

高性能双稳态向列相液晶显示器

郭建新^{1,2)} 郭海成²⁾

¹⁾ 中国科学院长春物理研究所, 长春 130021)

²⁾ 香港科技大学显示研究中心, 清水湾, 香港)

(1999 年 4 月 10 日收到; 1999 年 6 月 9 日收到修改稿)

提出四种可实际应用的非垂直偏振片配置的双稳态扭曲向列相液晶显示模式. 这些显示模式大都具有高稳定性, 并能提供高对比度和高亮态透过率. 有些甚至可达到扭曲向列相液晶显示器的显示效果, 实现黑白显示. 这些显示模式性能优于已提出的垂直偏振片配置的其他双稳态向列相液晶显示模式.

关键词: 双稳态向列相, 液晶显示, 参数空间

PACC: 6130

1 引 言

双稳态向列相 (BTN) 液晶显示器 (LCD) 是液晶在特殊波形驱动脉冲作用下在两个准稳扭曲态间转换而进行显示的器件. 最初是由 Berreman 和 Heffner 在 1981 年提出的^[1]. 当时两个稳定态是 0° 和 360° . 这种双稳是由于在特定液晶盒厚 d 下, 扭曲向列相液晶的自然螺距 p_0 与液晶盒的取向条件不一致造成的. 而且只有这种不相匹配在一定范围时, 即 d/p_0 在一定范围时, 才能得到双稳态^[2,3]. 由于这种双稳态显示方式具有制作简单、显示容量大、速度快、功耗低等优点, 最近得到广泛的研究^[2-4]. Tanaka 等人^[3]提出了一种简单矩阵驱动方法, 可使这种简单矩阵的显示方式达到有源矩阵的显示效果. Dozov 等人又提出一种应用单一稳定表面的高速 BTN 显示方式^[5]. Bryan-Brown 等人^[6]提出了利用栅状表面排列的可在亚微妙驱动脉冲下工作的 BTN LCD. 对 BTN 的动力学特性也有理论性研究^[7,8].

在以上这些研究中, 扭曲态大多是 0° 和 360° (或 180°). 只有 Xie 等人^[2]提出了可在 -90° 和 270° , 90° 和 450° 扭曲状态间转换的显示模式. 他们同时发现对于透射型器件当采用垂直偏振片配置时 ($-90^\circ, 270^\circ$) ($90^\circ, 450^\circ$) 和 ($0^\circ, 360^\circ$) 这三种扭曲状态已经包含了所有可能性. 本文将介绍几种非垂直偏振片配置的 BTN 显示模式. 它们能提供更好的显示品质并易于实际制造.

2 参数范围

能影响器件光学特性的主要器件参数有两偏振片方位角 α 和 γ , 液晶扭曲角 ϕ , 液晶层厚度 d 与液晶光学各向异性 Δn 的乘积 $d\Delta n$. 为简化优化过程, 首先对 ϕ 和 $d\Delta n$ 限定范围.

对于扭曲角范围的选择, 从对提高器件的稳定性角度来考虑. 我们发现当扭曲角大于 360° 时, 很难得到双稳态. 在模拟计算中也没能证明存在 ($90^\circ, 450^\circ$) 双稳态, 虽然在试验中得到了这种双稳^[2], 但其稳定性较低, 而且 d/p 范围很窄.

在高扭曲角的超扭曲液晶显示器中能产生一种影响显示性能的条形织构^[9]. 它的产生是由于当一些参数超过一定范围时, 如扭曲角大于 300° , Freedricksz 转换就不再严格适用了. BTN 器件一方面本身具有非稳定性 (自然螺距与取向条件不一致), 另一方面它至少有一个状态扭曲角大于 180° , 所以它也能被条形织构所影响.

因此, 应尽可能选择小扭曲角. 本文将扭曲角的范围限定在 450° 以内. 当然, 若某一稳态对应的扭曲角是左旋的, 则另一态对应的扭曲角最好是右旋的.

