

文章编号: 1001-3806(2016)04-0487-04

基于迈克尔逊干涉液晶双折射率的测量方法设计

李儒颂, 马红梅, 叶文江*

(河北工业大学 理学院, 天津 300401)

摘要: 为了通过实验得到向列相液晶材料的双折射率, 利用迈克尔逊干涉原理设计了一种新的测量方法。在迈克尔逊干涉仪中放入楔形液晶盒, 通过调节入射光的偏振方向分别实现了对寻常光和非寻常光折射率的精确测定。结果表明, 该测量方法将折射率测量转换为长度的测量和干涉条纹的计数, 简单易行、测量精度较高, 对理论研究和实际开发液晶显示器件是非常重要的, 在液晶材料和液晶器件生产中具有一定的推广价值。

关键词: 测量与计量; 双折射率; 迈克尔逊干涉原理; 向列相液晶; 楔形液晶盒

中图分类号: O753+.2; TN247

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.04.007

Measurement method of liquid crystal birefringence based on Michelson interference

LI Rusong, MA Hongmei, YE Wenjiang

(School of Sciences, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In order to obtain the birefringence of nematic liquid crystal, a novel measurement method was put forward based on Michelson interference principle. A wedge-shaped cell was put into the Michelson interferometer. The refractive indexes of ordinary and extraordinary lights were accurately measured by adjusting the polarized direction of incident light. The results show that this method is simple and with high precision by converting the measurement of refractive index to the measurement of length and the counts of interference fringes. This method is very important for theoretical research and practical development of liquid crystal display devices and has some promotional value in the production of liquid crystal materials and liquid crystal devices.

Key words: measurement and metrology; birefringence; Michelson interference principle; nematic liquid crystal; wedge-shaped liquid crystal cell

引言

液晶作为一种非常重要的光学材料, 广泛应用于液晶显示器件。液晶本身具有光学各向异性, 且均匀排列的液晶类似于单轴晶体, 所以光在液晶中传播时会发生双折射, 其折射率通常用非寻常光(e光)折射率 n_e 和寻常光(o光)折射率 n_o 来描述。双折射特性是液晶材料的重要性质, 影响液晶显示器的性能^[1], 尤其是高双折射率液晶材料^[2-3], 因此, 精确测量液晶的双折射率对液晶材料应用及液晶器件设计是非常有必要的。

液晶双折射的测量方法有阿贝折射仪^[4]、尖劈法^[5-6]、偏光干涉法^[7]等。现在普遍采用的是阿贝折射法测量, 该测量方法的优点是既可以测定透明、半透明液体, 也可以测定固体物质的折射率, 并且具有试样用量少、操作简单方便的特点。但因阿贝折射仪的基本原理为折射定律, 是根据折射极限法设计而成的, 它的测量精度为 ± 0.002 , 相对来说, 其测量精度还是不算高。CHEN等人提出了利用等厚干涉原理测量向列相液晶的折射率^[5-6]。HU等人提出了用棱镜测量^[8], 方法简单易行, 但误差稍大。

迈克尔逊干涉仪作为近代精密测量光学仪器之一, 被广泛用于科学研究和检测技术等领域。通过记录干涉圆环在中心涌出或陷入的数目, 干涉仪能以极高的精度测量微小长度变化, 进而得到与其变化相关的物理量, 例如: 测量金属丝的杨氏模量^[9]、用于设计测力传感器^[10]、测量温度^[11]、测定透明介质的折射率^[12-13]、反远距成像相移剪切散斑干涉检测^[14]等等。本文中基于迈克尔逊干涉原理, 提出了一种新的测量液晶双折射率的方法, 将楔形液晶盒插入到迈克尔逊

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11274088; 11304074); 河北省自然科学基金资助项目(A2014202123; A2016202282); 河北省教育厅资助项目(QN2014130); 河北工业大学教育教学改革研究资助项目(201303002; 201502023)

作者简介: 李儒颂(1990-), 男, 大学本科生, 主要从事液晶材料特性及液晶器件显示特性的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wenjiang_ye@hebut.edu.cn

