

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：

$$R_{\square} = \frac{\rho L_1}{dL_2} \quad (1.1.1)$$

式中， ρ 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

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

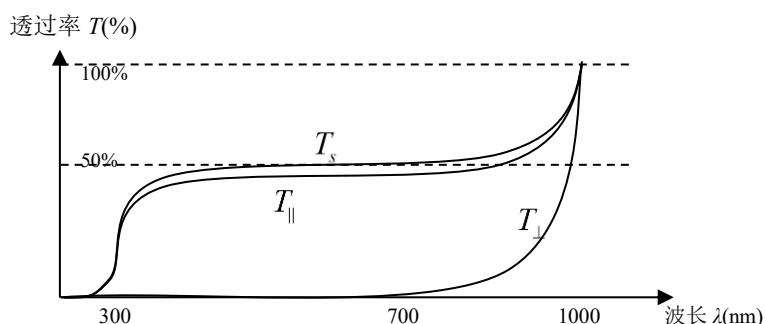


图 1 偏振片透过率与光波长曲线

测量装置示意图

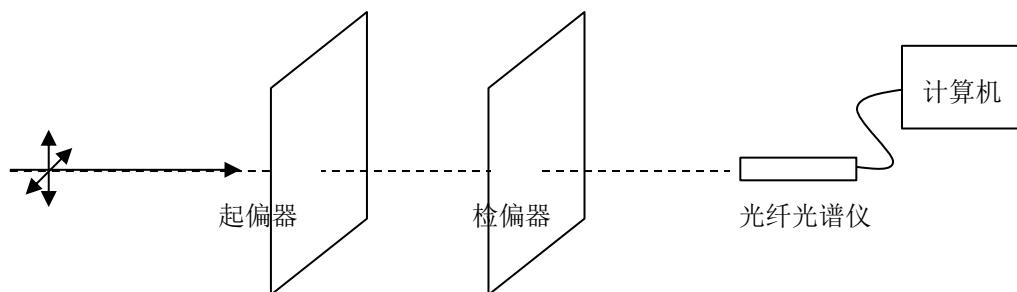


图 2 偏振片透过率测量

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

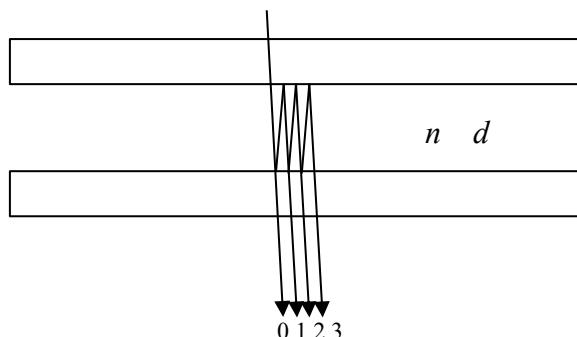


图 3 干涉法测量原理

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：

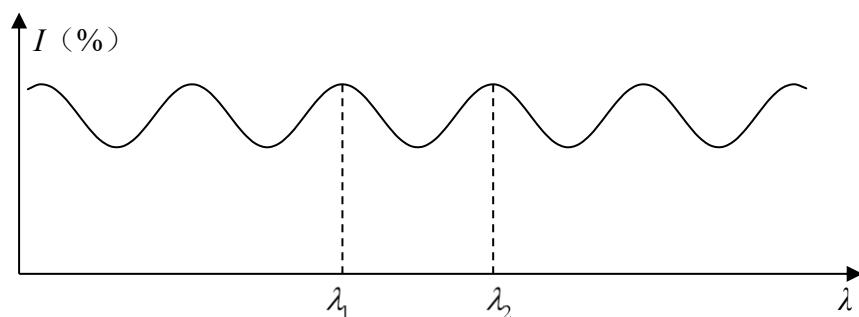


图 4 波长—透射光强

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

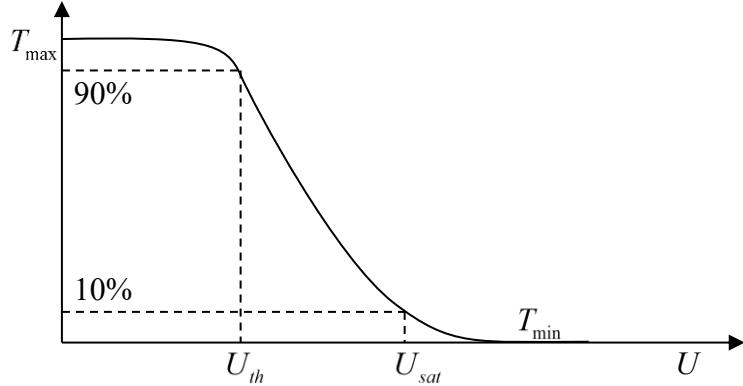


图 5 电压—透过率曲线

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

