

# 一种反射式扭曲向列型液晶显示优化设计的新方法

申 溯 余 俊

(浙江大学光电系现代光学仪器国家重点实验室, 光及电磁波研究中心, 杭州 310027)

**摘 要** 基于扭曲向列型液晶的显示器件通过调制光波的偏振态实现显示的目的, 因此光波的偏振状态在其中起了极为关键的作用. 本文结合琼斯矩阵和表示光波偏振态的斯托克斯参量 j-circle 方法, 提出了一种优化反射式扭曲向列型液晶显示器件的新方法. 该方法与原有的空间参量方法不同的是采用了追踪光波在传播过程中偏振态变化的办法得到反射式液晶显示器件中各光学元件的参数. 该方法简单直观并且可以对多个参数同时进行优化, 实现了显示性能的最优化设计并得到了新的显示模式.

**关键词** 反射式液晶显示; 庞加莱球; 偏振态; 斯托克斯参量

**中图分类号** TN141.9 **文献标识码** A

## 0 引言

液晶显示已经成为显示领域的一个重要产业方向<sup>[1,2]</sup>. 带有单偏振片的扭曲向列型 (Twisted nematic liquid crystal displays, TN LCD) 反射式液晶显示器件能耗少、体积小、重量轻、对比度在不同光线照明条件下基本不变, 并且由于消除了由后偏振片带来的视差, 可以实现更高的象素密度, 在现代信息显示系统中得到越来越广泛的使用. 对扭曲向列型液晶显示来说, 无论对于反射式还是透射式, 都是通过调制入射光波的偏振态来调制输出光强, 从而达到显示的目的. 光波偏振态的控制在于扭曲向列型液晶显示中起着关键作用.

Sonehara 等首先提出了具有一个偏振片和一个反射镜的最简单的反射式扭曲向列型液晶显示结构<sup>[3]</sup>, 但是具有对比度小和色散大的缺点. Blinov<sup>[4]</sup> 等对此分别以偏振片角度为参数或者加入相位延迟膜进行改进. Wu, Tang 等采用参量空间方法和穆勒矩阵方法进行优化并且提出了新的显示模式<sup>[5~9]</sup> 改善显示性能.

参量空间方法在二维空间上优化器件参数, 但是该方法一次只能优化两个参数. 在增加相位延迟膜后, 参量空间方法不易得到解析解, 并且它对液晶光学中非常重要的光波偏振态不能表述. 穆勒矩阵方法对偏振模式进行了分析, 但它和参量空间方法一样不能追踪光波在器件中传播时偏振态的变化. 本文提出采用基于庞加莱球 (Poincare sphere) 的 j-circle 方法设计优化带有相位延迟膜的扭曲向列型反射式液晶显示. 它可以同时优化入射偏振片偏振角, 液晶盒扭曲角及相位延迟膜慢轴方位角等多个参数, 直观地描述了光波偏振态的变化过程, 进而寻

找到新的显示模式. 这种方法也会增进人们对扭曲向列型液晶中偏振光学的理解.

## 1 Jones 矩阵和 Stokes 向量

向列型液晶反射式显示的结构如图 1. 为了得到输出光波的偏振态, 我们采用 Jones 矩阵进行计算. 定义液晶盒第一面指向矢沿  $x$  轴正方向定向, 均匀扭曲液晶盒 Jones 矩阵可以表示为如下形式<sup>[6]</sup>.

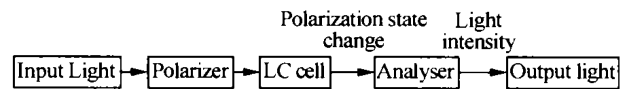


图 1 液晶显示工作原理

Fig. 1 Schematic diagram of the general working principle of TNLCD

$$R_{LC} = R(-\varphi)J(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} \cos X - i \frac{\Gamma}{2} \frac{\sin X}{X} & \varphi \frac{\sin X}{X} \\ -\varphi \frac{\sin X}{X} & \cos X + i \frac{\Gamma}{2} \frac{\sin X}{X} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\Gamma = 2d\pi(n_e(\theta) - n_o)/\lambda, X = \sqrt{\varphi^2 + (\Gamma/2)^2}, \frac{1}{n_e^2(\theta)} =$$

$$\frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2}. \varphi \text{ 是液晶盒扭曲角, } \theta \text{ 是液晶指向矢}$$

平均倾角,  $n_e(\theta)$  是非寻常光折射率,  $n_o$  是寻常光折射率,  $\lambda$  是光波波长,  $d$  是液晶盒盒厚.

