

# 第一部分 液晶器件测试技术

## 1. ITO 玻璃

### (1) 方块电阻

方块电阻定义为：

$$R_{\square} = \frac{\rho L_1}{d L_2} \quad (1.1.1)$$

式中， $\rho$  为材料电阻率， $L_1$  为电流流过的长度， $L_2$  为电流宽度， $d$  为材料厚度。

当  $L_1 = L_2$  时，方块电阻公式为

$$R_{\square} = \frac{\rho}{d} \quad (1.1.2)$$

方块电阻的测量：四探针法，探针间距 1mm，

$$R_{\square} = 4.53 \frac{U}{I} \quad (1.1.3)$$

### (2) 透过率

反射率与透射率公式

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad T = 1 - R \quad (1.1.4)$$

但 ITO 膜层厚度远小于波长，反射率不由上式计算。

用紫外可见光分光光度计测试透过率。

## 2. 偏振片

单片透过率  $T_s$ ，双平行偏振片透过率  $T_{\parallel}$ ，双垂直偏振片透过率  $T_{\perp}$ ，偏振度定义

$$P = \frac{T_{\parallel} - T_{\perp}}{T_{\parallel} + T_{\perp}} \times 100\% \quad (1.2.1)$$

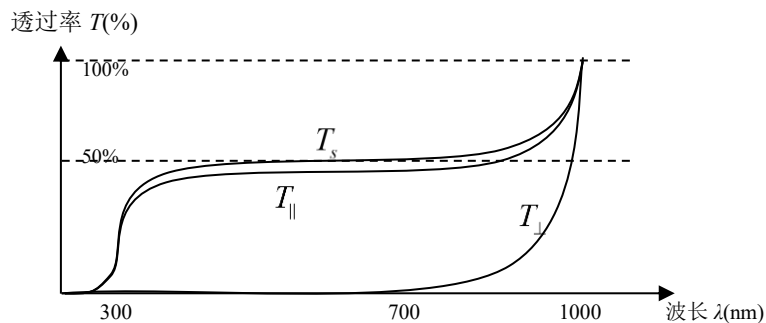


图 1 偏振片透过率与光波长曲线

测量装置示意图

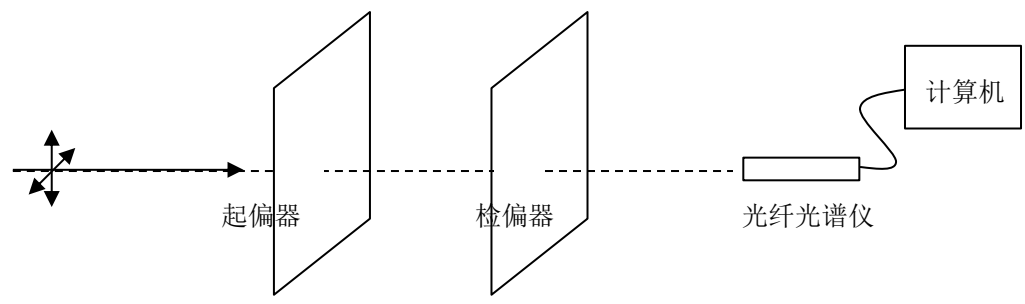


图 2 偏振片透过率测量

3. 膜层厚度测量

(1) 膜层厚度的测量方法

不透明/透明膜层：表面轮廓仪、原子力显微镜、台阶仪

透明膜层：干涉原理

(2) 干涉原理测量法

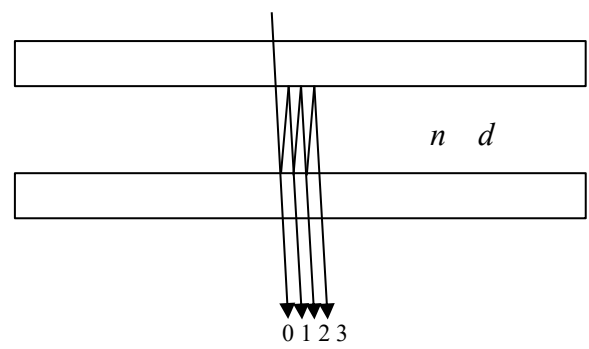


图 3 干涉法测量原理

透射光中，透射光 0 与 1 发生干涉（膜内更多次的反射光光强很小可忽略），出现增强或削减，

$$2nd = \begin{cases} m\lambda, & \text{干涉相长} \\ (2m+1)\frac{\lambda}{2}, & \text{干涉相消} \end{cases} \quad (1.3.1)$$