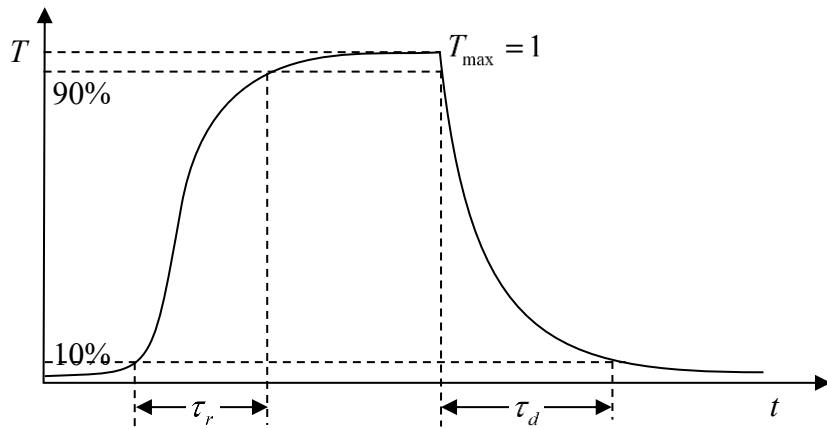


图 6 时间—透过率曲线

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

下降时间 τ_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 θ 和方位角 φ 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的范围。

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 θ （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

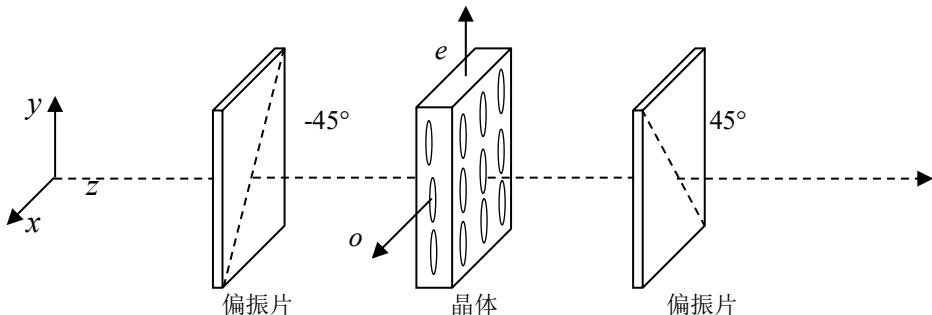


图 7 正交偏振片中双折射透过率

透过率为

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

式中， φ 入射到晶体中的光的偏振方向与 e 轴（液晶长轴）的夹角； δ 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。

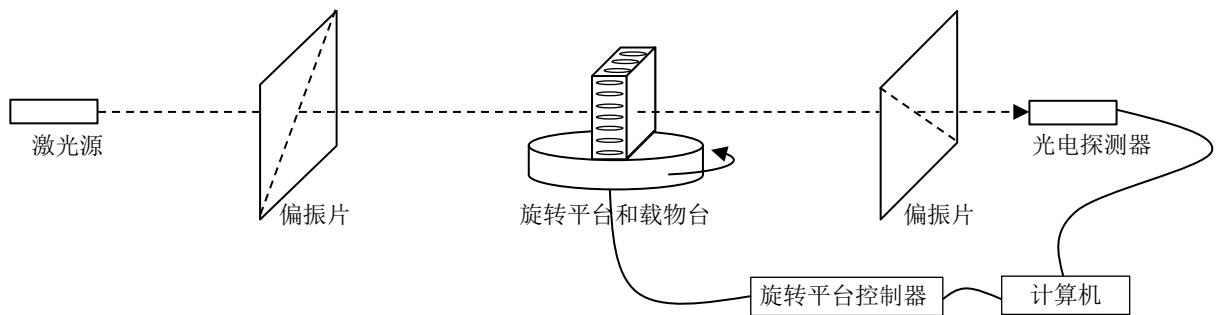


图 8 晶体旋转法

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 ψ ，代入计算预倾角的公式，可以得到预倾角 θ_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。