出射光波  $E_{out}$  可由 Jones 矩阵与入射光波  $E_{in}$  联系起来.

$$E_{out} = P_N P_{N-1} \cdots P_2 P_1 E_{in} \quad N = 1, 2, \cdots \quad (2)$$

$P_i$  为光波依次经过器件的 Jones 矩阵.

Stokes 参量用  $[S_0, S_1, S_2, S_3]^T$  表示. 各元素表示的物理意义是:  $S_0$ : 总的出射光强,  $S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$ ;  $S_1$ :  $x$  方向偏振光分量与  $y$  方向偏振光分量光强之差;  $S_2$ : 与  $x$  轴  $+45^\circ$  方向偏振光分量与  $-45^\circ$  偏振

光分量光强之差;  $S_3$ : 左旋圆偏光分量与右旋圆偏振光分量光强之差. Stokes 参量可以在 Poincare 球上表示出来, 关于 Stokes 向量和 Poincare 球更详细的介绍请参考文献 [10]. Stokes 参量描述光波的强度和偏振态与 Jones 矩阵不同的是, 被描述的光波可以是完全偏振光, 部分偏振光和完全非偏振光, 可以是单色光也可以是非单色光, 这是因为 4 个 Stokes 参量都是实数, 并且是可测量的物理量. 如果光波是完全偏振态, 它们和 Jones 向量的关系:  $S_1 = E_x E_x^* - E_y E_y^*$ ,  $S_2 = E_x E_y^* + E_y E_x^*$ ,  $S_3 = i(E_x E_y^* - E_y E_x^*)$

采用 Poincare 球可以方便地描述出偏振态的变化, 已经在与偏振态紧密相关的液晶光学, 光纤光学等光学领域中得到广泛应用 [11, 12].

## 2 j-circle 及实例

Poincare 球采用一个三维球体表示光波偏振态, 但由于光强归一化完全偏振光中  $S_1, S_2, S_3$  只有两个量是独立的, 并且在液晶显示器件中光波偏振态是左旋或者右旋并不重要, 因此可以只用 Poincare 球在  $S_1 - S_2$  平面的投影圆表示光波偏振态, 这个圆就叫作 j-circle. 根据 Poincare 球的性质可知 j-circle 圆周上的点表示线偏振态, 圆点表示圆偏振态, 圆内其它各点都表示具有特定方位角和椭圆度的椭圆偏振态. 特别值得注意的是 j-circle 的几个性质, 它们的证明可见参考文献 [10].

(a) j-circle 上的方位角是实际器件方位角的两倍. (本文图示标注按实际的方位角)

(b) 光波经过某一波片偏振态的变化过程在 j-circle 上对应于经过该点且垂直于波片慢轴的弦上的移动过程.

(c) 偏振旋转器件对光波的作用在 j-circle 上对应于在通过该点同心圆上的转动.

首先采用 j-circle 讨论一个最简单结构的单偏振片反射式液晶显示结构, 如图 2. 它的显示原理是当未加电压时, 入射光波通过均匀扭曲定向的液晶盒时偏振态被改变, 而施加高电压后液晶指向矢与电场方向平行排列对入射光偏振态没有影响, 从而反射后透过偏振片的光强可以被调制达到实现显示的目的.