测得的波长—光强曲线：

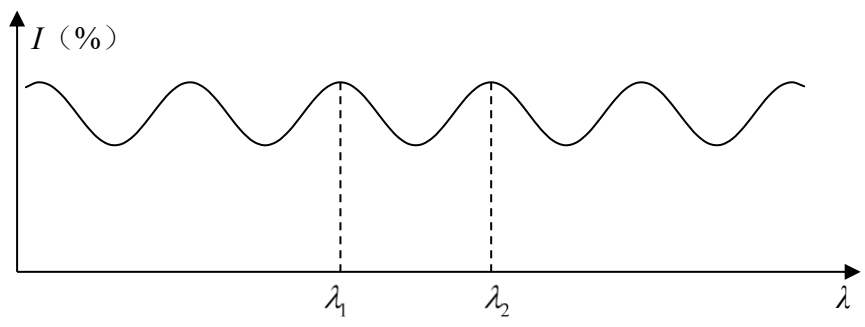


图 4 波长—透射光强

已知折射率  $n$ ，那么膜层厚度为

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2n|\lambda_1 - \lambda_2|} \quad (1.3.2)$$

#### 4. LCD 电光特性

##### (1) 电压—透过率曲线

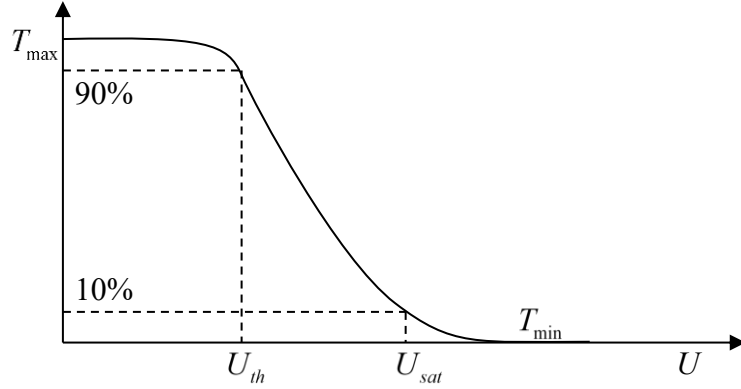


图 5 电压—透过率曲线

其中， $U_{th}$  为阈值电压，定义为显示亮度的变化达到最大变化量的 10% 时的驱动电压；

$U_{sat}$  为饱和电压，定义为显示亮度的变化达到最大变化量的 90% 时的驱动电压。

对比度的定义为亮态透光率与暗态透光率的比值，

$$C_r = \frac{T_{\max}}{T_{\min}} \quad (1.4.1)$$

##### (2) 响应时间

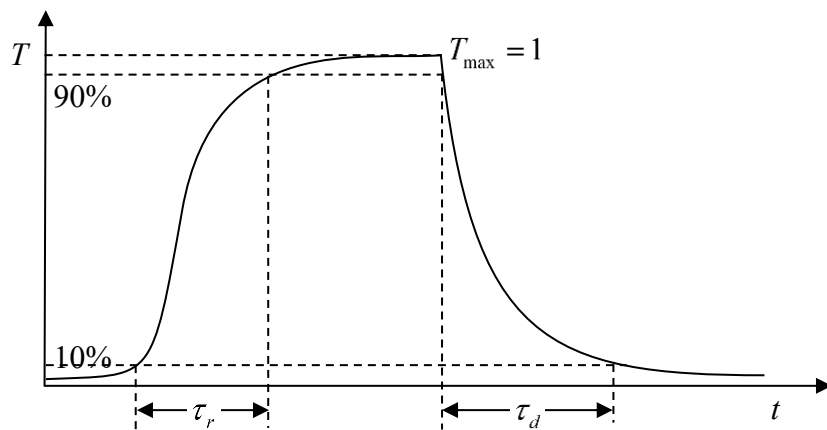


图 6 时间—透过率曲线

上升时间  $\tau_r$ ：电光信号从稳定值的 10% 变化到 90% 的时间间隔。

下降时间  $\tau_d$ ：电光信号从稳定值的 90% 变化到 10% 的时间间隔。

### (3) 对比度视角图描述

使用极角  $\theta$  和方位角  $\varphi$  来描述视角，描述最优视角范围、对比度随视角变化。

### (4) 颜色

三基色：红（630nm，610~650nm），绿（530nm），蓝（450nm，430~470nm）

色域：显示器能够显示的颜色范围。

## 5. 电控双折射

### (1) 原理

o 光和 e 光只有在液晶中有不同的折射率，传播相位不同，出射时有相位差

$$\delta = \frac{2\pi}{d}(n_e - n_o) \quad (1.5.1)$$

当液晶取向与  $xy$  平面夹角为  $\theta$ （电场可控制）时，e 光折射率为

$$n_e = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta + n_o^2 \cos^2 \theta}} \quad (1.5.2)$$