当 $d\Delta n$ 较大时, 扭曲液晶对光的色散作用非常大, 不易实现较暗的暗态, 即不能得到具有较大对比度的器件. 所以, 我们的优化范围限定在 $1.6 \mu\text{m}$ 以内. 而在 $1.1 \mu\text{m}$ 以内才有较好的结果. 当然, 当 $d\Delta n$ 很小时, 如小于 $0.2 \mu\text{m}$, 虽然可能有较好的显

示性能,但由于盒厚过小,也不宜进行实际生产.本文给出 $1.2 \mu\text{m}$ 以内的结果,它已经包含了所有的实际可能性.

3 BTN 光学特性

3.1 理论分析

在此,我们用琼斯矩阵方法分析 BTN 的光学特性.由于 BTN 的两个准稳态都具有均匀扭曲角和小的倾斜角,所以容易用琼斯矩阵进行描述.对于具有均匀扭曲角和小的倾斜角且光入射方向处表面指向矢沿 x 轴的液晶层,其琼斯矩阵为^[10]

$$M = \begin{pmatrix} A - iB & -C - iD \\ C - iD & A + iB \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中

$$A = \cos\phi \cos\beta d + \frac{\phi}{\beta d} \sin\phi \sin\beta d, \quad (2)$$

$$B = \frac{k_a}{\beta} \cos\phi \sin\beta d, \quad (3)$$

$$C = \sin\phi \cos\beta d - \frac{\phi}{\beta d} \cos\phi \sin\beta d, \quad (4)$$

$$D = \frac{k_a}{\beta} \sin\phi \sin\beta d, \quad (5)$$

其中

$$\beta d = (k_a^2 d^2 + \phi^2)^{1/2}, \quad (6)$$

$$k_a = 180 \times \Delta n / \lambda, \quad (7)$$

$$\Delta n = n(\theta) - n_o, \quad (8)$$

n_o 是寻常光折射率, $n(\theta)$ 是有效非寻常光折射率, θ 为指向矢倾斜角,它们满足下式,

$$\frac{1}{n(\theta)^2} = \frac{\cos^2\theta}{n_c^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_o^2}. \quad (9)$$

在此,我们假设 θ 为 0° .

常规透射式 LCD,液晶盒置于两个偏振片之间.入射和出射偏振光透光轴方位角分别与入射光处表面液晶指向矢方向成 α 和 γ .则光透过率可表示为

$$T(\alpha, \gamma, \phi, d\Delta n) = \left| (\cos\gamma \quad \sin\gamma) \cdot M \cdot \begin{pmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{pmatrix} \right|^2. \quad (10)$$

将此式展开可得

$$T(\alpha, \gamma, \phi, d\Delta n) = \left[\cos\beta d \cos(\phi + \alpha - \gamma) + \frac{\phi}{\beta d} \sin\beta d \sin(\phi + \alpha - \gamma) \right]^2$$

$$+ \frac{k_a^2}{\beta^2} \sin^2\beta d \cos^2(\phi - \alpha - \gamma). \quad (11)$$

BTN 的两个稳定态,分别用下脚标 1 和 2 来表示.即若 ϕ_1 为暗(或亮)态扭曲角,则 ϕ_2 为亮(或暗)态扭曲角,它们满足

$$\phi_1 + 360 = \phi_2. \quad (12)$$

如第 2 部分所限定,令 ϕ_1 在 -360° 到 90° 之间,则 ϕ_2 在 0° 到 450° 之间.为得到最好的显示效果,应该满足两个条件 $T(\alpha, \gamma, \phi_1, d\Delta n) = 0$ 和 $T(\alpha, \gamma, \phi_2, d\Delta n) = 1$.即能够同时得到高对比度和高亮态透过率.

对于确定波长 λ ,假设

$$\beta_1 d = 180 \times k, \quad k > 0, \quad k \in Z, \quad (13)$$

$$\phi_1 + \alpha - \gamma = 90 \pmod{180}, \quad (14)$$

则 $T(\alpha, \gamma, \phi, d\Delta n)$ 为零.其物理意义很明显(13)式即整数波片条件.当扭曲角为 ϕ 的液晶层满足这一条件时,可将其看作一旋光角为 ϕ 的旋光器.则在(14)式的条件下,透过率为零.

