

文章编号: 1001-3806(2006)03-0280-03

扭曲向列相液晶在复合消色差延迟器件中的应用

史 萌, 吴福全*, 赵 爽, 唐恒敬, 邓红艳
(曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165)

摘要: 借助琼斯矩阵对扭曲向列相 (TN) 液晶的光学性能进行了分析, 发现在外加电压调制下的 TN 液晶盒, 在选取的液晶厚度合适时, 可等效为对应液晶厚度的特定波长 $\lambda/2$ 波片, 通过合理的设计搭配, 与两个 $\lambda/4$ 波片进行组合, 使其整体作为一个偏振调制元件。经计算可知, 当所加电压大于 TN 液晶盒转向的阈值电压时, 其作用相当于一个消色差的 $\lambda/4$ 波片或 $\lambda/2$ 波片; 当撤掉外加电压时可作为一般的 90° 旋光器。

关键词: 光学器件; 扭曲向列相液晶; 琼斯矩阵; 消色差; 延迟器件

中图分类号: O436.3 文献标识码: A

The application of twisted nematic liquid crystal in composition achromatic wave-plate

SHI Meng, WU Fu-quan, ZHAO Shuang, TANG Heng-jing, DENG Hong-yan
(Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract Based on Jones matrix, the property of twisted nematic liquid crystal (TNLC) is studied. It is found that TNLC modulated by voltage is equivalent to $\lambda/2$ waveplate with proper thickness. Furthermore combination TNLC with two $\lambda/4$ waveplate can be equivalent to achromatic $\lambda/4$ or $\lambda/2$ waveplate wholly when the voltage is higher than liminal voltage, or it can be used as a common 90° rotationer when the voltage is removed.

Key words optical devices; twisted nematic liquid crystal; Jones matrix; achromatic; delay device

引 言

液晶显示因其具有工作电压低、能耗少、显示清晰、不含有害射线、体积小便于携带等优点^[1], 在短短几十年中有了突飞猛进的发展, 其中在上世纪 80 年代后期发展起来的扭曲向列相 (twisted nematic, TN) 液晶显示及超扭曲向列相液晶显示^[2]更是广泛应用于便携式直视型与大屏幕投影显示。

在 TN 液晶盒的结构中, 液晶分子沿玻璃表面平行排列, 但在排列方向上从液晶盒的上表面到下表面逐渐地均匀扭曲了 90° ^[1], 由于液晶分子扭曲的螺距与可见光波长相比是相当大的, 所以, 当线偏振光垂直射入液晶层后, 其偏振方向会被扭转 90° ; 当对液晶盒施加的电压达到 2 倍阈值电压时, 除电极基板表面处以外, 所有的液晶分子长轴一律都沿电场方向排列, 此时 90° 旋光消失。这是 TN 型电光效应液晶显示器件的工作原理, 是应用最广的一类液晶显示器件, 下面利用琼斯矩阵对液晶盒的性能进行分析。

作者简介: 史 萌 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事偏光测量及偏振器件设计方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: fqwu@qfnu.edu.cn

收稿日期: 2005-05-31; 收到修改稿日期: 2005-06-17

1 数学描述

扭曲型液晶盒的光学性质可用一个琼斯矩阵 M_{LC} 来描述^[2,3]:

$$M_{LC} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos X - i(\Gamma/2)(\sin X/X) & \varphi(\sin X/X) \\ -\varphi(\sin X/X) & \cos X + i(\Gamma/2)(\sin X/X) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, φ 是液晶分子的扭角, $\Gamma = 2\pi d \Delta n / \lambda$, d 是液晶盒的厚度, $X = [\varphi^2 + (\Gamma/2)^2]^{1/2}$ 。选取液晶盒后表面摩擦的方向为坐标系的 x 轴, (1) 式可记为:

$$M_{LC} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $M_{11} = \cos\varphi \cos X + \varphi \sin\varphi \sin X/X - i(\Gamma/2) \times \cos\varphi \sin X/X$, $M_{12} = -\sin\varphi \cos X + \varphi \cos\varphi \sin X/X - i(\Gamma/2) \sin\varphi \sin X/X$, $M_{21} = \sin\varphi \cos X - \varphi \cos\varphi \sin X/X - i(\Gamma/2) \sin\varphi \sin X/X$, $M_{22} = \cos\varphi \cos X + \varphi \sin\varphi \sin X/X + i(\Gamma/2) \cos\varphi \sin X/X$ 。