而 o 光折射率不变。所以，电场可以控制双折射的变化。

### (2) 透过率

在正交偏振片之间放置的晶体（均匀液晶），如图所示

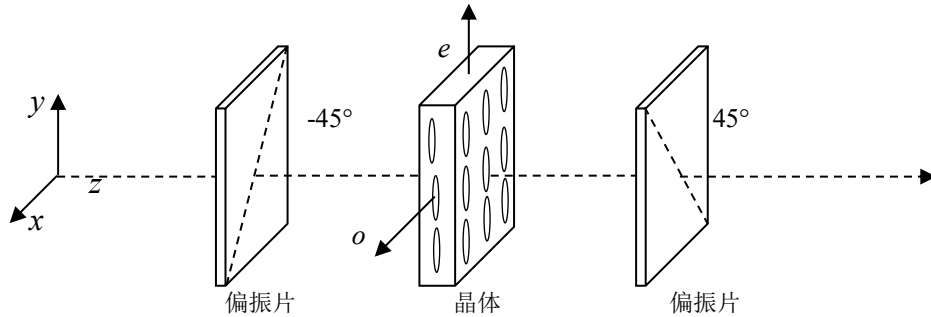


图 7 正交偏振片中双折射透过率

透过率为

$$T = \sin^2(2\varphi) \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (1.5.3)$$

式中， $\varphi$  入射到晶体中的光的偏振方向与 e 轴（液晶长轴）的夹角； $\delta$  为晶体引起的 o 光与 e 光的相位差，由(1.5.1)式计算。在其他条件不变时， $\varphi = 45^\circ$  时透过率最大。

### (3) 电控双折射的液晶盒

平行排列盒（PAN）、垂面排列盒（VAN）、混合排列盒（HAN）、弯曲排列盒（OCB）、聚合物稳定蓝相液晶、聚合物稳定各向同性相液晶。

## 6. 预倾角

### (1) 预倾角的作用

若初始倾角  $= 0$ ，液晶在外场作用下向左和向右倾斜竖起的概率相同；若初始倾角  $\neq 0$ ，

外场作用下的液晶有优先倾斜方向，阻止反方向的倾斜，从而防止形成反倾斜畴。

## (2) 预倾角的测量

使用晶体旋转法，预倾角应在旋转平面内，与偏振片构成电控双折射，测量装置如图所示。

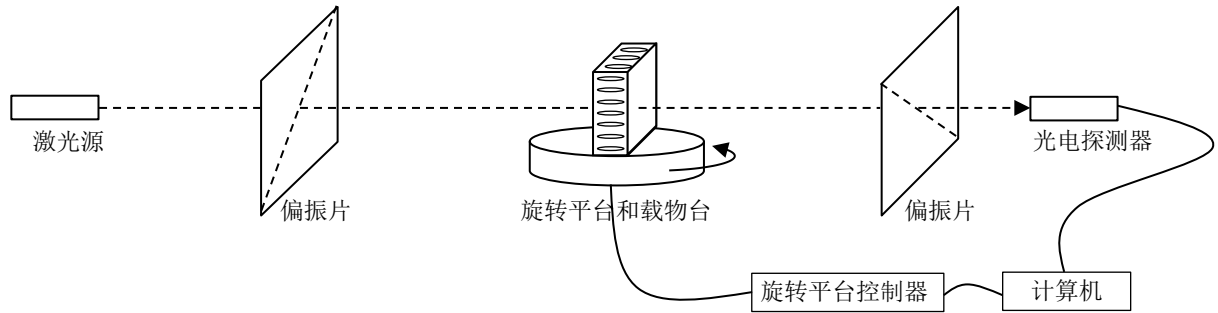


图 8 晶体旋转法

测量得到透过率—入射角（ $T-\psi$ ）曲线，找到曲线图形的对称轴对应的  $\psi$ ，代入计算预倾角的公式，可以得到预倾角  $\theta_p$ 。

## 7. 锚定能在 LCD 中的影响

表面锚定能会影响：阈值电压、响应时间。

$$U_{th}^{弱} = \frac{d}{d + 2\xi} U_{th}^{强} \quad (1.7.1)$$

$$\tau_{th}^{弱} = \frac{\gamma_1}{\pi^2 K} (d + 2\xi^2) \quad (1.7.2)$$

式中， $d$  为液晶盒厚度， $\gamma_1$  是转动粘滞系数， $K$  为弹性常数， $\xi$  为外推长度，是弱锚定看做强锚定时液晶盒的边界向外扩展长度，如下图所示，