考虑(14)式和(12)式,则 ϕ_2 态的透过率可表示为

$$T(\alpha, \gamma, \phi_2, d\Delta n) = \sin^2\beta_2 d \left(1 - \frac{k_a^2}{\beta_2^2} \cos^2 2\alpha \right). \quad (15)$$

所以,当满足以下两个条件时,透过率 $T(\alpha, \gamma, \phi_2, d\Delta n)$ 等于 1.

$$\beta_2 d = 180 \times k + 90, \quad k \geq 0, \quad k \in Z, \quad (16)$$

$$\alpha = 180 \times k \pm 45, \quad k \in Z. \quad (17)$$

不失一般性,我们令 $\alpha = 45^\circ$,通过分析以上(12)(13)(14)和(16)式,就可以确定 $\alpha, \gamma, \phi_1, \phi_2, d\Delta n$ 的值.表 1 给出了在 $d\Delta n$ 小于 $1.6 \mu\text{m}$ 对 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 的五个优化结果.其中仅第 2 点的角度 $\phi_1 = 56.25^\circ$ 为正值,对应 $\phi_2 = 416.25^\circ$, 大于 360° .其他各点扭曲角均小于 360° .

表 1 当 $\lambda = 550 \text{ nm}$, $\alpha = 45^\circ$ 时,五个具有高显示性能潜质的优化结果

No.	$\gamma(^\circ)$	$\phi_1(^\circ)$	$d\Delta n/\mu\text{m}$
1	11.25	-123.75	0.3994
2	11.25	56.25	0.5225
3	146.25	-348.75	0.2728
4	11.25	-258.75	0.7648
5	56.25	-78.75	1.0734

对于使用了反射偏振片的反射式器件,其反射

率可表示为

$$R(\alpha, \gamma, \phi, d\Delta n) = [T(\alpha, \gamma, \phi, d\Delta n)]^2, \quad (18)$$

表 1 中的结果也同样适合于这种显示方式.

另外,当某一偏振片如 γ 旋转 90° 时,以上亮暗两态可以相互转换.对应这种情况 (19) 式取代 (14) 式:

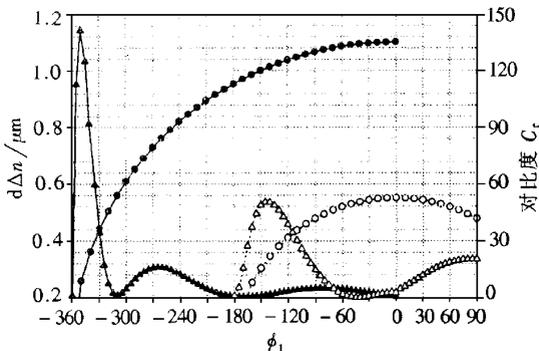
$$\phi_1 + \alpha - \gamma = (\text{mod } 180). \quad (19)$$

在非单色光条件下使用的显示器件在 (14) 式和 (19) 式条件下,显示效果并不相同.我们称满足 (14) 式的为第一模式,满足 (19) 式的为第二模式.

3.2 模拟计算

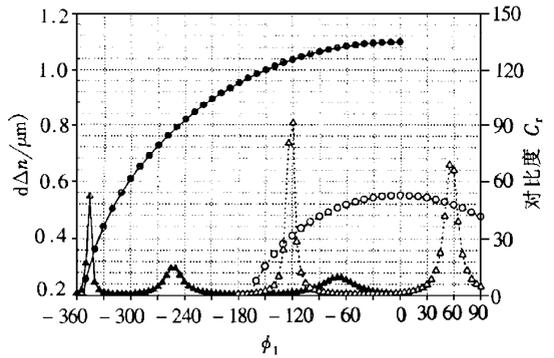
实际器件在非单色光源(通常为白光)下工作,因此器件的优化必须考虑到光源光谱的影响.在本文中采用精度比琼斯矩阵更高,更常用的 Berreman 4×4 矩阵方法^[1]在白光光源环境下对液晶、偏振片参数进行优化.