收稿日期: 2015-06-12; 收到修改稿日期: 2015-07-15

干涉装置一支光路中,通过平移楔形液晶盒改变两支光路的光程差,并通过偏振片选择光的偏振方向以测量 o 光和 e 光的折射率。

1 测量原理与方法

1.1 迈克尔逊干涉原理

迈克尔逊干涉原理图 1 所示。He-Ne 激光器 S 发出的一束光射向平行平面透明薄板 G_1 ,其中, G_1 的后表面涂有半透膜(反射光与透射光各为 50%),它把从 S 射来的光束,分成振幅近似相等的反射光 1 和透射光 2,故 G_1 称为分束板。 G_2 与 G_1 平行放置,它的作用是使 1、2 两光束在玻璃中经过的光程完全相同,故 G_2 称为补偿板。反射光 1 射向平面镜 M_1 ,透射光 2 透过补偿板 G_2 射向平面镜 M_2 , M_1 和 M_2 是两块反射率很高的平面反射镜,二者与 G_1 成 45° 角。所以 1、2 两束光被 M_1 和 M_2 反射后又回到 G_1 的半反射膜上,再会集成一束光射向接收屏 E。由于这两束光来自光源上同一点,因而是相干光,而到达光屏 E 的这两束光是相干的,从 E 处向 M_1 方向望去,即可观察到干涉图样。与此同时,由几何光学可知, M_2 经过 G_1 所成的像位于 M_2' 处,因此,干涉仪产生的干涉相当于由 M_1 和 M_2' 构成的空气薄膜 d 产生的。如果 M_1 和 M_2' 保持严格平行,在接收屏 E 处可观察到一组等倾的圆环条纹。 M_1 可以前后移动,空气膜厚度也会随之改变。当 M_1 移向 M_2' 时,空气膜厚度逐渐减小,条纹向中心收缩,并在中心一一消失, M_1 平移 $\lambda/2$ 的距离,在中心消失一个条纹;当 M_1 与 E 完全重合的时候,视场一片均匀照亮。如果使 M_1 逐渐离开 M_2' ,则条纹会不断从中心冒出,如果视场中心消失(或冒出)的条纹数目为 N ,则它与 M_1 的移动距离 d 和入射光的波长 λ 有如下关系:

$$d = N \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

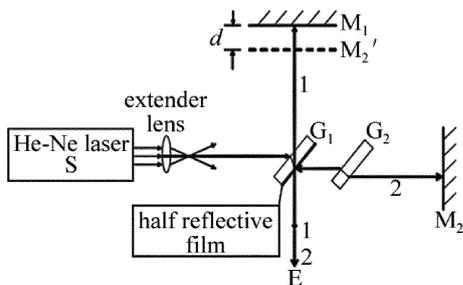


Fig. 1 Principle diagram of light path in the Michelson interferometer

1.2 测量原理

用楔形液晶盒测试向列相液晶双折射率时,在没有给楔形液晶盒上下基板涂取向剂时,在楔形液晶盒内因指向矢宏观无序排列,呈现出乳白色;当在楔形液

晶盒上下两平板玻璃涂布聚酰亚胺 (polyimide, PI) 取向层并相对放置时,液晶分子沿取向剂规则排列,即单轴晶体的光轴平行液晶盒表面,液晶变得清亮起来。调节偏振片,使激光的振动方向垂直于指向矢,即以 o 光模式进入楔形液晶盒,从而测量出 o 光的折射率 n_o 。再调节偏振片,使入射光与液晶的长轴方向平行,此时入射光相对于液晶分子是 e 光,测量出的折射率就是 n_e 。楔形液晶盒的具体设计如图 2 所示^[15-16],将楔形液晶盒分成两半,同时充入两种样品,一半充入待测液晶样品,另一半充入标准参考液晶样品,这样做的优点是不仅避免了直接去测量楔形液晶盒的夹角 θ ,而且也可以避免去更换样品,巧妙地利用了对比的方法,大大减少了测量参量,免除了复杂的计算,使结果更加准确。此外为了减小误差,可使 θ 非常小,在两玻璃基板之间一端夹一根细小的金属丝制成楔角为 θ 的楔形液晶盒,并使取向层取向平行于两玻璃的交线,如图 3 所示。