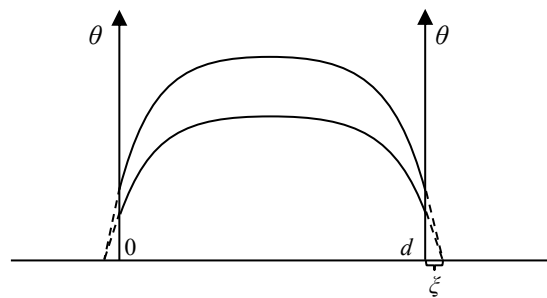


图 9 外推长度

$\xi$  与锚定能存在关系

$$\xi = \frac{K}{W} \quad (1.7.3)$$

## 8. 胆甾相液晶的 Bragg 反射

测得的胆甾相液晶布拉格反射  $R-\lambda$  曲线如图所示，

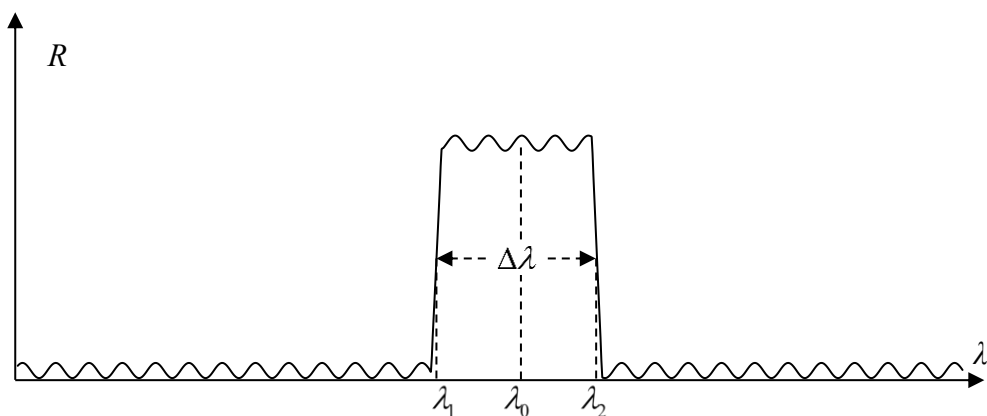


图 10 布拉格反射

布拉格反射的中心波长

$$\lambda_0 = \frac{n_e + n_o}{2} P \quad (1.7.4)$$

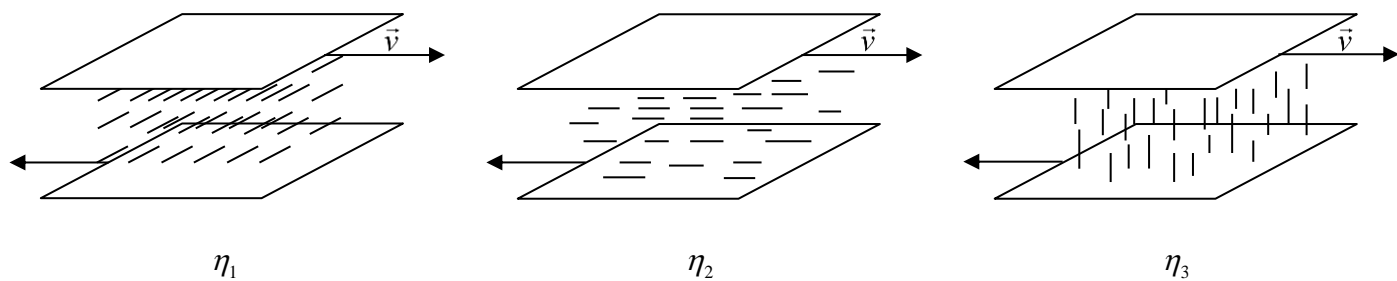
半高峰宽

$$\Delta\lambda = \Delta n P \quad (1.7.5)$$

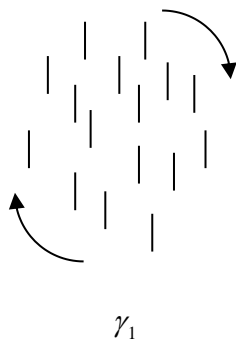
式中,  $P$  为胆甾相液晶的螺距, 定义为液晶分子旋转  $360^\circ$  所需的长度。

## 9. Miesowicz 粘滞系数

(1) 三个平动粘滞系数  $\eta_1 \eta_2 \eta_3$



(2) 转动粘滞系数  $\gamma_1$



## 10. 电容电压法测液晶参数

电容电压法测量液晶介电常数  $\epsilon_{\parallel} \epsilon_{\perp}$ 、弹性常数  $k_{11} k_{22} k_{33}$  步骤:

(1) 测量空盒电容  $C_{\text{盒}}$ 。

(2) 灌注液晶，测量液晶盒的电容随电压的变化。正性液晶  $\Delta\varepsilon > 0$ ，使用 PAN 盒测量  $\varepsilon_{\perp}$ ，要求预倾角趋于  $0^{\circ}$ ；负性液晶  $\Delta\varepsilon < 0$ ，使用 VAN 盒测量  $\varepsilon$  要求预倾角趋于  $90^{\circ}$ 。