首先,我们在图 1 和图 2 中给出两种偏振片配置模式下 $d\Delta n$ 和对比度随扭曲角 ϕ_1 的变化关系.这些曲线对应在 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 和 $\alpha = 45^\circ$ 时, $T(\alpha, \gamma, \phi_1, d\Delta n) = 0$.而且,对应确定 ϕ_1 ,有一或两个 $d\Delta n$ 值使 $T(\alpha, \gamma, \phi_1, d\Delta n) = 0$,因此在图中都各有两条 $d\Delta n$ 和对比度随扭曲角 ϕ_1 的变化关系曲线.图 1 为第一模式,图 2 为第二模式.图 1 中表 1 五点所对应的区域大多具有 15:1 以上的对比度,仅第 5 点所对应的区域稍低一些.另外,对比度对扭曲角变化的敏感程度较低.图 2 中表 1 所列第 1、第 2 和第 5 点所对应区域的对比度大于图 1 中相应区域,其他两点对应的对比度比图 1 中相应数值为低.



—●— 第一 $d\Delta n-\phi_1$ 关系曲线; ...○... 第二 $d\Delta n-\phi_1$ 关系曲线;
 —▲— 第一 $C_r-\phi_1$ 关系曲线; ...△... 第二 $C_r-\phi_1$ 关系曲线

图 1 对于第 1 模式 $\alpha = 45^\circ$ 时, $d\Delta n$ 和对比度对应 ϕ_1 的变化情况



—●— 第一 $d\Delta n-\phi_1$ 关系曲线; ...○... 第二 $d\Delta n-\phi_1$ 关系曲线;
 —▲— 第一 $C_r-\phi_1$ 关系曲线; ...△... 第二 $C_r-\phi_1$ 关系曲线
 图 2 对于第 2 模式 $\alpha = 45^\circ$ 时, $d\Delta n$ 和对比度对应 ϕ_1 的变化情况

图 1 和图 2 所示并未显示出对应特定扭曲角, $d\Delta n$ 变化对对比度和亮态透过率的影响.为此在图 3 和图 4 中,我们同时采用参数空间的表示方法作进一步说明.图 3 和图 4 分别对应图 1 和图 2 两种情况.这两个图形同时表示出对应 $d\Delta n$ 和 ϕ_1 的等对比度和等亮态透过率曲线.依据这些图形,我们就能制作出同时具有高对比度和高亮态透过率的 BTN-LCD.对比度可超过 50:1,而亮态透过率可达到 30%,即不考虑偏振片的影响,透过率在 90% 左右(两个计算用的偏振片平行配置时的透过率为 33%).

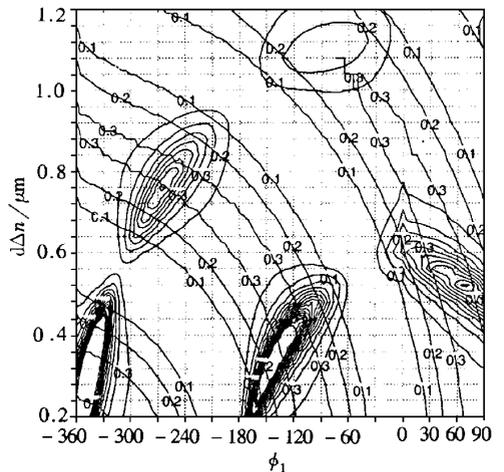


图 3 对于第 1 模式 $\alpha = 45^\circ$ 时, 等对比度和等亮态透过率随 $d\Delta n$ 和 ϕ_1 的变化情况(标志数值的是等亮态透过率曲线,数值表示透过率的值.环状曲线为等对比度曲线,相邻两环标志对比度相差 2:1)

从这两个图中,可得到如下结果:

1. 对于常规用途,第 4 点区域是最好的选择.

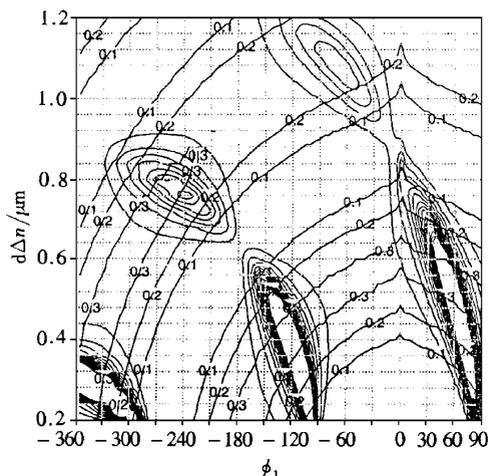


图 4 对于第 2 模式 $\alpha = 45^\circ$ 时, 等对比度和等亮态透过率随 $d\Delta n$ 和 ϕ_1 的变化情况(标志数值的是等亮态透过率曲线, 数值表示透过率的值, 环状曲线为等对比度曲线, 相邻两环标志对比度相差 2:1)