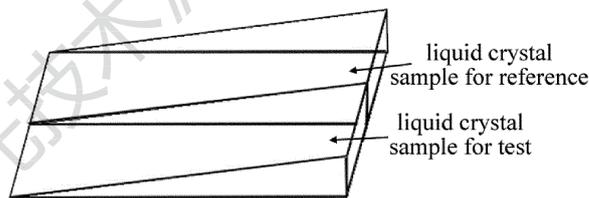


Fig. 2 3-D schematic diagram of wedge-shaped cells

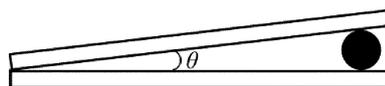


Fig. 3 Positive schematic diagram of wedge-shaped cells

测量原理如图 4 所示,自行组装迈克尔逊干涉装置,在组装后的迈克尔逊干涉仪的物光光路上,放入前面设计好的楔形液晶盒,当氦氖激光垂直于楔形液晶盒 AB 边入射,调节偏振片,使入射光偏振方向垂直于液晶分子长轴,此时入射光相对于液晶分子是 o 光,经过试样后在 AC 边发生折射。折射光被平面镜 M_1 垂直反射回原光路,该物光最后与平面镜 M_2 反射回的参考光发生干涉,利用线阵电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)测量干涉所形成的干涉圆环,获得干

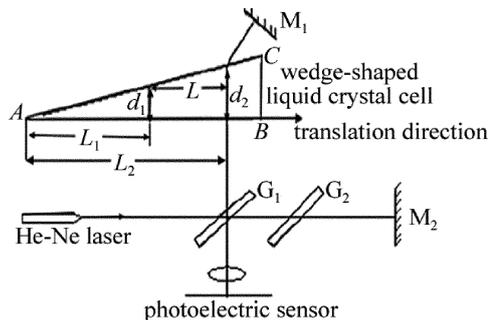


Fig. 4 Schematic diagram of measurement equipment

涉圆环的光强的变化,进而自动计数出干涉圆环的数目的变化。

测量装置如图 4 所示。该装置由楔形液晶盒和自行组装迈克尔逊干涉仪构成。其中, G_1 为分束镜,它的一个表面镀有半反射金属膜,使光在金属膜处的反射光束与透射光束的光强基本相等, G_2 为补偿板。从 He-Ne 激光器 S 发出的一束光,在分光镜 G_1 的半反射面上被分成光束 1 和透射光束 2。光束 1 从 G_1 反射出后投向 M_1 镜,反射回来再穿过 G_1 ; 光束 2 (透射光) 经补偿板 G_2 射向固定镜 M_2 , 经 M_2 镜反射回来再通过 G_2 膜面上反射。两束光经 M_1, M_2 反射后又经 G_1 的反射和折射在屏上相遇,发生干涉形成圆形干涉条纹。当光束垂直入射至 M_1 镜和 M_2 镜时,楔形液晶盒沿 AB 边从距离 A 点 L_1 的位置平移至距离 A 点 L_2 的位置,因为其光程差为:

$$\Delta = 2(d_2 - d_1) \cdot (n_o - n_a) \quad (2)$$

对于第 k 级亮条纹,由入射光反射得:

$$\Delta = k\lambda \quad (3)$$

式中, n_a 为室温下空气的折射率; n_o 为 o 光的折射率; λ 为入射光的波长。

联立(2)式和(3)式可得到:

$$\Delta = 2(d_2 - d_1) \cdot (n_o - n_a) = k\lambda \quad (4)$$

这两束光在中心亮纹的光程差为:

$$\delta = k\lambda \quad (5)$$

中心暗纹的光程差为:

$$\delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

对(5)式和(6)式分别求微分,都得到:

$$d\delta = \lambda dk \quad (7)$$

式中,光程差变化量 $d\delta$ 就是光在楔形液晶盒内液晶移动时引起的光程差变化 Δ ; dk 就是相应条纹的变化数,以 Δk 来表示。故当楔形液晶盒沿 AB 边从距离 A 点 L_1 的位置平移至距离 A 点 L_2 的位置,则液晶折射率 n_o 与干涉条纹的变化数 Δk 存在如下关系:

$$n_o - n_a = \frac{\Delta k \cdot \lambda}{2d} \quad (8)$$

式中, $d = d_1 - d_2$ 为光线在楔形液晶盒中的几何路程差;在楔角 θ 确定时, d 可用于楔形液晶盒位移距离 $L = L_1 - L_2$ 表示:

