

扭转丝状液晶电光效应及电场响应的研究

李 涛,游胤涛,陆申龙,马世红

(复旦大学 物理学系,上海 200433)

摘要:在研究扭转丝状液晶电光曲线的基础上,通过测量 TN 型液晶的电场响应时间和驱动电场频率响应,提出了一种新的求解 TN 型液晶临界电压的方法,该方法可应用于精确测量液晶材料的某些基本特性参数.

关键词:TN 型液晶光阀;电光曲线;响应时间;临界电压

中图分类号:O 436.4

文献标识码:A

文章编号:1000-0712(2007)12-0048-05

扭转丝状型液晶(Twisted Nematic Liquid Crystal)是目前最常见的一种液晶,它在显示技术中有着广泛的应用.扭转丝状液晶盒简称 TN 型液晶盒.关于 TN 型液晶盒的电光特性,很多理论模型都有论述.其中 Berreman 的矩阵法^[1]、 2×2 Jones 矩阵法^[2]和 4×4 拓展 Jones 矩阵法^[3]以及其改进方案都在研究和计算液晶电光学特性时被广泛采用.通过这些方法,可以直接从理论上得到 TN 型液晶临界电压值的大小.而根据 E. Jakeman 等人关于液晶响应时间方面的研究,通过对不同偏压下的液晶响应时间的测量,也可精确测得液晶临界电压的数值大小.

笔者采用北京清华液晶技术工程研究中心生产的 THLS033 型号的 TN 快速光阀液晶盒,对不同偏压下的响应时间进行测定,通过相关计算分析后获得液晶盒的临界电压值,并与电光效应曲线所得临界电压进行对比,获得了一致的结果,从而得到了一种新的获得 TN 型液晶临界电压的方法.本文介绍的液晶电光效应及电场响应的实验,可用于液晶某些基本特性的测量,也可以作为高校一个新的研究性物理实验.

1 实验原理

1.1 TN 液晶盒光阀

一般液晶盒的基本结构如图 1 所示,它包括两层由玻璃基板、氧化铟锡(ITO)膜、聚酰压胺(PI)导向膜等制成的夹板,左右夹层中是液晶分子,接近左边夹层的液晶分子按照左边沟槽的方向来排列,而右边夹层的液晶分子按照右边沟槽的方向排列,整体看起来,液晶分子的排列呈扭转螺旋形.

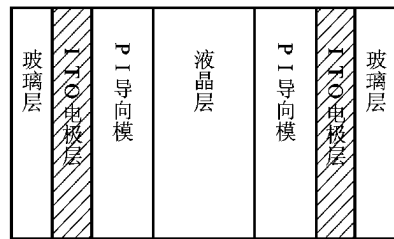


图 1 液晶盒的基本结构

本实验所采用的 TN 液晶为 90° 扭转丝状液晶,在其弛豫态时,其后方的 PI 导向膜的主导方向相对前方 PI 导向膜的主导方向扭转了 90°,故液晶分子在液晶层中亦逐渐扭转了 90°,令前方 PI 导向膜的主导方向平行于起偏镜的透光轴,则入射的非偏振光经起偏镜后将变成线偏振光,当此线偏振光穿过 90° TN-LC 时,其偏振方向会随着液晶分子长轴方向的扭转而扭转,使得透过 TN-LC 的光维持为线偏振光,但其偏振方向已扭转了 90°;若检偏镜(第二个偏振片)的偏振方向设定为平行于起偏镜的偏振方向,光就不能透过检偏镜.这种设定称为“正常黑”模式(Normally Black),简称 NB(见图 2);若检偏镜的偏振方向设定为垂直于起偏镜的偏振方向,光将完全透过检偏镜,相应的此种设定称为“正常白”模

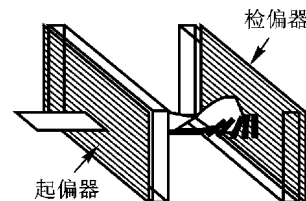


图 2 液晶盒分子弛豫态排布

收稿日期:2006-07-07;修回日期:2007-01-20

作者简介:李涛(1984—),男,上海人,复旦大学物理系 02 级本科生,目前正在美国 Old Dominion University (VA) 攻读硕士学位.

式(Normally White),简称 NW.