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

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

式中， d 为液晶盒厚度， γ_1 是转动粘滞系数， K 为弹性常数， ξ 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，

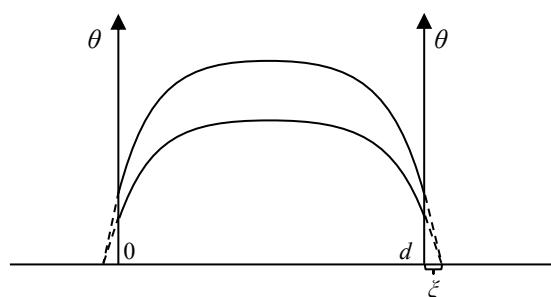


图 9 外推长度

ξ 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，

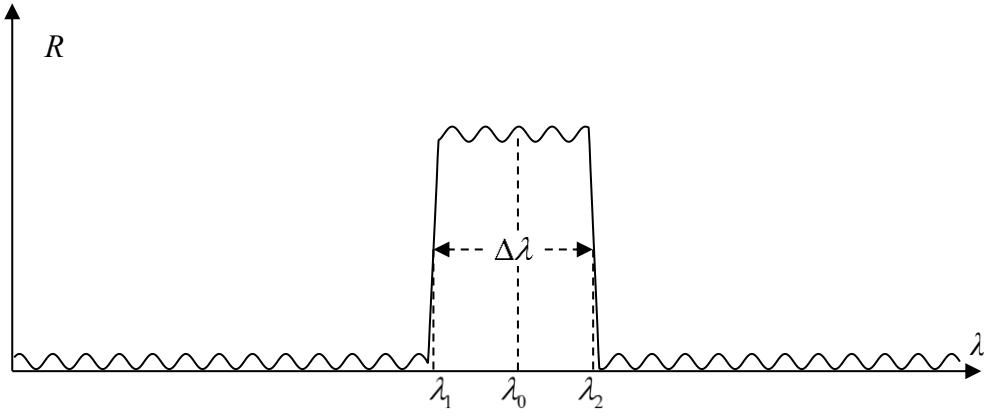


图 10 布拉格反射

布拉格反射的中心波长

$$\lambda_0 = \frac{n_e + n_0}{2} P \quad (1.7.4)$$

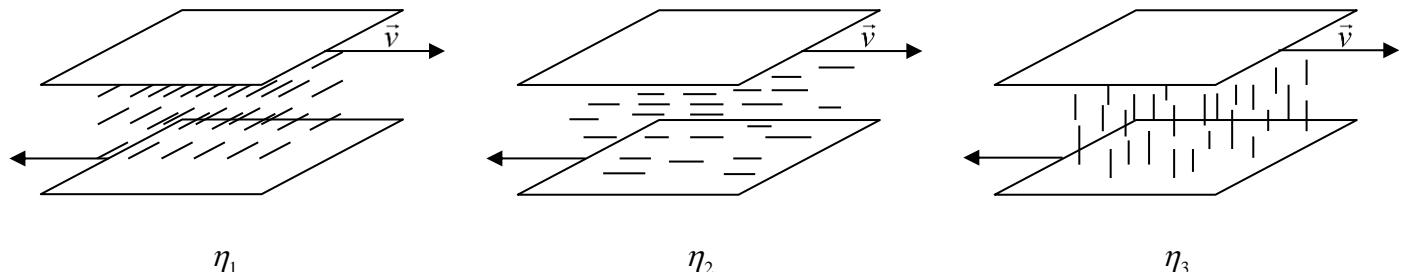
半高峰宽

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

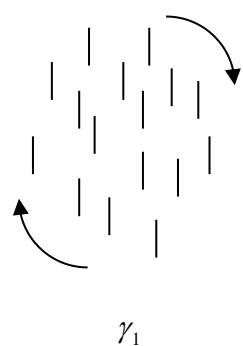
式中， P 为胆甾相液晶的螺距，定义为液晶分子旋转 360° 所需的长度。

9. Miesowicz 粘滞系数

(1) 三个平动粘滞系数 η_1, η_2, η_3



(2) 转动粘滞系数 γ_1



γ_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 $\epsilon_{||}, \epsilon_{\perp}$ 、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 $\Delta\epsilon > 0$ ，使用 PAN 盒测量 ϵ_{\perp} ，要求预倾角趋于 0° ；负性液晶 $\Delta\epsilon < 0$ ，使用 VAN 盒测量 ϵ ，要求预倾角趋于 90° 。