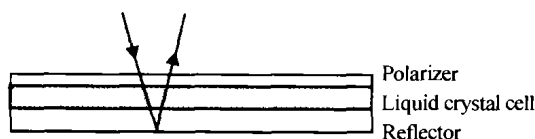


图 2 最简单的扭曲向列型反射式液晶显示结构

Fig. 2 Schematic diagram of a simple reflective TN LCD

设偏振片透光轴与  $x$  轴夹角  $\alpha$ , 那么反射率  $\kappa$  可以表示为

$$\kappa = |(\cos \alpha \quad \sin \alpha) \cdot R(-\varphi) P_{LC}(-\varphi) \cdot R(\varphi) P_{LC}(\varphi) [\cos \alpha \quad \sin \alpha]^T|^2 \quad (3)$$

上标  $T$  表示矩阵或者向量转置.

如果  $\alpha = 0^\circ, \kappa = 1$  时, 由式 (3) 和前面的定义, 可得

$$X = m\pi (m = 1, 2, \dots) \quad (4)$$

如果  $\alpha = 0^\circ, \kappa = 0$  时, 由式 (3) 和前面的定义

$$X = m\pi \text{ 和 } \varphi = \Gamma/2 (m = 1, 3, \dots) \quad (5)$$

这就是一个常黑型 (Normal black) 显示模式.

下面用 j-circle 追踪光波入射和反射时偏振态的变化.

条件 (4) 就是液晶中的 Gooch - Carry 条件 [13], 实现了入射线偏振光偏振面扭转  $\varphi$  角, 既液晶中所谓的波导模式 (waveguiding mode). 图 3 以  $90^\circ$  扭曲角为例表示了光波在整个传输过程中偏振态的变化, 对其它扭曲角情况类似. 入射偏振光偏振方向经过中间椭圆偏振态向液晶盒扭曲方向完全偏转  $\varphi$  角 (沿图中箭头方向), 经过反射镜反射后再次经过液晶盒后偏振方向沿反方向偏转  $\varphi$  角, 入射光波能量完全从偏振片中出射. 由图 3 可以看出当  $m = 2$  时, 入射线偏光在液晶盒中恰有一个偏振面旋转  $45^\circ$  的状态. 经过计算可以得到如果  $d\Delta n$  固定, 此时液晶盒厚度恰好是满足式 (4) 时厚度的一半. 如果对  $m$  为更高级次进行计算作图, 在  $0 \sim \varphi$  之间就会有  $m - 1$  个点上光波恰好是线偏振态且偏振方向为  $k \frac{\varphi}{m} (m = 1, 2, \dots, m - 1)$ .

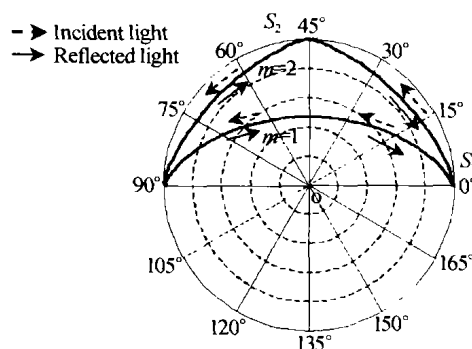


图 3 满足液晶波导模式时入射光波偏振态的变化.

$m = 1$  和  $m = 2, \varphi = 90^\circ, \alpha = 0^\circ$

Fig. 3 The curves for the evolution of polarization state of incident linear-polarized light  $m = 1$  and  $m = 2, \varphi = 90^\circ, \alpha = 0^\circ$

对于满足式 (5) 的常黑型液晶显示, 图 4 (a) 和图 4 (b) 分别表示了  $m = 1$  和  $m = 3$  时光波偏振态的变化. 光波在液晶盒内传播时都经过了线偏振态 - 椭圆偏振态 - 圆偏振态的变化. 对  $m$  为更高级次进行计算作图可以看到整个人射和反射传输过程中光波有  $m$  次经过圆偏振态,  $m - 1$  次经过线偏振态. 要得到反射光波与入射光波正交的线偏振态, 到达反射镜时光波必须是圆偏振态, 由 Jones 矩阵么模

性得到结论可以方便的从  $j$ -circle 上得到.