当通过电极给液晶分子施加一定大小的交流电压后,液晶将会发生 Fredericks 转变^[4-8],液晶分子排列发生迁移,从而处于激发态并使其光学性质产生变化.这是因为外加电场时,液晶分子轴方向的介电常数与垂直方向的介电常数不同所致.

称为液晶的介电常数各向异性.对于正介电常数各向异性的液晶,当外加电压大于临界电压 V_{th} 时,液晶分子长轴将开始倾向电场方向,而当外加电压为 2 倍 V_{th} 左右时,除了在电极面附近的分子以外,几乎所有分子的长轴都将平行于电场做再排列,而消失 90 的旋光性.这一激活状态与无外加电场时完全相反,平行于偏光片的光会透过,而垂直于偏光片的光将会被遮断(见图 3).

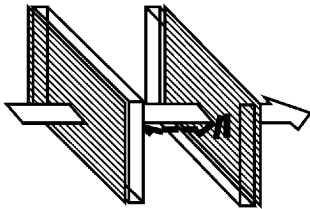


图 3 液晶盒分子激活态排布

令 V_{10} 和 V_{90} 分别代表透射光强度达到最大透射光强的 10% 及 90% 时的外加电压值,则可定义“电-光开关率”,其值为 $\gamma = (V_{90} - V_{10}) / V_{10}$ (NB 模式下),或者 $\gamma = V_{10} / V_{90}$ (NW 模式下).本文实验所采用的 TN-LC 液晶盒均为 NB 模式.

而根据连续体理论^[5,6],TN-LC 的临界电压值为

$$V_{th} = \sqrt{\frac{K_{11} + (K_{33} - 2K_{22})/4}{\epsilon_0 \epsilon_a}} \quad (1)$$

其中 K_{11}, K_{22}, K_{33} 分别为液晶的展曲系数、扭曲系数和弯曲系数.

1.2 TN 液晶电光特性的 Jones 矩阵分析法

根据 Jones 矩阵分析法,在分析 TN 液晶电光特性时,常把液晶层分割成很多小薄片,每一个薄片相当于一个线偏振器,对应一个传输矩阵.所以在弛豫态时,通过整个液晶层的传输矩阵可以表示成^[9]:

$$\begin{pmatrix} \cos X - i \frac{\sin X}{2X} & \frac{\sin X}{X} \\ -\frac{\sin X}{X} & \cos X + i \frac{\sin X}{2X} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中 $X = \sqrt{\frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{d}{2} \right)^2} = \frac{\pi}{\lambda} (n_e - n_o) d$; 为液

晶盒的扭曲角度,在 TN 液晶盒中为 $\pi/2$; d 为液晶层的厚度, n_e 和 n_o 分别为液晶的正常折射率和异常折射率.

由此可得弛豫态时,液晶盒的透射率为^[9]

$$T = \frac{1}{2} \left| 1 - \frac{\sin X}{X} \right|^2 = \frac{1}{2} \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{1+u^2} \right)}{1+u^2} \quad (3)$$

其中 $u = \frac{V}{V_{th}} = \frac{2\pi nd}{\lambda V_{th}}$.

而当液晶盒在激发态时,因为受电场影响,液晶分子将会发生转动,其光学特性也将发生转变.在具体分析其电光效应时,可以通过分析激活态下系统自由能密度(弹性自由能密度和静电场自由能密度之和)的方程来解决^[6,7].

$$G = \frac{1}{2} \int_0^d \left[(K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta) \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 + (K_{22} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta) \cos^2 \theta \left(\frac{d\phi}{dz} \right)^2 \right] dz \quad (4)$$

其中 θ 为液晶分子倾角(相对于电场方向), ϕ 为液晶分子扭角.通过求解这一方程,可以得到外场下每一层液晶分子的倾角和扭角大小的分布,然后可由此计算液晶盒的总透射率大小.通过一系列较为复杂的计算过程^[7],得到的结果如图 4 和图 5 所示.