$$d = L \tan \theta \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式可得到:

$$n_o - n_a = \frac{\Delta k \cdot \lambda}{2L \tan \theta} \quad (10)$$

为了消除楔角 θ 精确测量的误差,可用折射率已知的标准参考液晶来校正,于是就有:

$$n_r - n_a = \frac{\Delta k' \cdot \lambda}{2L' \tan \theta} \quad (11)$$

式中, n_r 是标准参考液晶的折射率, $\Delta k'$ 是标准液晶位移 L' 时干涉条纹的移动数目。联立(10)式和(11)式整理得到:

$$n_o = n_a + (n_r - n_a) \cdot \frac{L'}{\Delta k'} \cdot \frac{\Delta k}{L} \quad (12)$$

因此,只需要测量出 $L', \Delta k', L, \Delta k$ 就可以求出待测液晶的折射率。

从(12)式可知,待测液晶的折射率是平移距离和干涉条纹改变数目的函数,当把楔形液晶盒向 AB 方向平移,在保持两次平移距离相同的情况下,即 $L' = L$,于是就可以得到:

$$n_o = n_a + (n_r - n_a) \cdot \frac{\Delta k}{\Delta k'} \quad (13)$$

同样,当保持干涉条纹改变数相同时,即 $\Delta k = \Delta k'$,将得到不同的平移距离,于是也就可以得到:

$$n_o = n_a + (n_r - n_a) \cdot \frac{L'}{L} \quad (14)$$

在实验测量时,空气的折射率 $n_a \approx 1$,于是由(13)式和(14)式就可以得到:

$$n_o = 1 + (n_r - 1) \cdot \frac{\Delta k}{\Delta k'} \quad (15)$$

$$n_o = 1 + (n_r - 1) \cdot \frac{L'}{L} \quad (16)$$

(15)式和(16)式是两种不同的测量方法,但其测量原理是一致的。

测完 o 光的折射率 n_o 后,再调节入射光偏振方向使其平行于液晶分子长轴。此时,入射光相对于液晶分子为 e 光,故测量的液晶折射率为 n_e 。

此外值得注意的是,在实际测量中,不仅要求楔形液晶盒平移测距装置能在迈克尔逊干涉光路中平稳地移动,而且还能精确地读出其平移距离。为此,可以将千分尺安装在自制的平移台上,以便能得到较高精度的平移距离,减少测量误差。

2 信号处理系统及理论误差分析

分析表明,利用该方法测量向列相液晶双折射率最为关键的技术就是精确计算出平移楔形液晶盒前后引起干涉圆环的变化个数。为了能对干涉圆环的准确计数,本文中所采用的方法与参考文献[17]中的相类似,与之不同的是,本文中通过使用 51 单片机来实时采集、处理并显示结果的,这种方法在参考文献[18]和参考文献[19]中均有介绍,这样做的优点是可以使信号处理系统变得更加简单、实用性更强。基本设计思路是:首先用线阵 CCD 图像传感器代替光屏,

当平移楔形液晶盒时,会在线阵 CCD 图像传感器上产生明暗相间的条纹,线阵 CCD 图像传感器便会将对光干涉信号进行捕捉与采集,于是便可以将光信号转换为电信号(当为明条纹时,会有电流信号产生;当为暗条纹时,则没有电流信号);然后通过模数转换,再利用编制的迈克尔逊干涉圆环软件对干涉圆环进行精确计数;最后,由 51 单片机上的液晶屏显示其结果。

由于 o 光折射率与液晶指向矢排列状态无关,因此作者设计的实验对于 o 光的测量是很准确的。而 e 光折射率受楔形液晶盒的楔角 θ 的影响:

$$n_e(\theta) = \sqrt{\frac{n_o^2 \cdot n_e^2}{n_o^2 \cdot \sin^2\theta + n_e^2 \cdot \cos^2\theta}} \quad (17)$$

计算发现,如果把 θ 控制在 5° 以内,对于 e 光折射率的影响很小,可以忽略。

在光程差的计算过程中,小角度的 θ 也不会造成可观的误差,实际上,可以将楔形液晶盒的楔角 θ 做得很小,远远小于 5° 。此外,干涉圆环计数采用单片机实现,观测结果非常精确。因此作者的实验观测结果误差应该很小。