其扭曲角 ϕ_1 的范围在 -270° 到 -240° 之间, $d\Delta n$ 约 $0.8 \mu\text{m}$, 而对比度大于 12:1, 即它具有通常可接受的显示性能并且容易制作。

2. 对于要求高对比度的场合, 可以选择第 1, 2, 3 点所对应区域, 不利之处是 $d\Delta n$ 值较小。
3. 对于高稳定性的要求, 可考虑第 1 和第 4 点区域, 因为它们的双稳态扭曲角更接近 $-180^\circ/180^\circ$ 。
4. 第 5 点区域因为对比度太低, 不适于用来做显示。

我们同时得到一个有趣的结果, 这些图也包含了垂直偏振片配置^[2]的一些特例。在图 1, 3 中, 对 $\phi_1 = -360^\circ, -180^\circ, 0^\circ$ 三点应用的是垂直偏振片配置。在图 2, 4 中, 对 $\phi_1 = -270^\circ, -90^\circ, 90^\circ$ 三点应用的是垂直偏振片配置。

4 实验及结果

为验证理论分析及模拟计算结果, 我们制作了一些 BTN 样品。如前面的分析, 我们选择了以下三点: $\phi_1 = -260^\circ, d\Delta n = 0.76 \mu\text{m}$ (第 4 点区域) 常规应用, $\phi_1 = -120^\circ, d\Delta n = 0.40 \mu\text{m}$ (第 1 点区域) 和高对比度应用, $\phi_1 = 60^\circ, d\Delta n = 0.54 \mu\text{m}$ (第 2 点区域) 高对比度应用。具体参数的选择原则偏重于对比度, 如对 $\phi_1 = -120^\circ$, 由于第 2 模式对比度较高, 所以 $d\Delta n$ 值的选择倾向于使器件在第 2 模式下工作于最好状态。

其负面影响是另一模式达不到应有的性能。

液晶盒是用常规方法制作的, 在 ITO 玻璃表面涂覆聚酰亚胺作为取向层, 应用适宜的液晶材料 (MLC5300-5400 四瓶混合物和 ZLI-6295) 以获得合适的 $d\Delta n$ 。掺入适量的左旋掺杂剂 S-811 得到合适的扭曲螺距, 获得双稳。

用来驱动 BTN 器件的脉冲波形比较简单^[2], 它含有一个使液晶分子近于垂直排列的复位脉冲, 和之后的使液晶分子最终稳定到某个准稳态的选择脉冲, 对应某一稳态的选择脉冲可以为 0。

我们测量了三种器件的透射光谱特性, 它们的最低驱动条件及稳定周期列于表 2 中。表中, V_r 为复位脉冲电压, T_r 为复位脉冲作用时间, V_s 为选择脉冲电压, T_s 为选择脉冲作用时间, T 为显示一个亮暗态的周期时间。

表 2 BTN 器件的驱动特性

$\phi_1 / (^\circ)$	V_r / V	T_r / ms	V_s / V	T_s / ms	T / s
-260	20	16	4	8	2.5
-120	42	12	10.5	6	3.3
60	22	20	5.5	10	2.0

如前所述, $\phi_1 = 60^\circ$ BTN-LCD 的稳定性不如其他两种器件, 它能维持稳态的周期为 2 s, 当然这已经足以用来做实际驱动了。

我们将一些光谱特性列于表 3 中。测量是以钨灯为光源。

表 3 器件光谱特性

$\phi_1 / (^\circ)$	模式	亮态透过率/%	对比度
-260	1	17	11:1
-260	2	16	4:1
-120	1	22	11:1
-120	2	19	57:1
60	1	20	7:1
60	2	14	13:1

测量结果正如图 3 和图 4 所示, $\phi_1 = -260^\circ$ 第 1 模式、 $\phi_1 = -120^\circ$ 第 2 模式和 $\phi_1 = 60^\circ$ 第 2 模式的对比度分别大于相应另一种模式的对比度。而且 $\phi_1 = -120^\circ$ 对比度要大于 $\phi_1 = 60^\circ$ 和 $\phi_1 = -260^\circ$ 的对比度, 已能接近 60:1。我们以 $\phi_1 = -120^\circ$ 器件为例对测量结果做详细介绍。

图 5 所示为透射率随驱动脉冲的变化情况, 器件为 $\phi_1 = -120^\circ$ 第 2 模式, 驱动信号周期为 2 s, 复

位脉冲幅度为 42 V,光源波长 543.5 nm. -120° 状态为亮态,由施加 10 V 左近的选择脉冲来获得. 240° 状态为暗态,可通过 0 V 选择信号获得.

