Chinese Journal Of Lasers* **39** 1008005 (in Chinese) [李强, 孙丽存, 孟伟东, 普小云 2012 中国激光 **39** 1008005]
- [17] Li Q, Pu X. Y, Yang R. F Q, Zhai Y 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 054203
- [18] Hills E E, Abraham M H, Hersey A 2011 *Fluid Phase Equilib.* **303** 45

Rapid measurement of the diffusion coefficient of liquids using a liquid-core cylindrical lens: a method for analysing an instantaneous diffusive picture*

Meng Wei-Dong Sun Li-Cun Zhai Ying Yang Rui-Fen Pu Xiao-Yun[†]

(Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650091, China)

(Received 30 September 2014; revised manuscript received 15 December 2014)

Abstract

This paper studies the equivalent refractive index method and other methods to measure the liquid diffusion coefficient. Based on this, a quick method to measure the liquid diffusion coefficient is proposed, i.e. using a specially designed asymmetric liquid-core cylindrical lens as both diffusive pool and imaging element. By means of this system with the liquid-core cylindrical lens to measure the diffusion coefficient, we can eliminate the spherical aberration and improve the accuracy in refractive index measurement. Based on the spatially resolving ability of the cylindrical lens in measuring the refractive index, only one instantaneous diffusive picture is required. Depending on the correspondence between the image width and the refractive index, we thus can quickly calculate the diffusion coefficient D by the Fick's second law. Then the diffusive process of ethylene glycol in water at 25 °C is investigated by this method. We calculate the diffusion coefficient between 660—3000 s with the method to analyse an instantaneous diffusion picture. At the beginning, injection will cause the liquid turbulent, and thus create a larger diffusion coefficient. In the course of diffusion, the influence of turbulence on the diffusion coefficient gradually decreases, but the image narrowing can make inaccurate results. Therefore, this method is required to be used at an appropriate time and an appropriate position to reduce experimental errors. After repeated experiments we can conclude that, between 1500—2700 s we may select the appropriate measurement of location for measuring liquid diffusion coefficient by the method to analyze an instantaneous diffusive picture. This not only can avoid the effect of turbulence but also avoid the effect of fewer sampling points. Compared with other methods reported in the literature, the results show that this method is characterized by short time (~20 ms) in data acquisition, faster measurement (<1 s), high-accuracy (relative error <3%), and easy operation, thus providing a new method for measuring the diffusion coefficient of liquids rapidly.

Keywords: diffusion coefficient, fast measurement, spatial distribution of refractive index, liquid-core cylindrical lens

PACS: 42.30.-d, 07.60.-j, 07.05.Fb, 47.27.Qb

DOI: [10.7498/aps.64.114205](https://doi.org/10.7498/aps.64.114205)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11164033, 61465014), the Applied Basic Research Foundation of Yunnan Province, China (Grant No. 2011FA006), and the Items on Research Team of Science and Technology in Yunnan (IRTSTYN) Province.

† Corresponding author. E-mail: xypu@163.com