(3) 测量结果处理

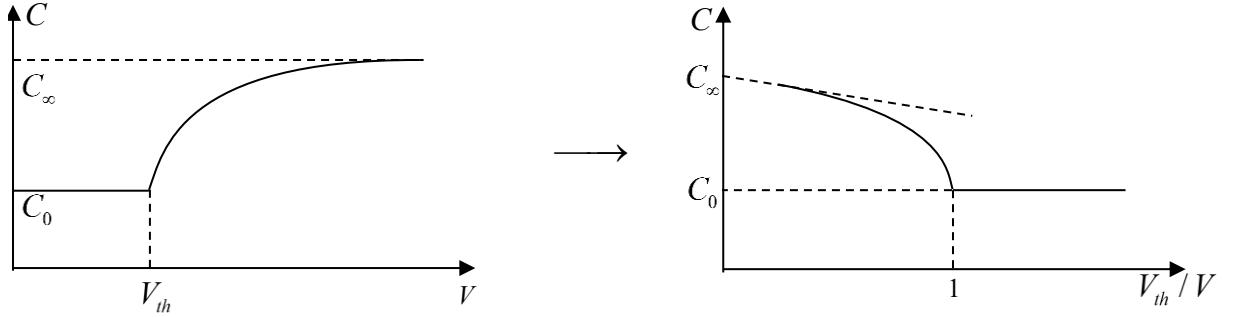


图 11 测量结果示意图

(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_{∞} 、外延直线的斜率。对于 PAN 盒，

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

$$V_{th} = \pi \sqrt{\frac{k_{11}}{\epsilon_0 \Delta\epsilon}} \Rightarrow k_{11} \quad (1.10.2)$$

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，

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

$$V_{th} = \pi \sqrt{\frac{k_{33}}{\epsilon_0 \Delta\epsilon}} \Rightarrow k_{33} \quad (1.10.4)$$

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}

$$V_{th} = \pi \sqrt{\frac{k_{11} + \frac{1}{4}(k_{33} - 2k_{22})}{\varepsilon_0 \Delta \varepsilon}} \Rightarrow k_{22} \quad (1.10.5)$$

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:

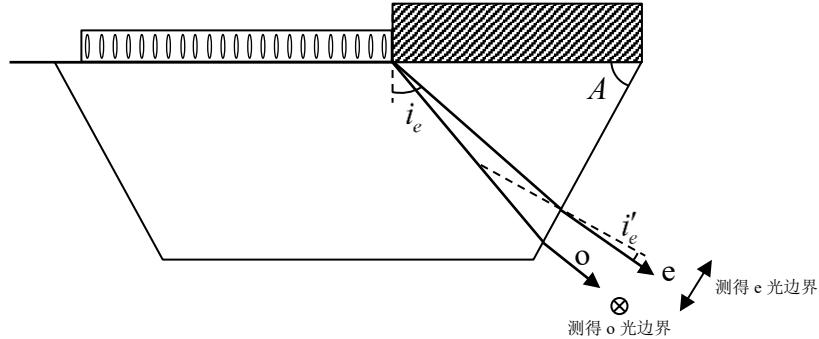


图 12 阿贝折射仪测量折射率

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

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:

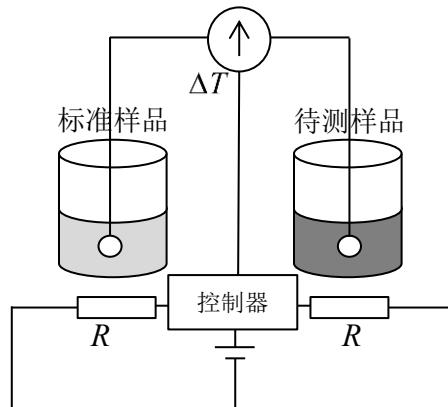


图 13 差示扫描量热法

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 ΔQ , 作出热量差—热电偶温度图像。出现 ΔQ 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	$U_{th} = \pi \sqrt{\frac{k_{11}}{\epsilon_0 \Delta\epsilon }}$	$\theta_p = 0$
VAN	$U_{th} = \pi \sqrt{\frac{k_{33}}{\epsilon_0 \Delta\epsilon }}$	$\theta_p = 90^\circ$
TN	$U_{th} = \pi \sqrt{\frac{k_{11} + \frac{1}{4}(k_{33} - 2k_{22})}{\epsilon_0 \Delta\epsilon }}$	$\theta_p = 0$
IPS	$U_{th} = \frac{\pi L}{d} \sqrt{\frac{k_{22}}{\epsilon_0 \Delta\epsilon }}$	$\varphi_p = 0$