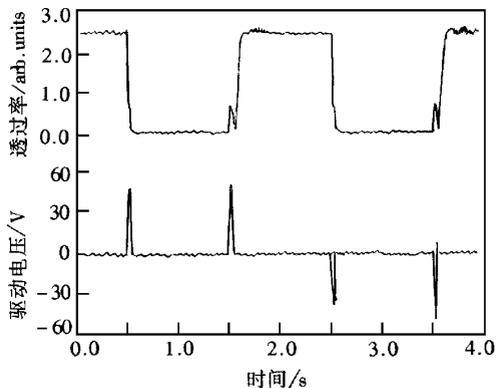
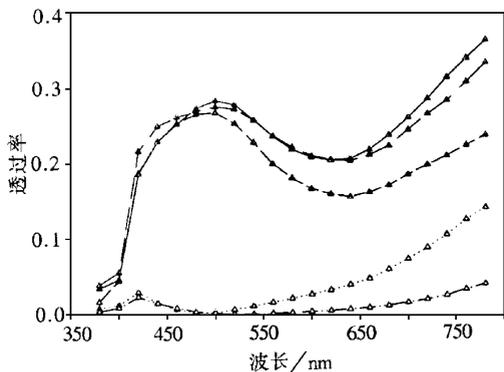


图 5 对应 543.5 nm 激光, $\phi_1 = -120^\circ$ 第 2 模式器件的透过率(上面曲线)与驱动信号(下面曲线)间的关系

图 6 所示为 $\phi_1 = -120^\circ$ BTN 和常白型 TN 器件的光谱透过率.

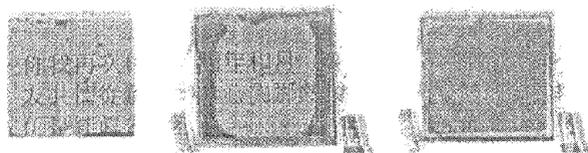


—△—第一模式亮态 ···△···第一模式暗态 —▲—第二模式亮态 —△···第二模式暗态 —△—TN 模式亮态

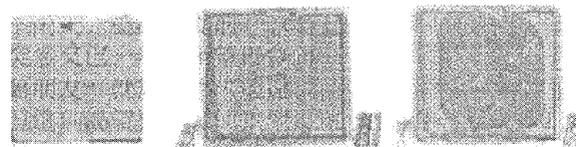
图 6 $\phi_1 = -120^\circ$ BTN-LCD 和 TN-LCD 的光谱透过率

这些实验结果显示第 1 模式的对比度要小于第 2 模式,但亮态透过率要大于第 2 模式.这与图 1 至图 4 所示一致.第 2 模式的对比度接近 60:1,与模拟计算结果相符.但其亮态透过率约 20%,小于计算所得结果(30%).这一方面是因为实际所用偏振片的透视率较低,另一方面是由于受条件所限 $d\Delta n$ 小于期望值.所以,器件性能仍有进一步提高的余地.为验证这一想法,我们使用相同偏振片测试了常白型 TN-LCD 的透视光谱.众所周知这种 TN 器件具有很好的光谱透视性能.从比较结果可见,第一模式的亮态光谱透过率基本与 TN 的一致,甚至稍大

于 TN 的结果.第 2 模式的透过性能稍差一些.依此间接证明此器件的亮态透过率是比较高的,而当采用具有大透过率的偏振片时,其透过率还可得到更大提高.从图中我们还看出这种 BTN-LCD 具有与 TN 器件一致的黑白显示性能.因光源的关系,我们在色坐标测量中没能得到黑白结果.在此我们提供两幅 BTN-LCD 驱动状态与常白型 TN-LCD 的照片(见照片 1 和照片 2).从中可以看出亮态时,第一模式与 TN 器件完全一致,第二模式与 TN 仅略有不同.器件的暗态颜色也都近似于 TN 器件封框处颜色(TN 器件右下脚,肉眼观察为黑色,因不是在自然光下拍摄,照片颜色有偏移).