一般对反射式扭曲向列型液晶显示模式的优化大多采用的参量空间法,但是空间参量法计算量大,而且一次只能分析两个参数. Zhuang 采用 Poincare 球方法<sup>[12]</sup>优化了具有最简单结构的双稳态扭曲向列型反射式液晶显示,但它的推导过程仍然繁琐. 下面我们采用  $j$ -circle 方法优化带有相位延迟膜的反射式扭曲向列型液晶的显示模式.

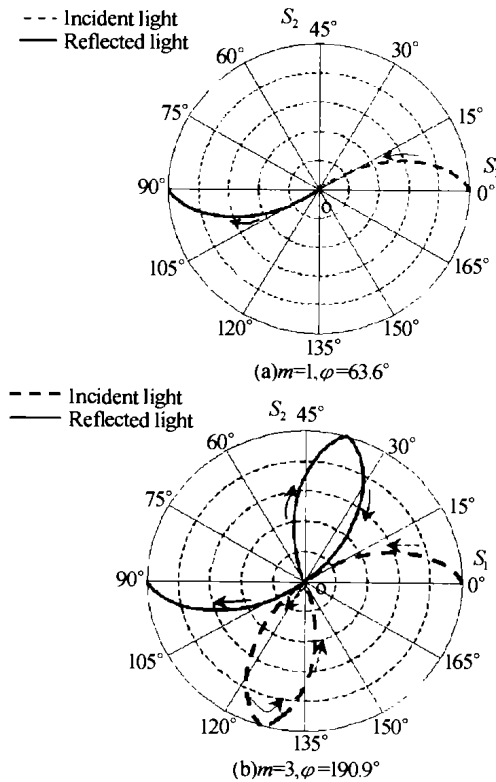


图4 最简单结构中反射式扭曲向列型液晶显示中光波偏振态在液晶盒中的变化

Fig. 4 The evolution of polarization state in normal black (NB) reflective TN LCD with the simplest structure

### 3 分析与优化

我们要分析的器件结构是在图2液晶盒后增加一层四分之一波长相位延迟膜,这样可以降低色散提高显示性能<sup>[14]</sup>. 各光学元件坐标如图5.

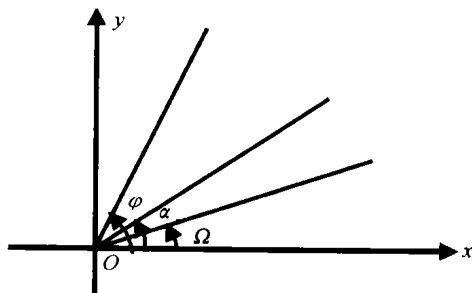


图5 系统使用的坐标系简图(液晶盒第一面指向矢沿  $x$  轴方向定向) $\varphi$ :液晶盒扭曲角  $\Omega$ :相位延迟膜慢轴方位角  $\alpha$ :入射偏振片透光轴

Fig. 5 The sketch of optical axis position of all optical components  $\varphi$ : twisted angle  $\Omega$ : the slow axis of retardation film  $\alpha$ : the angle of the polarizer

由光学等效理论,液晶盒在光学上可以等效为一个波片和偏振旋转片的组合. 式(1)可以改写为

$$M(a, b, c, d) = \begin{bmatrix} \cos \chi & -\sin \chi \\ \sin \chi & \cos \chi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Psi & -\sin \Psi \\ \sin \Psi & \cos \Psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp\left(-\frac{i\Delta}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(\frac{i\Delta}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Psi & \sin \Psi \\ -\sin \Psi & \cos \Psi \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\Psi$  是等效波片慢轴方位角,  $\Delta$  是等效波片相位厚度,  $\chi$  是等效偏振旋转片旋转角. 比较式(1)和式(6),并经过运算可得液晶盒的等效波片和旋转片参数

$$\tan 2\Psi = \frac{\varphi}{X} \tan X \quad (7)$$

$$\tan \chi = \tan(\varphi - 2\Psi) \quad (8)$$

$$\cos^2\left(\frac{\Delta}{2}\right) = \cos^2 X + \left(\frac{\varphi}{X}\right)^2 \sin^2 X \quad (9)$$