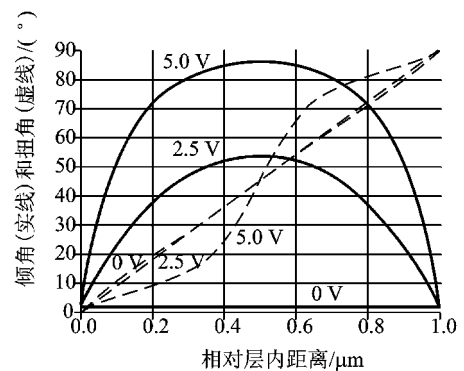


图 4 不同电压下液晶层分子的倾角与扭角分布

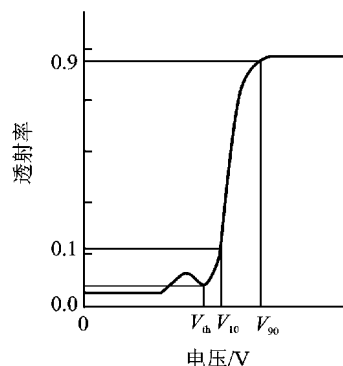


图 5 NB 型液晶盒电光曲线

1.3 TN型液晶响应时间与临界电压的另一种求算方法

当给液晶盒外加一超过临界电压的方波使液晶开始旋转时,因为受到不同的介电常量异向性、弹性系数、黏度等物性的影响,不同的液晶会有不同的转动周期,所以穿透光会随不同的转动速度而有不同的瞬间响应时间.图 6 是扭转型液晶器件的瞬态响应示意图.上面的曲线代表了施加在液晶盒上面的方波驱动电压,下面的曲线代表了液晶盒透射率的变化大小.

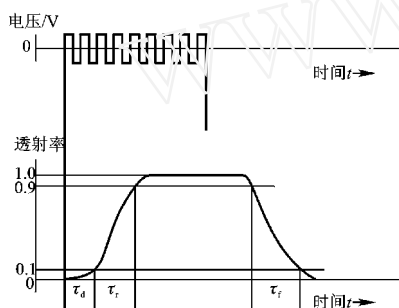


图 6 液晶器件瞬态响应示意图

表征液晶动态响应通常有 3 个常数:延迟时间 τ_d 、上升时间 τ_r 和下降时间 τ_f . 上升时间 τ_r 定义为透射率从 10% 增到 90% 所用的时间,下降时间 τ_f 为透射率从 90% 下降到 10% 所用的时间.由图 6 可知,透射率并不与外加电压同时变化,而是要经过几个脉冲序列,即延迟时间 τ_d 后,才开始变化.同时再经过上升时间 τ_r 才达到透射率最大值,这个过程称为液晶器件的电能蓄积效应^[5].

根据 E. Jackman 和 Raynes 关于液晶响应的连续体理论^[10],有:

$$\tau_r = \frac{\eta d^2}{V^2 - \left(K_{11} + \frac{K_{33} - 2K_{22}}{4} \right)^2} \quad (5a)$$

$$\tau_f = \frac{\eta d^2}{\left(K_{11} + \frac{K_{33} - 2K_{22}}{4} \right)^2} \quad (5b)$$

其中 η 为液晶的黏度.而根据式(1),又可以将式(5a)改写成

$$\tau_r = \frac{\eta d^2}{(V^2 - V_{th}^2)} \quad (6)$$

因此,可以通过测量不同的施加电压 V 和与其对应的上升时间 τ_r ,反推得到液晶盒的临界电压 V_{th} .

需要注意的是,对于同一种材料的液晶,其液晶的响应时间 τ_r 和 τ_d 还和外加电压脉冲的宽窄、液

型、脉冲幅度、频率有直接的关系^[5],因此在用式(6)方法测量临界电压 V_{th} 的时候,还要注意选择响应合适的驱动电压.

2 实验装置和方法

本实验的测量装置由导轨、滑块、半导体激光器(波长为 650 nm)、两块偏振片、液晶盒、光功率计(传感器为硅光电池)、存储示波器、信号发生器等组成(见图 7).

测量液晶盒电光曲线时,90° TN-LC 液晶的偏振片应设成互相平行,使液晶盒成为“正常黑”NB 模式,然后用信号发生器以 100 Hz 方波的驱动电压加于液晶盒的两个 ITO 电极上,将方波电压峰峰值由 0 逐步增加到 11 V.然后用示波器记录相应光探测器的输出大小,从而获得输出激光的大小,并由此得到 TN-LC 型液晶盒的电光特性曲线.

