

不同浓度不同温度下葡萄糖溶液折射率的精确测量

宋哲义 冯国英 张涛

(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要 葡萄糖溶液折射率在科研、工业等多领域都有着很重要的应用,精确地测量出其折射率有着十分重要的意义。因此使用分光棱镜干涉法测量了不同浓度时不同温度下葡萄糖溶液的折射率,简单介绍了此方法的基本原理及装置并且测量出已知氯化钙溶液样品折射率,与文献值进行校准验证了其可靠性,精度高达 10^{-4} 量级。为了更好地研究葡萄糖溶液的特性,同时测量了不同温度时葡萄糖溶液折射率的变化情况并且绘制成了图表,也对实验测量的误差进行了分析,所得结果可以为医学生物等提供帮助。

关键词 测量; 折射率; 分光棱镜干涉法; 葡萄糖溶液; 误差分析

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.1208008

Accurate Measurement of the Refractive Index D-Glucose Solution at Various Concentrations at Different Temperatures

Song Zheyi Feng Guoying Zhang Tao

(Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Refractive index of D-Glucose solution in many areas such as scientific research and industry has very important applications. It's very important to measure the refractive index accurately. The beam splitter prism interferometry is used to measure refractive index of D-Glucose solution at different temperatures with different concentrations. The basic principle of this method and apparatus is introduced. The refractive index of a sample of known calcium chloride solution is measured by the system and contrasted with literature values to verify its reliability. The accuracy is up to 10^{-4} . In order to research the characteristics of D-Glucose solution, diversifications of D-Glucose solution's refractive index at different temperatures measured and plotted into graphs. Error analysis is conducted as well. The results can provide help for medicine and biology.

Key words measurement; refraction index; beam splitter prism interferometry; D-Glucose solution; error analysis

OCIS codes 290.3030; 230.1360; 120.3180; 160.4890

1 引言

折射率是物质的一个重要参数,无论是在物理、化学、生物、医学等方面,精确地测量物质的折射率都有着十分重要的意义。如今有许多种测量折射率的方法,测量固体常用最小偏向角法^[1],测量液体的有临界角法^[2]、光拍法^[3],气体测量则常用瑞利干涉仪^[4]或者表面等离子体传感器^[5]。其他的还有光斑移动法^[6]、菲涅耳衍射^[7],著名的马赫-曾德尔干涉

仪法^[8]、法布里-珀罗干涉仪法^[9]、迈克耳孙干涉仪法^[10]以及近些年常见的毛细管焦点法^[11-13]、液芯变焦柱透镜法^[14]、光纤式低相干技术^[15]和单通道自混干涉仪法(SMI)^[16]等。

而葡萄糖溶液折射率在化学生物、医疗诊断等方面都有着广泛的应用,例如在研究物质的化学组成部分,物质的相关特性分析以及医药临床检验时都需要知道物质的折射率,因此测量出其折射率十

收稿日期: 2014-06-09; 收到修改稿日期: 2014-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(10976017)

作者简介: 宋哲义(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光与光通信等方面的研究。E-mail: 315552001@qq.com

导师简介: 冯国英(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事新型激光技术方面的研究。

E-mail: guoing_feng@scu.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

分必要,而前面所述的方法相对来说有一定的局限性。临界角法^[2]需要将尺寸足够大的试件加工成三棱镜,破坏了试件的完整性;光拍法^[3]测量折射率时,一方面,在波形重合的过程中,移动较小的一段距离很难看出波形的变化,另一方面,是用肉眼判断两波形的重合,实验的误差较大;菲涅耳衍射法^[7]的计算过程十分复杂;传统干涉仪法^[8-10]稳定性较差;毛细管焦点法^[11-13]需要将光源宽度限制在毛细管内径范围内使得光线会聚角度不足;单通道自混干涉仪法^[16]需要进行多次的迭代。

本文使用分光棱镜干涉法^[17]测量了636.94 nm 波长下不同浓度时葡萄糖溶液的折射率以及 2% (质量分数)葡萄糖溶液在不同温度时的折射率变化,为了验证该方法的可靠性,在 589 nm 波长下分别测量了氯化钙溶液不同浓度时的折射率并且与参考值进行了拟合比对。