(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

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

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 $Z''(z)-k^2Z(z)=0$ 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 $Z''(z)+k^2Z(z)=0$ 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 Φ ，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 τ_0 的关系大致为

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

IPS 显示模式, 光学下降时间 $\tau_{optical}$ 与指向矢下降时间 τ_0 的关系大致为

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

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？

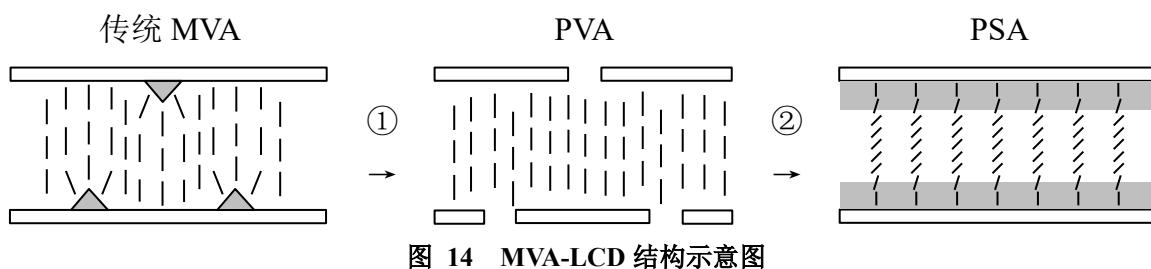


图 14 MVA-LCD 结构示意图

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 眇结构改进为 8 眇结构的作用与原因？

作用：降低了 Gamma 偏移、降低了色偏移。

原因：4 眇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 眇结构可降低此问题。8 眇结构中的液晶分子在电场作用下的转向比 4 眇结构在各个方向上更均匀、更丰富，因此在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

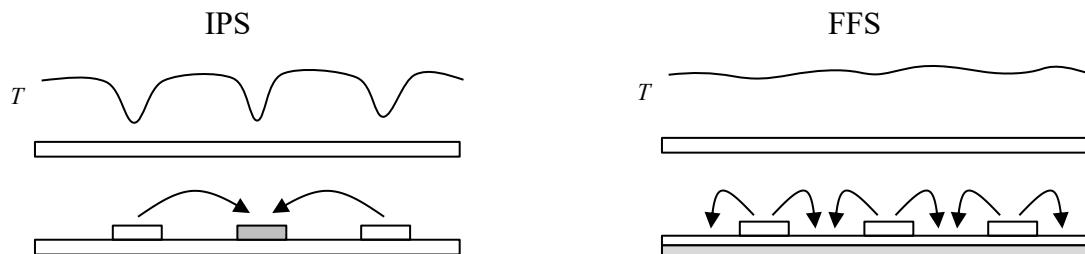


图 15 IPS 与 FFS 器件结构与透过率分布示意图

电极宽度为 w ，电极间距为 g ，液晶盒厚度 d ，

$$\text{IPS: } w = d, \quad g = 2d$$

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

(2) IPS 与 FFS 像素结构图

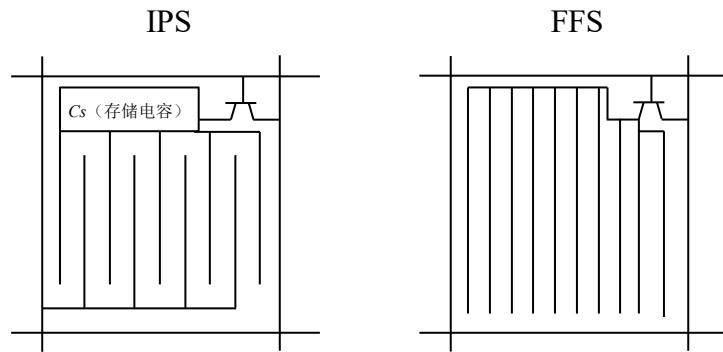


图 16 IPS 与 FFS 像素结构示意图

(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。