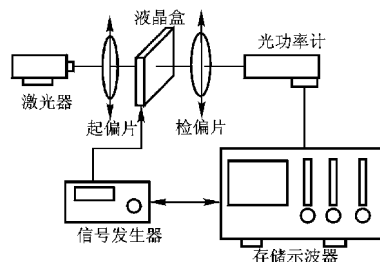


图 7 实验装置示意图

测量液晶响应时间时,将信号发生器输出端用同轴电缆线分别与液晶盒的 ITO 电极及示波器的通道 1 连接,另将光探测器输出接至示波器的通道 2.调整示波器外部触发电平至可触发区.测量响应时间时,由信号发生器输出脉冲电压驱动液晶盒,同时用示波器记录光探测器的讯号,此时可由示波器计算样品之响应时间.

3 实验结果与讨论

3.1 液晶频率响应曲线

为了确定合适的方波脉冲电压频率,笔者先测量了 TN-LC 型液晶在不同大小驱动电场下的截止响应频率,结果如图 8 所示.

由图 8 可见,对于 TN-LC 液晶盒,不管外加电压大小 V_{rms} 为多少,其响应的截止频率均在 50 kHz 以上,因此实验中采用 100 Hz ($\ll 50$ kHz) 左右的方波驱动电压将不会给电光曲线的测量结果带来较大误差.

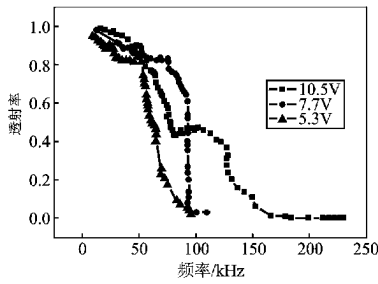


图 8 液晶的截止频率响应曲线

3.2 测量 TN-LC 液晶盒电光曲线

室温下,采用 100 Hz 方波实测得到的液晶盒的电光曲线如图 9 所示,其中光强用光功率计测得,单位为 mW,并由光强转换为光透射率.由此计算得“电-光开关率” $= \frac{V_{90} - V_{10}}{V_{10}} = \frac{4.44 - 3.47}{3.47} = 0.280$,而临界电压 V_{th} 大小为 3.47 V.

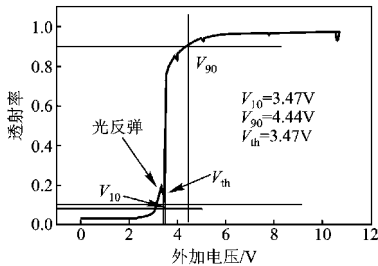


图 9 TN 液晶盒电光曲线

从图形来看,整个电光曲线与之前的理论曲线能很好地符合,其电光特性的变化范围为 3.47 ~ 4.44 V. 而经过光反弹之后曲线很快就下降到最低点,因此所获得的 V_{th} 大小与 V_{10} 大小比较接近. 也有一些技术类文献将 V_{th} 直接等同于 V_{10} ^[5].

3.3 测量液晶盒响应时间

同样在室温下,采用频率为 100 Hz 的方波电压,设置不同的驱动电压大小,记录相应电压下的液晶盒响应时间. 因为采用硅光电池探测器的光功率计作为光强记录仪,而硅光电池本身的下降时间就较长,其上升时间和延迟时间则相对较短,所以可以直接较为准确测量的只有上升时间和延迟时间.

实验中,为确保有更高的测量精确度,对于每组电压值均测量 10 次响应时间大小,然后再求平均,将平均值作为最后的记录值.

从所得的结果来看,对于任意大小的驱动电压,

TN 液晶的上升时间总是略大于延迟时间,且当施加电压越接近临界电压时,上升时间将急剧变长. 因此,在低驱动电压的情况下,测量电光曲线获得稳定值将要花费较长的时间,这也与之前测定电光特性的实验情况完全吻合.

3.4 新方法计算临界电压

根据式 (6),可求解出 TN 液晶盒的临界电压 V_{th} . 将式 (6) 改写成如下形式:

$$\frac{1}{r} = \left[\frac{V^2}{i d^2} - \frac{V_{th}^2}{i d^2} \right] = A V^2 - B \quad (7a)$$

其中

$$V_{th} = \sqrt{\frac{B}{A}}, \quad A = \frac{1}{i d^2}, \quad B = \frac{V_{th}^2}{i d^2} \quad (7b)$$

根据所测得的上升时间 r 与施加电压 V 的对应数据,作关于 $\frac{1}{r} - V^2$ 的直线图,实验结果如图 10 所示,由图中数据可计算出 V_{th} 的大小.