利用前面得到的结论,优化对比度和亮度. 对常黑型扭曲向列液晶显示,首先不加电压时达到反射镜的光波必须为圆偏振态,这个过程如图6. 进入偏振片后光波偏振方向  $\alpha$  (在  $j$ -circle 上对应于  $2\alpha$ ), 经过等效波片后沿虚线变化到  $P_1$ , 再经过等效偏振旋转片旋转  $\chi$  角 (在  $j$ -circle 上对应于旋转  $2\chi$ ), 最后相位延迟膜将偏振态由线偏态 (图中  $P_{21}$  或  $P_{22}$ ) 改变为圆偏态 (图中沿直径移动到圆点  $O$ ); 其次,当增加外加电压时,由于液晶指向矢逐步向电场方向排列,扭曲效应和双折射性消失. 为使亮度最大,要求到达反射镜的光波必须为线偏振态,因此如果当入射线偏振光偏振方向沿  $+\alpha$ , 相位延迟膜的慢轴  $\Omega$  就要在  $\alpha$  或者  $\alpha \pm 90^\circ$  方向,图中对应于与  $x$  轴呈  $2\alpha$  角的直径方向.

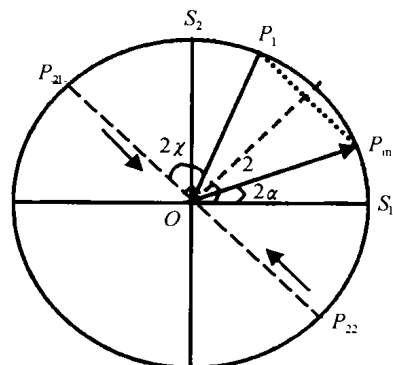


图6  $j$ -circle 优化器件结构过程简图

Fig. 6 The expression of optimum process by  $j$ -circle method

如果图(6)中  $2\Psi$  和  $2\alpha$  不重合,要使输入线偏振光第一次经过液晶盒后仍为线偏振光,那么由于等效偏振旋转片不改变椭圆度,因此输入光经过等效波片后也必须为线偏光. 在图6中既  $P_{in}$  要么沿虚线到  $P_1$ , 要么仍然保持在  $P_{in}$ , 对应的等效波片相位厚度  $\Delta$  分

别为  $\Delta = (2m - 1)\pi$  和  $\Delta = 2m\pi (m = 1, 2, \dots)$ .

(a) 当  $\Delta = (2m + 1)\pi$  时, 由式(9)得

$$\cos^2 X + \left(\frac{\varphi}{X}\right)^2 \sin^2 X = 0, \text{ 由于扭曲角 } \varphi \neq 0, \text{ 所以该条件不能满足.}$$

(b) 当  $\Delta = 2m\pi$  时, 由式(9)得  $X = m\pi$ , 进而由式(7)得  $2\Psi = m\pi$ , 并由加电下亮态条件可得等效旋转片旋转角度  $\chi = \frac{\pi}{4} + m\pi$ , 由式(8)得  $\varphi = \frac{\pi}{4} \pm m\pi$ .

当满足条件(b)时, 类似于前面提到的液晶波导条件, 实现了入射偏振光偏振方向完全偏转  $\varphi$  角. 在这个条件下, 如果偏振片透光轴平行于液晶盒第一面指向矢方向 ( $\alpha = 0$ ), 这就是一般普通的 TN 显示模式. 如果  $\alpha$  与  $x$  轴不平时就会出现新的显示模式. 图 7 表示了  $m = 1, \alpha = 33^\circ, \varphi = 45^\circ$  时入射偏振光透射液晶盒的过程. 从初始线偏振态扭曲  $45^\circ$  过程中经过一次圆周, 表明这其中还有一个线偏振态, 并且偏振方向与偏振片透光轴几乎呈  $135^\circ$ , 也符合常黑型显示模式的要求, 这是一个以前文献没有提到的新的常黑型显示模式. 由  $\alpha$  与  $\varphi$  的关系, 这个显示模式类似于混合型扭曲向列显示模式 (Mixed TN)<sup>[5]</sup>. 它的盒厚较薄, 取  $\lambda = 550 \text{ nm}$  时,  $d\Delta n = 0.54 \text{ nm}$ , 具有快的响应速度和较低的驱动电压.