(3) 测量结果处理

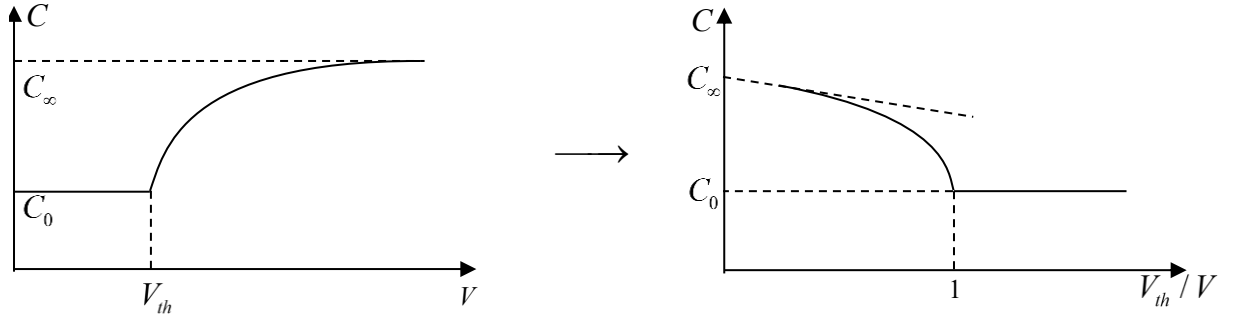


图 11 测量结果示意图

(4) 计算液晶参数

从图中可以得到阈值电压  $V_{th}$ 、液晶盒的电容  $C_0$ 、电压趋于无穷时的电容  $C_{\infty}$ 、外延直线的斜率。对于 PAN 盒，

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{C_0}{C_{\text{盒}}} \quad \varepsilon_{\parallel} = \frac{C_{\infty}}{C_{\text{盒}}} \quad \Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp} \quad (1.10.1)$$

$$V_{th} = \pi \sqrt{\frac{k_{11}}{\varepsilon_0 \Delta\varepsilon}} \Rightarrow k_{11} \quad (1.10.2)$$

再根据斜率和以上参数，代入相关公式可以得到  $k_{33}$ 。对于 VAN 盒，

$$\varepsilon_{\parallel} = \frac{C_0}{C_{\text{盒}}} \quad \varepsilon_{\perp} = \frac{C_{\infty}}{C_{\text{盒}}} \quad \Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp} \quad (1.10.3)$$

$$V_{th} = \pi \sqrt{\frac{k_{33}}{\varepsilon_0 \Delta\varepsilon}} \Rightarrow k_{33} \quad (1.10.4)$$

再根据斜率和以上参数，代入相关公式可以得到  $k_{11}$ 。

另使用 TN 盒，测量阈值电压  $V_{th}$ ，代入已知参数可以得到  $k_{22}$

$$V_{th} = \pi \sqrt{\frac{k_{11} + \frac{1}{4}(k_{33} - 2k_{22})}{\epsilon_0 \Delta \epsilon}} \Rightarrow k_{22} \quad (1.10.5)$$

## 11. 测量液晶双折射率

使用阿贝折射仪测量液晶双折射率。使用 VAN 或 PAN 盒测量  $n_e$ ,  $n_o$ 。以 VAN 盒为例，原理图：

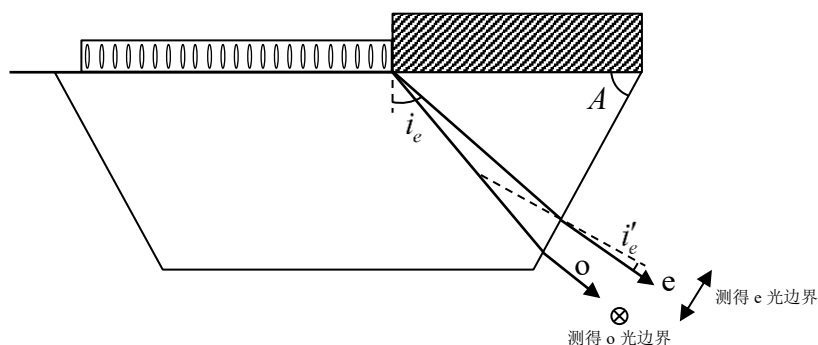


图 12 阿贝折射仪测量折射率

$$\begin{cases} n_{e,o} \sin \frac{\pi}{2} = n_g \sin i_{e,o} \\ n_g \sin(A - i_{e,o}) = n_{\text{空气}} \sin i'_{e,o} \end{cases} \Rightarrow n_{e,o} = \sin A \sqrt{n_g^2 - \sin^2 i'_{e,o}} - \cos A \sin i' \quad (1.11.1)$$