2 实验装置及原理

实验装置如图 1 所示。激光器发出的光束经过准直扩束为光斑直径约 20 mm 的光束(激光器是由

锦坤科技生产的型号分别为 589series 以及 635series 的两个光源)。型号为 GCD-011080M 的旋转台上固定的是一个矩形比色皿(壁厚 1 mm,壁间尺寸为 20 mm×10 mm),比色皿一半放入待测液体,一半放入参照液体或空气,实验选用空气为参照,同时比色皿外接一个温度控制器(型号为 XMT808)用来实时显示液体温度并且可以控制比色皿内液体的温度。电动旋转台的传动比为135:1,分辨率为 0.00067°。分光棱镜(分光比为 50:50)作为整个实验重要的干涉元件,光束在比色皿中分成两部分,一部分通过空气为参照光 path1,一部分通过待测液体为物光 path2,两部分光在分光棱镜中发生平行等距干涉,经过衰减后照射到 CCD(微视 MVC-II MVC1000M,帧率为 30 frame/s,有效像素为 1280 pixel×1024 pixel)上,可以清楚地看到干涉条纹。控制电动旋转台的转动,光程差变化产生的条纹移动,经过透镜放大后用一个计数器记录其大数部分,另外在 CCD 端获取图像处理计算小数部分。计数器为自制的一个带 LED 屏的单片机,能实时自动显示移动过的条纹数。

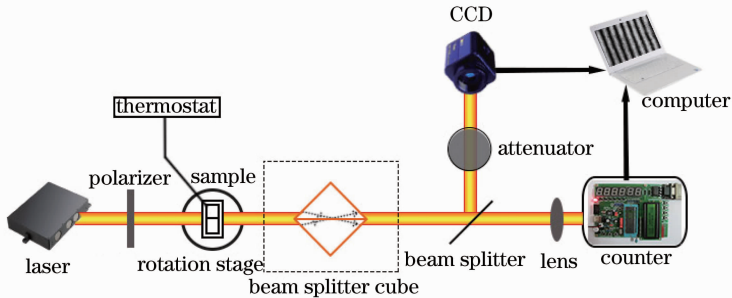


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of the experimental arrangement

实验所用的分光棱镜(BS)原理图如图 2 所示,在 x 轴上的有效范围 d 约为其边长的 30%,超过部分的光将会在壁上发生全反射。设 $E_1(x',y')$ 和

$E_2(x',y')$ 分别为入射面 Σ_{in} 上两束光的电场,透射光相位不变,在输出面 Σ_{out} 上会得到反射光与透射光的干涉图。

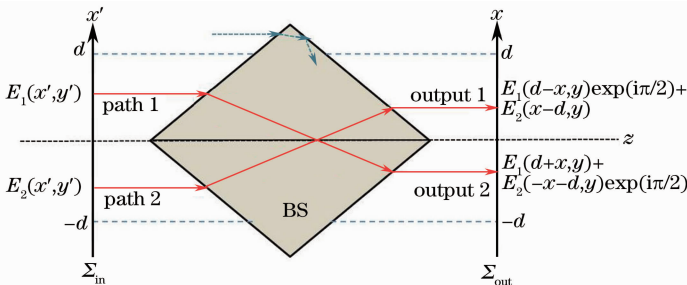


图 2 分光棱镜中光线图。 d 是 x 轴上的有效区域,超过的部分发生全反射

Fig. 2 Ray trajectories in the beam splitter cube. d is the size of the working region in the x direction, more external rays suffer total reflection

output 1 和 output 2 的光强分别为

$$I_{\text{output 1}} = |E_1(d-x, y)\exp[i\pi/2] + E_2(x-d, y)|^2 = |E_1(d-x, y)|^2 + |E_2(x-d, y)|^2 + 2|E_1(d-x, y)||E_2(x-d, y)|\cos[\xi_1(d-x, y) - \xi_2(x-d, y) + \pi/2], \quad (1)$$

$$I_{\text{output 2}} = |E_1(d+x, y) + E_2(-x-d, y)\exp[i\pi/2]|^2 = |E_1(d+x, y)|^2 + |E_2(-x-d, y)|^2 + 2|E_2(d+x, y)||E_2(-x-d, y)|\cos[\xi_1(d+x, y) - \xi_2(-x-d, y) - \pi/2], \quad (2)$$

式中 ξ_1, ξ_2 为 E_1, E_2 的相位。当入射光为平面波 E_0 ，有

$$E_1(x', y') = E_0; E_2(x', y') = E_0 \exp[i\xi(x', y')], \quad (3)$$

式中 $\xi(x', y')$ 是 path2 处待测样品的相位。

设分光比为 50:50, (1) 式和 (2) 式又可以写为

$$I_{\text{output 1}} = I_0 \{1 + \cos[\xi(x-d, y) - \pi/2]\} = I_0 [1 + \sin\xi(x-d, y)], \quad (4)$$

$$I_{\text{output 2}} = I_0 \{1 + \cos[\xi(-x-d, y) + \pi/2]\} = I_0 [1 - \sin\xi(-x-d, y)], \quad (5)$$