对于一个位相差为 δ 快轴方位与取定坐标系 x 轴之间的夹角为 θ 的波片, 其琼斯矩阵^[4]为:

$$M' = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} + i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\theta & i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\theta \\ i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\theta & \cos \frac{\delta}{2} - i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

对比 M_{LC} 与 M' 两个矩阵, 发现它们在形式上具有很大程度的相似性, 如果 TN 让液晶盒等效为波片, 只需让这两个矩阵相等, 即 $M_{LC} = M'$, 由此可得:

$$\begin{cases} \sin \varphi \cos X = \varphi \cos \varphi \sin X / \Gamma \\ \cos(\delta/2) = \cos \varphi \cos X + \varphi \sin \varphi \sin X / \Gamma \\ \sin(\delta/2) \cos 2\theta = -\frac{\Gamma}{2} \cos \varphi \sin X \\ \sin(\delta/2) \sin 2\theta = -\frac{\Gamma}{2} \sin \varphi \sin X \end{cases} \quad (4)$$

式中的 4 个方程含有 $\delta, \theta, \varphi, \Gamma$ 和 X 5 个未知数, 取 $\delta = \pi$, 求解 (4) 式可得: $\theta = \pi/2, \varphi = 0, \Gamma = \pi, X = \pi/2$, 这就是使 TN 液晶盒等效为一个 $\lambda/2$ 波片的条件。从求得的解中可见: (1) X 与 Γ 也满足关系式 $X = \sqrt{\varphi^2 + (\Gamma/2)^2}$ 的要求; (2) 对于扭曲向列相液晶, 其扭角 $\varphi = 0$ 表示此时 TN 液晶盒在大于阈值电压^[5] (阈值电压

$V_{th} = \pi \times \frac{k_{33}}{\sqrt{\epsilon_0 \Delta \epsilon}} \left[1 - 4 \left(\frac{k_{22}}{k_{33}} \right)^2 \left(\frac{d}{P_0} \right)^2 \right]^{-1/2}$, 一般为 2V ~ 3V, 其中 ϵ_0 为真空介电常数, k_{33} 为弯曲弹性系数, k_{22} 为扭曲弹性系数, P_0 为螺距, d 为液晶厚度) 的外电场的作用下, 液晶分子的长轴排列都沿外电场的方向; (3) 对于波长 λ_0 , 通过选取合适的厚度 d 使产生的位相差 $\Gamma = 2\pi d \Delta n / \lambda_0 = \pi$ 时, 等效为快轴方向与取定坐标轴 $O-x$ 之间的夹角为 $\theta = \pi/2$ 的 $\lambda/2$ 波片。

在满足 (4) 式的前提下, TN 液晶盒等效为 $\lambda/2$ 波片, 那么就可以将多个单元延迟片进行组合从而构成复合延迟波片^[6] (见图 1), 且当单元波片的快轴互成适当的角度时, 可以使复合器件的双折射色散在一定波段内呈现线性变化, 从而使器件的延迟量具有消色差性。

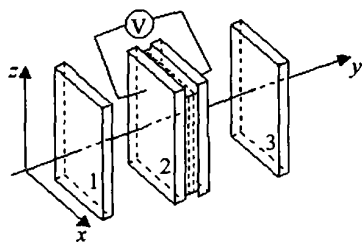


Fig 1 The structure of composition waveplate
1, 3— $\lambda/4$ waveplate 2—TNLC

例如两个 $\lambda/4$ 波片和一个 $\lambda/2$ 波片按图 1 所示的方式进行组合, 可以构成 1 个位相差从 0 到 2π 的索列尔补偿器。(1) 两个 $\lambda/4$ 波片的快轴方向一致, 与 $\lambda/2$ 波片的快轴成 $3\pi/8$ 时, 3 个波片组成复合的 $\lambda/4$ 波片, 复合波片的等效快轴与 $\lambda/4$ 波片快轴方向的夹

角为 $\pi/4$ (2) 两个 $\lambda/4$ 波片的快轴方向一致, 与 $\lambda/2$ 波片的快轴成 $\pi/4$ 时, 3 个波片组成复合的 $\lambda/2$ 波片, 复合波片的等效快轴与 $\lambda/4$ 波片快轴方向的夹角为 $\pi/4$