如图中所示，用不同方向的偏振片选择 o 光或 e 光显示的边界，从阿贝折射仪中读数可得到相应的折射率  $n_o, n_e$ 。

## 12. 液晶相变温度的测量

用差示扫描量热法测量液晶的相变温度，装置示意图：

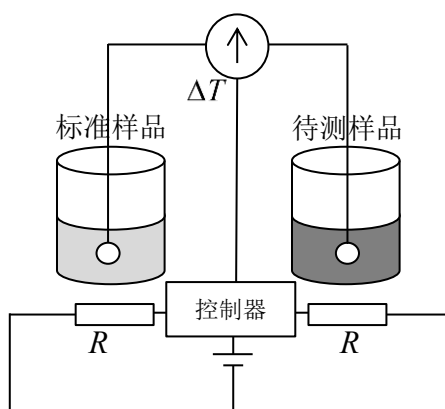


图 13 差示扫描量热法

其中标准样品在温度范围内不发生相变。由热电偶和控制器控制两侧温度  $T$  相同，测量两侧吸收的热量差  $\Delta Q$ ，作出热量差—热电偶温度图像。出现  $\Delta Q$  峰值的  $T$  就是相变温度，相变温度处的热量差就是相变焓。液晶熔点记为熔点  $T_m$ ，清亮点记为  $T_c$ 。



## 第二部分 液晶器件原理

### 1. 阈值电压和电光特性

#### (1) 阈值电压

显示模式	阈值电压	预倾角条件
PAN	$U_{th} = \pi \sqrt{\frac{k_{11}}{\varepsilon_0  \Delta\varepsilon }}$	$\theta_p = 0$
VAN	$U_{th} = \pi \sqrt{\frac{k_{33}}{\varepsilon_0  \Delta\varepsilon }}$	$\theta_p = 90^\circ$
TN	$U_{th} = \pi \sqrt{\frac{k_{11} + \frac{1}{4}(k_{33} - 2k_{22})}{\varepsilon_0  \Delta\varepsilon }}$	$\theta_p = 0$
IPS	$U_{th} = \frac{\pi L}{d} \sqrt{\frac{k_{22}}{\varepsilon_0  \Delta\varepsilon }}$	$\varphi_p = 0$

#### (2) 电光特性

显示模式	电压条件	透过率
PAN	高电压，正交偏光片	$T \rightarrow 0$
VAN	0 电压，正交偏光片	$T \rightarrow 0$ （所有波长）
TN	0 电压正交偏光片 高电压，正交偏光片	$T$ 最大 $T \rightarrow 0$
IPS	0 电压，正交偏光片	$T \rightarrow 0$ （所有波长） 所有波长可同时达到最大

### 2. 液晶器件的动力学响应

动力学方程的求解：分离变量法、猜测解代入方程求解。

#### (1) 动力学方程

$$(k_{11} \cos^2 \theta + k_{33} \sin^2 \theta) \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + (k_{33} - k_{11}) \sin \theta \cos \theta \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 + (\alpha_2 \sin^2 \theta - \alpha_3 \cos^2 \theta) \frac{\partial V}{\partial z} + \varepsilon_0 \Delta \varepsilon E^2 \sin \theta \cos \theta = I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \gamma_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.2.1)$$

在低电场下，流动效应相和惯性相可忽略。应用小角度近似，且  $k_{11} = k_{33}$ ，

$$k \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \varepsilon_0 \Delta \varepsilon E^2 \theta = \gamma_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.2.2)$$

对于 VAN 盒使用  $k_{33}$ ，对于 PAN 盒使用  $k_{11}$ 。

## (2) 动力学方程求解下降时间

对于 VAN 盒，倾角为液晶指向矢与基板法线之间的夹角。在撤去电场时，求解指向矢下降时间，动力学方程和边界条件为

$$\begin{cases} k_{33} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - \gamma_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \\ \theta(0, t) = 0 \quad \theta(d, t) = 0 \\ \theta\left(\frac{d}{2}, 0\right) = \theta_m \quad \theta\left(\frac{d}{2}, \infty\right) = 0 \end{cases} \quad (2.2.3)$$

分离变量法求解，令

$$\theta(z, t) = Z(z)T(t) \quad (2.2.4)$$

代入动力学方程得

$$\frac{\gamma_1}{k_{33}} \frac{T'(t)}{T(t)} = \frac{Z''(z)}{Z(z)} = C \quad (2.2.5)$$

①若  $C = 0$ ，则方程  $Z''(z) - Z(z) = 0$  通解为

$$Z = Az + B \quad (2.2.6)$$

代入边界条件，得到  $A = B = 0$ ， $Z(z) = 0$ ， $\theta(z, t) = 0$ ，不合理。

②若  $C > 0$ ，令  $C = k^2$ ，则方程  $Z''(z) - k^2 Z(z) = 0$  的通解为

$$Z = Ae^{kz} + Be^{-kz} \quad (2.2.7)$$

代入边界条件，得到  $A = B = 0$ ， $Z(z) = 0$ ， $\theta(z, t) = 0$ ，不合理。

③若  $C < 0$ ，令  $C = -k^2$ ，则方程  $Z''(z) + k^2 Z(z) = 0$  的通解为

$$Z = A \cos kz + B \sin kz \quad (2.2.8)$$

代入边界条件，得到

$$A=0 \quad k=\frac{\pi}{d} \quad B \neq 0 \quad (2.2.9)$$

将  $C=-k^2$  代入时间的方程， $T'(t)+\frac{\pi^2 k_{33}}{d^2 \gamma_1} T(t)=0$ ，其通解为

$$T(t)=A_1 \exp\left(-t / \frac{d^2 \gamma_1}{\pi^2 k_{33}}\right) \quad (2.2.10)$$