式中 $I_0 = E_0^2$ 。

假设旋转角为 θ , 条纹移动数为 N , 其关系为

$$N = (\sqrt{n^2 - n_0^2} \sin^2\theta - n_0 \cos\theta - n + n_0)d/\lambda, \quad (6)$$

式中 $n_0 = 1$ 为空气折射率, λ 为波长。最终可以得到待测液体折射率 n 计算式为

$$n = \frac{(N\lambda/d)^2 + 2(1 - \cos\theta)(n_0^2 - n_0N\lambda/d)}{2[n_0(1 - \cos\theta) - N\lambda/d]}. \quad (7)$$

3 结果与分析

测量时记录下旋转角度 θ 以及条纹移动数 N , 通过 (7) 式可以计算出待测溶液的折射率。为了验证系统的可靠性, 浓度间隔 2% (质量分数) 制备了不同浓度的氯化钙溶液, 用精度高达 0.001 g 的电子秤分别精确称量了不同质量的无水氯化钙固体,

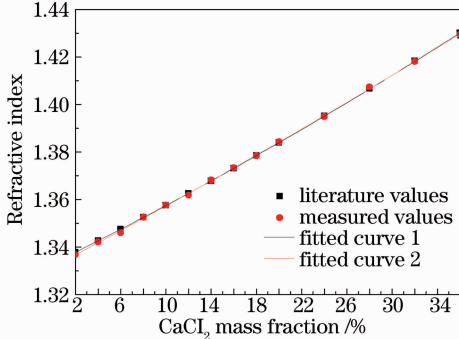


图3 不同浓度下氯化钙溶液折射率

Fig. 3 Refractive index under different concentrations of calcium chloride solution

倒入烧杯, 加水溶解, 倒入定容瓶内, 用水稀释至刻度线, 充分摇匀, 分别制成不同浓度氯化钙溶液进行测量。不同浓度下氯化钙溶液折射率测量值与参考值^[18]如图 3 所示, 波长为 589 nm, 测量时温度为 20 °C, 红点为测量值, 黑点为参考值, 并且分别对其进行拟合为红线和黑线, 表 1 为测量值 n_m 与参考值 n_l 比较, 通过图 3 与表 1 可以看出, 此实验系统可靠性较高, 精度可达小数点后 4 位。

表 1 氯化钙溶液折射率

Table 1 Refractive index of calcium chloride solution

Liquid	n_m	n_l
Calcium chloride	1.37505	1.37525

用制备氯化钙溶液相同的方法制备了不同浓度的葡萄糖溶液作为待测液进行了测量, 图 4 为不同浓度下葡萄糖溶液的折射率, 测量时波长为 636.94 nm, 温度同样为 20 °C, 并以波长 589 nm 时文献所给折射率作为参考, 红点为测量值, 黑点为参考值, 并分别对数据进行拟合为红线和黑线。

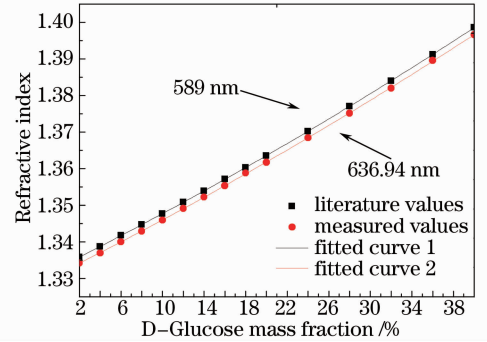


图 4 不同浓度下葡萄糖溶液折射率

Fig. 4 Refractive index under different concentrations of D-Glucose solution

实验测量的误差来源主要为以下几个: 比色皿壁厚 d 、旋转角度 θ 以及干涉条纹移动数 N , 下面分开讨论。

(7) 式中分别对 θ, d, N 求偏导可得

$$\frac{\partial n}{\partial \theta} = \frac{N\lambda}{d} \frac{(N\lambda/d - 2) \sin\theta}{2(1 - \cos\theta - N\lambda/d)^2}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial n}{\partial d} = \frac{N\lambda}{2d^2} - \frac{N\lambda \sin^2\theta}{2[d(1 - \cos\theta) - N\lambda]^2}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial n}{\partial N} = \frac{\lambda}{d} \frac{2(1 - \cos \theta)(N\lambda/d + \cos \theta) - (N\lambda/d)^2}{2(1 - \cos \theta - N\lambda/d)^2} \quad (10)$$