2 消色差异性分析

TN 液晶盒在外电压的调制下, 通过选取合适的厚度 d , 可等效为 $\lambda/2$ 波片, 并且 $\lambda/2$ 波片与两个 $\lambda/4$ 波片的组合可构成复合的消色差波片。上面的复合波片理论针对的是由同种材料组合的情况, 作者现在研究的是不同材料的组合。由于液晶是正晶体, 现在也选取一种正单轴晶体 MgF_2 与之搭配, 且使 TN 液晶盒与两个 $\lambda/4$ 波片构成复合 $\lambda/2$ 波片, 选取中心波长 $\lambda_0 = 650\text{nm}$, 考虑在 500nm ~ 900nm 光谱范围的消色差异性。

对于 Merck E7 型液晶非常光与寻常光的折射率色散方程可表示为 $n_e = A_e + \frac{B_e}{\lambda^2}, n_o = A_o + \frac{B_o}{\lambda^2}$, 其中, A_e, B_e, A_o, B_o 常数只与介质自身性质有关, 只能通过实验测定其数值, 这里 $A_e = 1.6718, B_e = 24460.2\text{nm}^2; A_o = 1.4983, B_o = 8612.6\text{nm}^2$ 。可以推出液晶的色散方程为 $\Delta n_1 = 0.1735 + \frac{15847.6}{\lambda^2}$; 对于 $\lambda_0 = 650\text{nm}$, 液晶盒的厚度 $d = 1.55\mu\text{m}$ 。

对于 MgF_2 晶体, 通过已有的实验数据^[7] 可拟合出其色散方程 $\Delta n_2 = 0.001153 + \frac{83.7415}{\lambda^2}$ 。

现在设计一种方法来考察这种复合式波片的消色差异性: 将复合 $\lambda/4$ 波片放于两个正交的起偏棱镜 P_1 和 P_2 之间 (见图 2), 且使第 1 块棱镜的透振方向与坐标

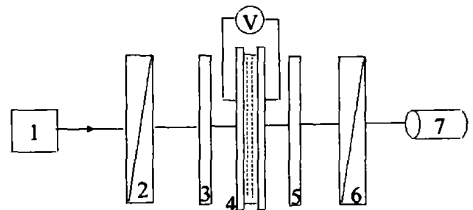


Fig 2 The experimental devices of testing transmitted intensity
1—LD 2—polarizer P_1 3, 5— $\lambda/4$ waveplate 6—polarizer P_2 7—detector

系的 x 轴所成的角度 $\beta = 45^\circ$, 这样第 2 块检偏镜的透振方向与 x 轴成 $\gamma = \beta + \pi/2$ 令在液晶盒前后的两个 $\lambda/4$ 波片的琼斯矩阵为 M_1, M_2 , 那么光经过这个光学系统时的透过比 $T^{[3]}$ 可表示为:

$$T = \left[\cos X \sin Y / M_2 M_{LC} M_1 \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix} \right]^2 \quad (5)$$

由偏光干涉的知识可知, 在忽略介质分界面处的反射以及介质吸收的理想情况下, 当光经过该光学系统后的透过比有 $T = \sin^2(\delta/2)$, 这样将讨论复合波片的消

色差性转化为考察透过比的平稳性,而透过比是一个数值容易分析,图3为根据实验数据所绘制的曲线。

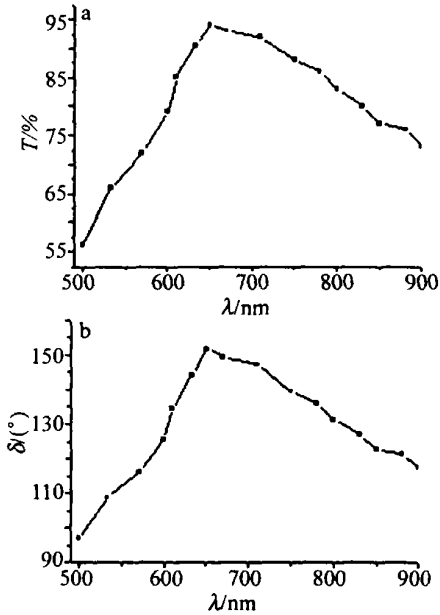


Fig 3 The experimental curve of achromatic waveplate

在前面分析的基础上,将液晶和云母的色散方程代入到透过比公式,可以看出 T 只是 λ 的函数即 $T = T(\lambda)$ 。进一步转化得 $\delta' = 2\arcsin(\sqrt{T}) = \delta'(\lambda)$,通过软件MATLAB计算模拟得对应的理论曲线(见图4)。