那么

$$\theta(z,t)=A_1 \sin\left(\frac{\pi z}{d}\right) \exp\left(-t / \frac{d^2 \gamma_1}{\pi^2 k_{33}}\right) \quad (2.2.11)$$

代入时间的边界条件，解得

$$\theta(z,t)=\theta_m \sin\left(\frac{\pi z}{d}\right) \exp\left(-t / \frac{d^2 \gamma_1}{\pi^2 k_{33}}\right) \quad (2.2.12)$$

### (3) 下降时间

根据  $\theta(z,t)$  的解的形式，定义

$$\tau_d = \frac{d^2 \gamma_1}{\pi^2 k_{33}} \quad (2.2.13)$$

此即为 VAN 盒液晶指向矢下降时间。

### (4) IPS 下降时间

假定上下表面为强锚定，表面处液晶分子的方位角固定为  $\Phi$ ，动力学方程与边界条件为

$$\begin{cases} k_{22} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - \gamma \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0 \\ \varphi(0,t) = \varphi(d,t) = \Phi \\ \varphi\left(\frac{d}{2}, 0\right) = \varphi_m \end{cases} \quad (2.2.14)$$

假定液晶分子的变化为如下形式：

$$\varphi(z,t) = \Phi + (\varphi_m - \Phi) \sin\left(\frac{\pi z}{d}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (2.2.15)$$

代入动力学方程(2.2.14)，

$$-k_{22}(\varphi_m - \Phi) \frac{\pi^2}{d^2} \sin\left(\frac{\pi z}{d}\right) e^{-\frac{t}{\tau_d}} + \frac{\gamma}{\tau_d} (\varphi_m - \Phi) \sin\left(\frac{\pi z}{d}\right) e^{-\frac{t}{\tau_d}} = 0$$

化简求得指向矢下降时间

$$\tau_d = \frac{d^2 \gamma}{\pi^2 k_{22}} \quad (2.2.16)$$

(5) MVA 与 IPS 显示模式光学相应时间的比较

MVA 显示模式，VAN 盒光学下降时间  $\tau_{optical}$  与指向矢下降时间  $\tau_0$  的关系大致为

$$\tau_{optical} \approx \frac{\tau_0}{2} \ln 3 \approx 0.549 \tau_0 = \frac{0.549 d^2 \gamma}{\pi^2 k_{33}} \quad (2.2.17)$$

IPS 显示模式，光学下降时间  $\tau_{optical}$  与指向矢下降时间  $\tau_0$  的关系大致为

$$\tau_{optical} \approx \tau_0 \ln 3 \approx 1.1 \tau_0 = \frac{1.1 d^2 \gamma}{\pi^2 k_{22}} \quad (2.2.18)$$

而一般液晶材料的弹性常数大致存在关系

$$k_{11} : k_{22} : k_{33} \approx 2 : 1 : 3.2$$

故通常 MVA 显示模式的光学响应时间要小于 IPS 显示模式。

### 3. 液晶显示器的光效率

影响液晶显示器光效率的因素有哪些？

- ①背光模组，包括两片亮度增强膜、DBEF 膜、散射膜。
- ②入射偏光片，光利用率在 40%左右。
- ③TFT 阵列开口率，开口率定义为

$$AP = \frac{\text{透光面积}}{\text{液晶面板面积}} \quad (2.3.1)$$

- ④液晶显示模式，最大透光率  $T_{\max}$  分别约为：80%（MVA）、90%（IPS）、95%（TN）。

⑤彩膜，光利用效率最大约为 25%。对于场序彩色模式，使用 RGB 彩色背光源，光利用率可以达到 100%。

- ⑥出射偏光片，光利用率在 90%左右。

- ⑦其他结构如 ITO、补偿膜、玻璃对光效率的影响可忽略不计。

### 4. TN-LCD

常白模式与常黑模式的 TN-LCD 的差别？

(1) 结构上的差别

常白模式的上下偏光片正交设置，常黑模式的上下偏光片平行设置。

## (2) 电光性能上的差别

常白模式的 TN-LCD，在高电压时对所有波长的光都不透过，有数百的对比度；常黑模式的 TN-LCD，在零电压时并不是对所有波长的光透射趋于零，只有十几的对比度。