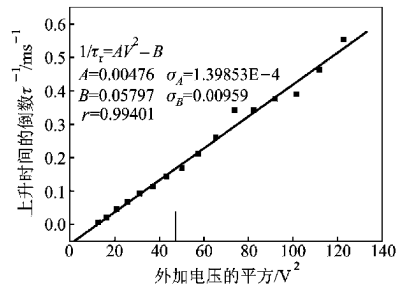


图 10 液晶响应时间曲线

根据式 (7b) 计算 V_{th} 的数值,得

$$V_{th} = \frac{\sqrt{0.05797}}{\sqrt{0.00476}} V = 3.49 V$$

与测量电光曲线直接获得的临界电压值 (3.47 V) 相比较,无疑这种新的求解 TN 型液晶临界电压的方法具有较高的精确度. 而且从图像来看,在 $V_{th} \sim 2 V_{th}$ 的范围内, $\frac{1}{r}$ 与 V^2 的线性最好. 而在大于 $2 V_{th}$ 电压范围时,因为相应的上升时间过短,反而存在较大的误差. 改用 $V_{th} \sim 2 V_{th}$ 范围内的数据结果,得到相应的 $V_{th} = 3.39 V$, 仍然在 0.1 V 的误差范围之内.

考虑到实验环境及仪器本身带来的误差,这种新的求解临界电压的方法仍具有相当的优越性.

在实测 TN-LC 液晶盒电光曲线的过程中,因为要缓慢控制驱动电压的变化以保证液晶分子处于准静态,所以整个测量过程费时较多,要想获得一条理

想的电光曲线往往要花 2 h 以上. 然而, 如果采用测上升时间来计算 V_{th} , 则整个实验过程所用时间将会大大缩短, 而且实验的可靠性与可重复性也将大大提高.

4 结束语

液晶光阀的电光特性及临界电压、电光开关率、弛豫时间等, 是研究液晶光阀特性所必须的基本参数, 随着液晶屏的广泛应用, 液晶光阀的电光特性及相关参数的测量应被尽快引入到高校的基础物理实验中, 而本文所介绍的实验新内容和方法可用于高校中设计性物理实验.

参考文献:

- [1] Berreman D W. Optics in stratified and anisotropic media: 4 \times 4- matrix formulation [J]. J Opt Soc Am, 1972, 62 (4): 502—510.
- [2] Jones R C. A new calculus for the treatment of optical systems I. Description and discussion of the calculus [J]. J Opt Soc Am, 1941, 31: 488.
- [3] Lien A. Extended Jones matrix representation for the twisted nematic liquid crystal display at oblique incidence [J]. Appl Phys Letter, 1990, 57 (26): 2767—2769.
- [4] 日本学术振兴会第 142 委员会. 液晶器件手册[M]. 黄锡珉, 黄辉光, 李之熔, 译. 北京: 航空工业出版社, 1992.
- [5] 施善定, 黄嘉华, 李秀娥. 液晶与显示应用[M], 上海: 华东化工学院出版社, 1993.
- [6] 谢毓章. 液晶物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [7] 刘永智, 杨开愚. 液晶显示技术[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2000.
- [8] 王新久. 液晶光学和液晶显示[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [9] Jesper Osterman. Investigations of Optical Properties and Photo-Alignment in Bistable Nematic Liquid Crystal Displays [D]. Doctoral thesis, Uppsala University, 2005. (<http://publications.uu.se/theses/abstract.xsql?dbid=6083>)
- [10] Jakeman E, Raynes E P. Electro-optic response times in liquid crystals [J]. Phys Lett, 1972, 39A: 69—70.

Study on TN-LCD's electro-optic characteristic & response times

LI Tao, YOU Yin-tao, LU Shen-long, MA Shi-hong

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Based on the experimental result of the electro-optic property of twisted nematic liquid crystal (TN-LC), a deeper study of the TN-LC electro-optic response times is carried out. And a new method to approach the critical driving voltage is introduced by understanding the response times under different driving voltages.

Key words: twisted nematic liquid crystal (TN-LC); electro-optic curve; response time; critical voltage

(上接 47 页)

A quantitative analysis for a classical problem of the static electricity

YU Jun-jie, WANG Fu-zhong, LI Na, SUN Jian-peng

(Department of Physics, Science College, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract: A classical problem of static electricity is analysed quantitatively the function of motion of the water drop is obtained by the use of MATLAB and an experiment is designed to validate the result.

Key words: static electricity; approximate numerical solution; tracks