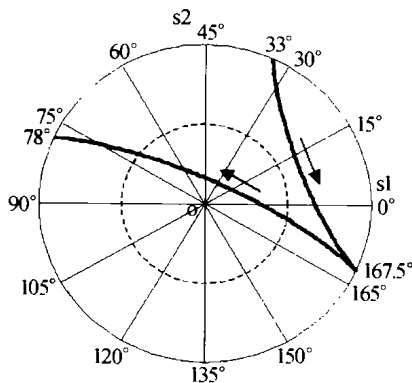


图 7 满足条件(b)时入射线偏光偏振态变化过程中出现一个新的显示模式

Fig. 7 The evolution of polarization state when satisfying condition (b), a new mode is found

如果图 6 中  $2\Psi$  和  $2\alpha$  重合, 入射光波通过等效波片偏振态不变, 则等效旋光片  $\chi$  必须满足

$$\chi = \frac{1 \pm 2m}{4} \pi (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (10)$$

由式(7)、(8)、(9)可得

$$\varphi = 2\alpha + \frac{1 \pm 2m}{4} \pi \quad (11)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{\varphi}{X} \tan X \quad (12)$$

如果  $\alpha = 0, \pm \frac{\pi}{2}, \pm \pi \dots$  时,  $X = m\pi$ , 类似于条件

(b). 否则输入偏振光偏振方向  $\alpha$  (也就是偏振片透光轴方向) 与液晶盒参数有关. 给定的液晶盒参数  $\Gamma$  和  $\varphi$ , 对应于一个满足条件的  $\alpha$ . 图 8 表示以  $\alpha = 30^\circ, \varphi = 105^\circ$  入射光偏振态变化过程. 运动轨迹两次经过圆周, 也就是说其间出现两次线偏振态, 一次是在  $\varphi' = 31.5^\circ$  另一次是在  $\varphi'' = 73.5^\circ$ . 另外由图中可以看到, 当  $\varphi \approx 52.5^\circ$  时, 光波偏振态非常接近圆偏振态, 如果立刻由反射镜反射, 那么就on一个新的常黑型显示模式. 如果要想得到常黑型反射显示模式, 可以将上面提到的常亮型反射式显示结构中的相位延迟膜慢轴旋转  $45^\circ$ , 就可以得到常黑型显示模式.

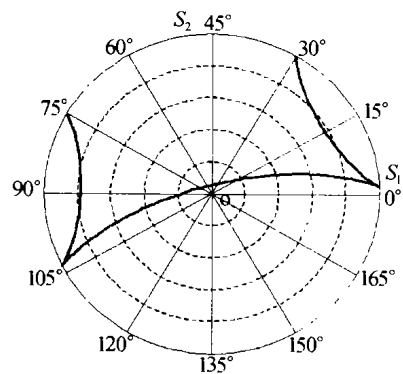


图 8 当偏振片透光轴与等效波片慢轴平行时的一种显示模式

Fig. 8 The evolution of polarization when the angle of polarizer is parallel to the equivalence waveplate, a new normal black mode

## 4 结论

上面的讨论都是在液晶指向矢均匀扭曲的情况下, 主要真对亮度和对对比度进行分析和优化, 对色散, 中间态电压和视角等问题没有进行讨论. 但是仍然可以看出本文提出的用 j-circle 方法优化反射式扭曲向列型液晶显示器件简单直观的特点. 通过对液晶盒中光波偏振态的追踪, 不但可以得到一些已有的显示模式和预测新的显示模式, 而且还可以增加对与偏振密切相关的液晶光学的认识和理解, 因此它是设计向列型液晶显示的有力工具. 下一步的工作是将该方法应用于扭曲向列双稳态液晶, 扭曲共面转换模式等新型液晶显示模式的分析和优化.