## (3) 视角的差别

不考。

## (4) 灰度反转是什么？

灰度反转指的是在大视角观察时，低灰度的亮度比高灰度的亮度大。

# 5. MVA-LCD

(1) MVA-LCD 的发展变化过程，以及在变化中改进了那些性能？

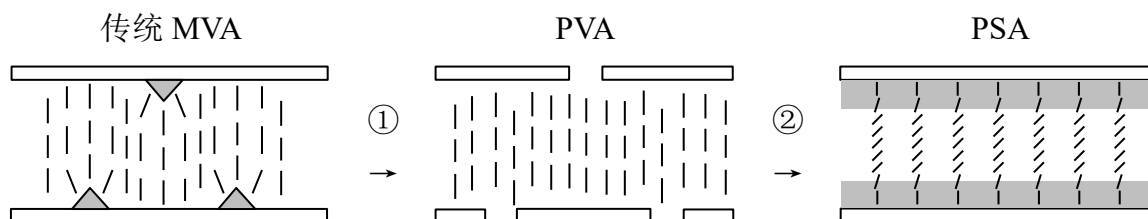


图 14 MVA-LCD 结构示意图

改进：

①降低了暗态漏光，提高了对比度；

②提高了亮态透过率，提高了响应速度。

(2) 4 畴结构改进为 8 畴结构的作用与原因？

作用：降低了 Gamma 偏移、降低了色偏移。

原因：4 畴结构在不同视角观察液晶指向矢时表现的平均效果不同，亮度有差异，从而产生色彩冲刷现象，8 畴结构可降低此问题。8 畴结构中的液晶分子在电场作用下的转向比 4 畴结构在各个方向上更均匀、更丰富，因此不同视角下可以观察到更均匀稳定的图像。

# 6. IPS 与 FFS 显示模式

(1) IPS 与 FFS 器件结构

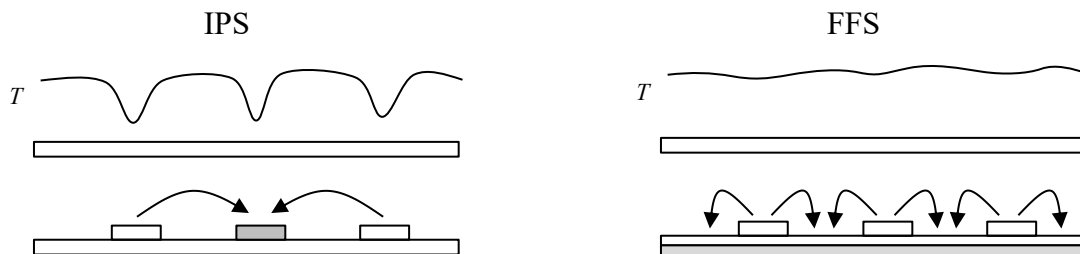


图 15 IPS 与 FFS 器件结构与透过率分布示意图

电极宽度为  $w$ ，电极间距为  $g$ ，液晶盒厚度  $d$ ，

IPS:  $w = d, g = 2d$

FFS:  $w \approx g < d$ ，绝缘层厚度  $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 。

## (2) IPS 与 FFS 像素结构图

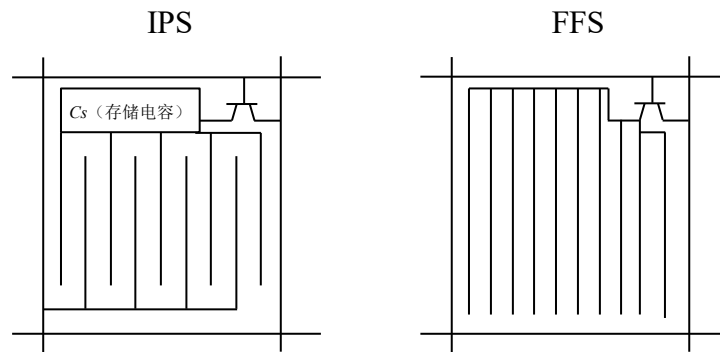


图 16 IPS 与 FFS 像素结构示意图

## (3) IPS/FFS 对比 MVA 模式

- ①透过率更高;
- ②Gamma 偏移和色偏移都更小;
- ③对压触不敏感。

## 7. 无偏光片 LCD

### (1) 吸收型宾主显示模式 LCD

不考。

### (2) 散射型 PDLC 与 PSLC 的差别和性能

#### ①差别:

**PDLC:** 使用聚合物分散液晶, 聚合物使液晶形成微滴, 不加电场时不均匀排列, 对入射光散射, 呈雾态; 加电场时, 液晶分子排列一致, 没有散射, 呈透明态。

**PSLC:** 使用聚合物稳定液晶, 聚合物在液晶层中形成丝线网络结构, 不加电场时液晶分子均匀排列, 呈透明态; 加电场时, 液晶受到聚合物网络作用而取向不均匀, 使入射光散射, 呈雾态。

②性能: PDLC 模式的驱动电压更高, PSLC 模式的驱动电压更低; PDLC 器件的透明态仅在小角度内呈透明, 大角度观看时仍存在散射, PSLC 的透明态在大角度内都可呈透明。