对比实验与理论曲线可以看出,两者在基本趋势走向上是一致的,这可以证明该理论的可行性,所不同的是,由于在分界面上的反射以及材料的吸收致使实

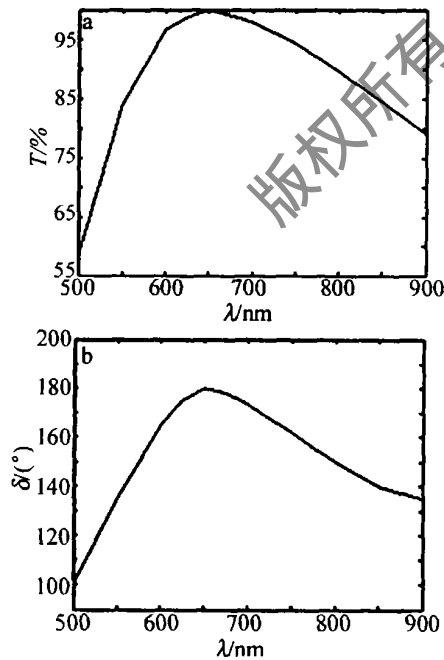


Fig 4 The academic curve of achromatic waveplate

验曲线中的透过率达不到100%。分析理论曲线可以得出:在650nm处对应的 $\lambda/2$ 波片,此时的 $T = 100\%$, $\delta' = 180^\circ$ 。在光谱范围内有波动,在趋近于长波长变化越缓慢,认为 $\Delta\delta/\delta < 10\%$ 具有较好的消色差性,则在600nm~750nm的光谱范围内具有较好的消色差性。

3 偏振控制

如前面的分析,在所加电压大于TN液晶的阈值电压时,液晶与两个 $\lambda/4$ 波片的组合可构成一消色差 $\lambda/2$ 波片(或 $\lambda/4$ 波片);那么当外加电压撤掉时,光通过该复合波片又将怎样?以复合成 $\lambda/2$ 波片的情况为例,在前面建立的坐标系的基础上进行分析;当入射的线偏振光的振动方向平行于第1个 $\lambda/4$ 波片的快轴时,即与 x 轴成 45° 的夹角,通过第1个 $\lambda/4$ 波片后依然是线偏振光,偏振状态不变;再通过TN液晶盒,此时因为没有外加电压,液晶盒具有扭曲效应,线偏振光的偏振方向旋转了 90° ,此时出射的线偏振光的偏振方向正好与第2个 $\lambda/4$ 波片的慢轴方向重合,通过时偏振状态不变。所以,当撤掉外电压时,复合 $\lambda/2$ 波片的作用相当于 90° 的旋光器。

4 结论

TN液晶盒在取合适的厚度后与两个 $\lambda/4$ 波片组合构成复合波片,当TN液晶盒在所加的外电压大于其阈值电压时,可以作为消色差的 $\lambda/2$ 波片(或 $\lambda/4$ 波片);对于消色差的 $\lambda/2$ 波片,当撤掉外电压时,可作为一般的 90° 旋光器。

参考文献

- [1] FAN Zh X. Liquid crystal apparatus technique basic [M]. Beijing Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2000. 74~77 (in Chinese).
- [2] WU Sh C, WU Q Sh. Bisector effect on the twisted nematic cells [J]. Information Display, 1999(1): 4~12 (in Chinese).
- [3] WANG Q H, WU T X, ZHU X Y *et al*. Achromatic polarization switch using a film-compensated twisted nematic liquid crystal cell [J]. Liquid Crystals, 2004, 31(4): 535~539.
- [4] WEIG H. Matrix optics [M]. Beijing Weapon Industry Press, 1995. 168~171 (in Chinese).
- [5] ZHU X Y, JING H, WANG Zh K *et al*. Threshold characteristics of homeotropic twisted nematic liquid crystal display [J]. Liquid Crystals and Displays, 2001, 16(2): 97~103 (in Chinese).
- [6] YUN M J, LI G H, WANG M *et al*. Three-in-one composite achromatic $\lambda/4$ wave plate [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2001, 12(6): 562~564 (in Chinese).
- [7] LI J Zh. Handbook of optics [M]. Xi'an Shaanxi Science and Technology Press, 1986. 1300 (in Chinese).