照片 1 器件显示颜色比较, TN 亮态(左) $\phi_1 = -120^\circ$ 第 1 模式 BTN 亮态(中) BTN 暗态(右)



照片 2 器件显示颜色比较, TN 亮态(左) $\phi_1 = -120^\circ$ 第 2 模式 BTN 亮态(中) BTN 暗态(右)

$\phi_1 = -260^\circ$ 和 $\phi_1 = 60^\circ$ BTN 器件也具有较好的性能. $\phi_1 = -260^\circ$ 容易制作,其 11:1 的对比度已能满足常规应用.而随着对偏振片和 $d\Delta n$ 仔细优化,显示性能还可进一步提高. $\phi_1 = 60^\circ$ 的显示性能、制作难度接近 $\phi_1 = -120^\circ$.但从稳定性考虑,选择 $\phi_1 = -120^\circ$ 更为合适.另外,表 1 中的第 3 点具有非常好的显示性能,虽然它有 $d\Delta n$ 非常小不易制作的缺点,但对某些需要非常高对比度的场合,它是最好的选择.当采用广泛使用的反射偏振片时,这些器件的对比度可得到进一步提高.

5 结 论

本文提出四种可实际应用的非垂直偏振片配置的双稳态扭曲向列相液晶显示模式.这些显示模式大都具有高稳定性,并能提供高对比度和高亮态透

过率.有些甚至可达到扭曲向列相液晶显示器的显示效果,实现黑白显示,而对器件盒厚的要求并不苛刻.这些显示模式性能优于已提出的垂直偏振片配置的其他双稳态向列相液晶显示模式.当采用广泛使用的反射偏振片时,这些器件的对比度可得到进一步提高.

- [1] D. W. Berreman, W. R. Heffner, *J. Appl. Phys.*, **52**(1981), 3032.
 [2] Z. L. Xie, H. S. Kwok, *J. Appl. Phys.*, **84**(1998), 77.
 [3] T. Tanaka, Y. Sato, A. Inoue, Y. Momose, H. Noruma, S. Lino, Proceedings of 15th IDRC (Asia Display '95), Hamamatsu,

(1995), p. 259.

- [4] Z. L. Xie, H. S. Kwok, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**(1998), 2572.
 [5] I. Dozov, M. Nobili, G. Durand, *Appl. Phys. Lett.*, **70**(1997), 1179.
 [6] G. P. Bryan-Brown, C. V. Brown, J. C. Jones, Patent GB 9521106.6 (Oct. 1995).
 [7] P. J. Kedney, F. M. Leslie, *Liquid Crystals*, **24**(1998), 613.
 [8] T. Z. Qian, Z. L. Xie, H. S. Kwok, P. Sheng, *Appl. Phys. Lett.*, **71**(1997), 596.
 [9] V. G. Chigrinov, V. V. Belaev, S. V. Belaev, M. F. Grebenkin, *Sov. Phys. JETP*, **50**(1979), 994.
 [10] H. S. Kwok, *J. Appl. Phys.*, **80**(1996), 3687.
 [11] D. W. Berreman, *J. Opt. Soc. Am.*, **63**(1973), 1374.

Advanced Bistable Twisted Nematic Liquid Displays

GUO JIAN-XIN^{1,2)} KWOK HOI-SING²⁾

¹⁾Changchun Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)

²⁾Center for Display Research, Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Hong Kong)

(Received 10 April 1999; revised manuscript received 9 June 1999)

ABSTRACT

Four new bistable twisted nematic liquid crystal display (BTN-LCD) modes with non crossed polarizers are developed for the first time. Most of them present high contrast ratio and high transmittance with high stability; some display between black and white states, the performance reaches the level of twist nematic liquid crystal display device. They are better than those modes using crossed polarizers presented before.

Keywords: bistable nematic phase liquid crystal display, parameter space

PACC: 6130