3 结 论

基于迈克尔逊干涉原理,自行组装迈克尔逊干涉装置,并将这一光学干涉装置应用于向列相液晶双折射率的测量,提出了一种测量向列相液晶双折射率的新方法。理论分析表明,该测量方法不仅测量原理简单,而且具有智能化程度高和精度高的特点,不仅拓宽了现行对液晶双折射率的测量方法,还对液晶材料生产厂和液晶显示器件生产厂的工程技术人员具有一定的实用价值。

参 考 文 献

[1] YANG D K, WU S T. Fundamentals of liquid crystal devices [M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2006: 157-165.
 [2] ZHANG Z Y, LIU K Q, DAI Z Q, *et al.* Research progress of high birefringence liquid crystal compounds [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2014, 29(6): 873-880 (in Chinese).
 [3] GAO Y Y, ZHANG G P, BIE G J, *et al.* Research progress of high birefringence liquid crystal containing acetylenic bond [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2015, 30(1): 22-31 (in Chinese).
 [4] LOU X X, CHEN J B, CAO J Q, *et al.* An investigation on voltage

dependence of the refractive index of liquid crystal [J]. Laser Journal, 1999, 20(3): 16-17 (in Chinese).
 [5] CHEN G, SUN S X, LIU H, *et al.* Simple approach for measurement of birefringence of TN liquid crystal [J]. Advanced Display, 2011(129):32-34 (in Chinese).
 [6] CHEN G, WANG D L, WEI S Q, *et al.* Simple approach for measurement of birefringence of nematic liquid crystal [J]. Advanced Display, 2013(144/145):23-26 (in Chinese).
 [7] PENG D Y, SONG L K, LI K T, *et al.* Measurement of birefringence of liquid crystal with polarized light interference method [J]. Laser Technology, 2014, 38(3): 422-424 (in Chinese).
 [8] HU W P, FAN Z X. Birefringence experiment of liquid crystal prism [J]. Physics Experimentation, 2010, 30(4): 41-42 (in Chinese).
 [9] LI R S, YE W J. Design of the measuring equipment to explore wire young's modulus [J]. Physical Experiment of College, 2014, 27(5): 51-53 (in Chinese).
 [10] LI R S, XU Q, YE W J. Design of force transducer based on michelson interference [J]. Electro-Optic Technology Application, 2015, 30(2): 83-86 (in Chinese).
 [11] YANG K, RONG Q Z, SUN H, *et al.* High temperature probe sensor with high sensitivity based on Michelson interferometer [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(8): 084218 (in Chinese).
 [12] SUN Y H. Measurement of transparent medium index with Michelson interferometer [J]. Journal of Xi'an University of Post and Telecomm Unications, 2009, 14(1): 158-161 (in Chinese).
 [13] ZHEN Q M. Measurements of refractive index of polymer materials using photoelectricity reflectometry based on michelson interference method [J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science Edition), 2012, 35(5): 448-451 (in Chinese).
 [14] ZHU M, LI X Y, LI X M, *et al.* Phase shifting and shearing speckle interferometry system with retro-focus imaging [J]. Laser Technology, 2014, 38(1): 49-53 (in Chinese).
 [15] LI Y B. Application study of interferometry on measurement of refractive index of transparent liquid materials [J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry, 2008, 16(6): 76-79 (in Chinese).
 [16] DAI Q, LI Y, WU R N, *et al.* Investigation of the laser action in a dye-doped cholesteric liquid crystal wedge cell [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(4): 044219 (in Chinese).
 [17] XIAO H, QI J J. Measuring piezoelectric coefficient of piezoelectric material with Michelson interferometer by using linear CCD [J]. Experimental Technology and Management, 2011, 28(2): 25-27 (in Chinese).
 [18] ZHAO Z W, CHEN P, SUN Z T, *et al.* Design of michelson interference ring auto-count device [J]. Electro-Optic Technology Application, 2009, 24(6): 36-38 (in Chinese).
 [19] YANG Y S, DU K, WU J G, *et al.* Design of Michelson interferometer fringe's sampling and wavelength auto-measure device [J]. Microcomputer & Its Applications, 2013, 32(17): 14-18 (in Chinese).