以氯化钙为例, 设 $\theta = 20^\circ$, $d = 10 \text{ mm}$, $N = 248.8369$ 代入(8)~(10)式得 $|\partial n/\partial \theta| = 2.7209$, $|\partial n/\partial d| = 24.8306$, $|\partial n/\partial N| = 0.0019$ 。旋转台分辨率为 0.00067° , 所以角度偏差 $\sigma_\theta = 0.00067^\circ = 1.1694 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 引起的折射率测量误差为 $\Delta n = (|\partial n/\partial \theta|)\sigma_\theta \approx 3.2 \times 10^{-5}$, 比色皿壁厚偏差 $\sigma_d = 0.01 \text{ mm}$, 其引起的折射率测量误差为 $\Delta n = (|\partial n/\partial d|)\sigma_d \approx 2.5 \times 10^{-4}$, 因为测量的移动条纹间距占 CCD 的 40 pixel, 所以条纹数的最小分辨率为 $\sigma_N = 1/40 = 0.025$, 因此其引起的折射率测量误差为 $\Delta n = (|\partial n/\partial N|)\sigma_N \approx 5 \times 10^{-5}$ 。由此可知, 总的折射率误差为 $\sigma_n = [(3.2 \times 10^{-5})^2 + (2.5 \times 10^{-4})^2 + (5 \times 10^{-5})^2]^{1/2} \approx 2.6 \times 10^{-4}$, 精度可以稳定达到小数点后 4 位。

同样地, 可以得到葡萄糖溶液的折射率误差, $\Delta n = (|\partial n/\partial \theta|)\sigma_\theta \approx 3.5 \times 10^{-5}$, $\Delta n = (|\partial n/\partial d|)\sigma_d \approx 2.7 \times 10^{-4}$, $\Delta n = (|\partial n/\partial N|)\sigma_N \approx 4.8 \times 10^{-5}$, $\sigma_n = [(3.5 \times 10^{-5})^2 + (2.7 \times 10^{-4})^2 + (4.8 \times 10^{-5})^2]^{1/2} \approx 2.8 \times 10^{-4}$ 。

另外, 还研究测量了浓度为 2% (质量分数) 的葡萄糖溶液在不同温度时的折射率情况, 波长为 636.94 nm, 测量方法如下: 保证待测样品处于初始情况, 即旋转角度 $\theta = 0$ 固定不变, 测量温度为 T 时液体的折射率, 假设为 n_1 , 当温度变化 ΔT 时折射率变化为 Δn , 此时的折射率 $n' = n_1 + \Delta n$ 。忽略样品的热效应, 此过程中折射率的变化是由温度变化引起, 用单片机计数器记录移动的条纹数 N 。有

$$(n' - n)d = \Delta nd = N\lambda, \quad (11)$$

$$\Delta n = N\lambda/d. \quad (12)$$

通过计算的折射率变化 Δn 可以计算出不同温度下的溶液折射率。测量了 2% (质量分数) 葡萄糖溶液在 20 °C 时的折射率, 将液体加热到 60 °C, 让其自然冷却到 20 °C, 每间隔 5 °C 记录下移动的条纹数 N , 根据(12)式计算出折射率变化, 从而得到不同温度时葡萄糖溶液的折射率。如图 5 所示, 红点为测量值, 并且对其进行了拟合曲线, 可以看出, 随着温度升高, 2% (质量分数) 葡萄糖溶液折射率呈下降趋势。

4 结 论

使用分光棱镜干涉法测量了 636.94 nm 波长

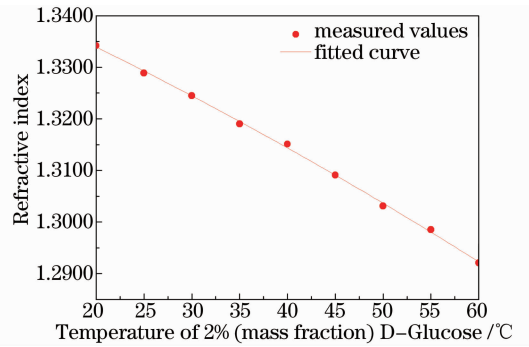


图 5 不同温度下 2% (质量分数) 葡萄糖溶液折射率变化
Fig. 5 Refractive index of 2% (mass fraction) D-Glucose solution under different temperatures

下不同浓度时葡萄糖溶液的折射率以及 2% (质量分数) 葡萄糖液体在不同温度时折射率的变化, 同时给出了干涉光路及实验测量的基本原理。测量选用的干涉方法简单、精度高、可实时显示移动的条纹数, 并且可以应用于其他透明液体的测量, 实验得到的数据也可以为生物医学等提供帮助。