感谢何赛灵教授对本文写作的帮助和指导

### 参考文献

- 1 郑臻荣. 液晶投影显示复眼照明的容差模拟分析. 光子学报, 2004, 33(5): 593 ~ 597  
Zheng Z R. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(5): 593 ~ 597
- 2 刘骏, 顾静良, 李海峰, 等. 液晶投影仪液晶面包自动汇聚系统的对焦算法分析. 光子学报, 2003, 32(10): 1268 ~ 1270  
Liu J, Gu J L, Li H F, et al. Acta Photonica Sinica, 2003,

- 32(10): 1268 ~ 1270
- 3 Sonehara T, Okumura O. Proc. of the 9th International Display Research Conference ( Society for Information Display ), Yamato, Japan Display 1989. 192 ~ 196
  - 4 Blinov T M, Chigrinov V G. Electrooptic Effects in Liquid Crystal Materials. New York, Springer, 1994
  - 5 Wu S T. Overview on reflective liquid crystal displays using one polarizer, SPIE conference on DisplayTechnologies II, Taipei, Taiwan, 1998. 84 ~ 97
  - 6 Wu S T, Wu C S. Mixed-mode twisted nematic liquid crystal for reflective displays. *Appl Phys Lett*, 1996, **68**(11): 1455 ~ 1457
  - 7 Tang S T, Yu F H, *et al.* Reflective twisted nematic liquid crystal display I. Retardation compensation. *J Appl Phys*, 1997, **81**(9): 5924 ~ 5929
  - 8 Yu F H, *et al.* Reflective twisted nematic liquid crystal display. II. Elimination of retardation film and rear polarizer. *J Appl Phys*, 1997, **82**(11): 5287 ~ 5294
  - 9 Tang S T, Kwok H S. Mueller calculus and perfect polarization conversion modes in liquid crystal displays. *Journal of Applied Physics*, 2001, **89**(10): 5288 ~ 5293
  - 10 廖延彪. 偏振光学. 北京: 科技出版社, 2003 年 8 月第一版, 45 ~ 62  
Liao Yanbiao. Polarization Optics, Beijing: Scientific and Technical Publishers, 2003. 45 ~ 62
  - 11 Zhang D S, *et al.* Application of Poincare sphere in analyzing state polarization transmission in optical fiber. *Journal of Optoelectronics Laser* ( in Chinese ), 2003, **14**(10): 1109 ~ 1102
  - 12 Zhuang Z Z, Kim Y J, Patel J S. Parameter optimization for a reflective bistable twisted nematic display by use of the Poincare sphere method. *Optics Letter*, 1999, **24**(16): 1166 ~ 1168
  - 13 Gooch C H, Tarry H A. Optical characteristics of twisted nematic liquid crystal films. *Electronics Letters*, 1974, **10**(1): 2 ~ 4
  - 14 Fukuda I, Kitamura M, Kotani Y. Proc. of the 15th International Display Research Conference, Hamamatsu, Japan ( Society for Information Display ), Asia Display , 1995. 881 ~ 886

## The Optimized Configuration for Reflective Twisted Nematic Liquid Crystal Displays by a Novel Method

Shen Su, She Jun

*State Key Laboratory, Optical Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027*

Received date: 2004-09-13

**Abstract** The state of polarization plays an important role in twisted nematic liquid crystal displays. Combined with Jones matrix and j-circle method based on Stokes vectors, a novel method is proposed for the optimization of reflective twisted nematic liquid crystal displays. The difference between the space parameters method and the present method is that by chasing the polarization state in propagation the optimum condition is obtained. The proposed method has the advantage of ease to understand and can simultaneously optimize several parameters. The new optimal displays modes are found.

**Keywords** Reflective liquid crystal displays; Poincare sphere; Polarization; Stokes vectors



**Shen Su** Born in Shanxi, China. He received the bachelor degree in the Department of Optical Engineering in Zhejiang University. Now he is a graduate of the center for optical & electromagnetic research of Zhejiang University and engaged in research of LC device.