参 考 文 献

- Li Xiaoqin. Research on regulation of the least inclines by emulated experiment[J]. Physical Experiment of College, 2008, 21(3): 25-28.
李晓勤. 模拟实验研究最小偏向角的规律[J]. 大学物理实验, 2008, 21(3): 25-28.
- Garcia-Valenzuela A, Peña-Gomar M, Garcia-Segundo C, et al.. Dynamic reflectometry near the critical angle for high-resolution sensing of the index of refraction[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1998, 52(3): 236-242.
- Hu Chao, Zhu Zhexin, Zhu Jiangfeng, et al.. Using light beat method study on the relationship between density and refractive index of the glucose solution[J]. Physical Experiment of College, 2012, 25(6): 3-5.
胡超, 竺哲欣, 竺江峰, 等. 用光拍法研究葡萄糖溶液密度和折射率的关系[J]. 大学物理实验, 2012, 25(6): 3-5.
- Ni Yucai, Wang Bangyi. Precision measurement of refractive index of air by an improved rayleigh interferometer[J]. Acta Physica Sinica, 1977, 26(1): 90-92.
倪育才, 王邦益. 用改进的瑞利干涉仪精确测量空气折射率[J]. 物理学报, 1977, 26(1): 90-92.
- Chen Qianghua, Luo Huifu, Wang Sumei, et al.. Gas refractive index measurement system based on a surface plasmon resonance sensor with self-adaptive structure for angle shift and phase detection[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1212003.
陈清华, 罗会甫, 王素梅, 等. 基于相位测量的角漂移自适应结构表面等离子体共振气体折射率测量系统[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1212003.
- Nemoto S. Measurement of the refractive index of liquid using laser beam displacement[J]. Appl Opt, 1992, 31(31): 6690-6694.
- Sabatyan A, M Taghi Tavassoly. Determination of refractive indices of liquids by Fresnel diffraction [J]. Opt & Laser Technol, 2009, 41(7): 892-896.
- Lu Ping, Men Liqiu, Sooley Kevin, et al.. Tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. Appl Phys Lett, 2009, 94

- (13): 131110.
- 9 Wei Tao, Han Yukun, Li Yanjun, *et al.*. Temperature-insensitive miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer for highly sensitive refractive index measurement[J]. *Opt Express*, 2008, 16(8): 5764–5769.
- 10 Li Maohe, Zhang Meidun. Refractive index measurement with fiber Michelson interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(9): 1294–1296.
李毛和, 张美敦. 用光纤迈克耳孙干涉仪测量折射率[J]. *光学学报*, 2000, 20(9): 1294–1296.
- 11 Li Qiang, Han Guanghui, Xing Mannan, *et al.*. Measuring refractive index of micro-quantity liquid by focus method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(9): 2468–2472.
李强, 韩广辉, 邢曼男, 等. 用毛细管焦点法精确测量微量液体的折射率[J]. *光学学报*, 2009, 29(9): 2468–2472.
- 12 Li Qiang, Su Guanghui, Zhang Ruikai, *et al.*. Nondestructive measurement of refractive index of transparency capillary [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(6): 1264–1270.
李强, 苏光辉, 张瑞凯, 等. 透明毛细管管壁折射率的无损测量[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6): 1264–1270.
- 13 Li Yu, Li Qiang, Sun Licun, *et al.*. Measuring method for refractive index of micro-quantity liquid [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(2): 021202.
李宇, 李强, 孙丽存, 等. 测量微量液体折射率的新方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(2): 021202.
- 14 Li Qiang, Sun Licun, Meng Weidong, *et al.*. Refractive index of liquid measured by liquid-core zoom cylindrical lens[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1008005.
李强, 孙丽存, 孟伟东, 等. 用液芯变焦柱透镜精确测量液体折射率[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1008005.
- 15 Chen Chaoliang, Gao Wanrong. Spectral fiber low coherence interferometry-based method of measuring dispersion and refractive index of transparent object [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1008005.
陈朝良, 高万荣. 基于光谱光纤低相干的透射样品色散和折射率测量方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1008005.
- 16 Fathi M, S Donati. Simultaneous measurement of thickness and refractive index by a single-channel self-mixing interferometer [J]. *IET Optoelectronics*, 2012, 6(1): 7–12.
- 17 Ferrari J A, E M Frins. Single-element interferometer[J]. *Opt Commun*, 2007, 279(2): 235–239.
- 18 Haynes W M. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2012.

栏目编辑:何卓铭