

第 1 章

了解 TFT LCD

1.1 了解显示器^①

1.1.1 像素(pixel, 即 picture element)

一个显示画面系由像素组合而成,基本上,每个像素的大小和形状是完全一样的,画面所包含的像素愈多,所呈现的画面会愈精致,如图 1.1(a)所示的@字元是由 24×27 个像素组成的,若将其每个像素再细分为 2×2 ,则可以 48×54 个像素显示出如图 1.1(b)所示较为精细的字形,或是如图 1.1(c)显示出 4 个@字元。

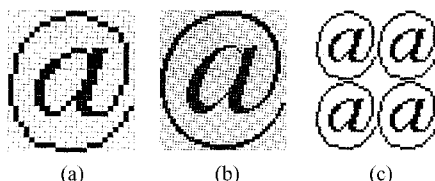


图 1.1

(a) 24×27 个像素组成一个@字元; (b) 48×54 个像素组成一个@字元;

(c) 48×54 个像素组成四个@字元

像素的精致程度是显示器的第一项重要特征,它与观察距离、画面尺寸、像素

① 本章内容涉及一些视觉理论的概念,欲进一步了解,可参考: *Vision*, by Pierre Buser and Michel Imbert (translated by R. H. Kay), ISBN 0-262-02336-9。

大小和像素数目相关,详细说明如下。

1.1.1.1 观察距离

如图 1.2 所示,较小的画面尺寸,在观察者距离接近画面时,可以给人眼在远距离观察大尺寸画面相同的感觉,但相对地,像素大小也要等比例地跟着缩小,这也是影响观看感觉的重要因素,然而,观察距离随着使用者习惯而不同,一般而言并不会特别加以定义。

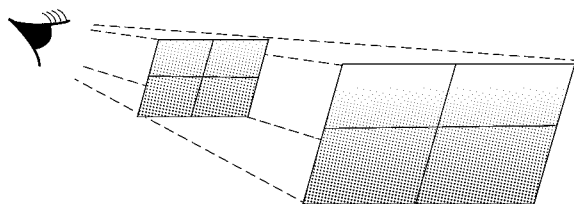


图 1.2 观察距离示意图

1.1.1.2 画面尺寸

一般是以对角线长度来表示,而此长度与画面长宽的比率有关,如图 1.3 所示,以勾股定理可轻易地求出画面长宽与对角线的关系。

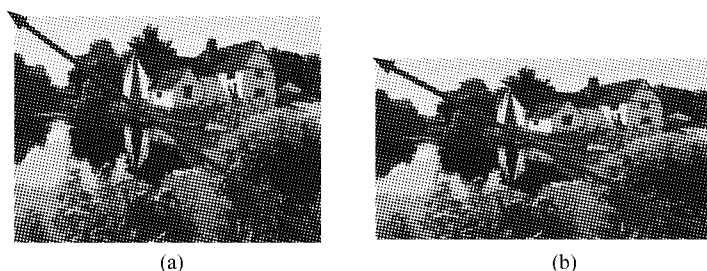


图 1.3 相同对角线长度的画面,长宽比为

(a) 4 : 3; (b) 16 : 9

1.1.1.3 像素大小

一般以像素节距或 pixel per inch(ppi)来表示,一般的像素是正方形的,像素节距即为正方形的边长;而 ppi 意即每英寸的像素数目,数目愈大表示像素尺寸愈小,以边长为 0.264 mm 的像素为例, $\text{ppi} = 1 \text{ in} / 0.264 \text{ mm} = 25.4 \text{ mm} / 0.264 \text{ mm} = 96.2$ 。

1.1.1.4 像素数目

一般会列出水平方向与垂直方向的像素数目,如图 1.1 即有 24×27 和 48×54 两种格式,在信息(图像或文字)显示应用中,会用一些既有的专用术语来表示像素数目的格式,请参见表 1.2。

1.1.1.5 尺寸与像素数目的换算

以上所述画面与像素的各项尺寸与数目,可以用简单的数学换算出来,举例而言,若知道某个显示器是 $\text{ppi}=96.2$ 的 SXGA,可先求得像素节距为 0.264 mm ,再求得画面长宽各为 $0.264\text{ mm}\times 1280=337.9\text{ mm}$ 和 $0.264\text{ mm}\times 1024=270.3\text{ mm}$,再计算画面对角线尺寸为

$$\sqrt{(337.9\text{ mm})^2+(270.3\text{ mm})^2}\approx 432.7\text{ mm}\approx 17.0\text{ in}$$

至于显示器的其他重要特征,分别说明如下。

1.1.2 对比度(contrast)

一个显示画面的内容,只有由像素与像素之间的差别来表现,才能显示出来,否则便成了无字天书。而最简单的差别是亮与暗,其间的差别愈大,人眼便愈能感知到,如图 1.4 所示。这个差别,可以用最亮情况的亮度与最暗情况的亮度之比率,作为量化指标,此比例即为对比度。就图 1.4 来比较,(a)的对比度 $>$ (b)的对比度 $>$ (c)的对比度。

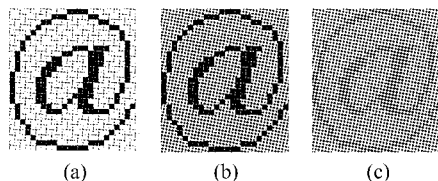


图 1.4

(a) 像素之间亮暗的差别大; (b) 像素之间亮暗的差别小; (c) 像素之间亮暗的差别很小

人的瞳孔会随着所处环境的亮度而缩放,来控制进入人眼的光量,只要是在正常的亮度范围之内,当周围环境的亮度大时,瞳孔会缩小使进入光量变小,相反的,当周围环境的亮度低时,瞳孔会放大而使进入光量变大。因此,相较之下,对比度对于人眼感觉的影响,更甚于亮度值本身的大小。

1.1.3 灰阶(gray level)

像素明暗的差别,最简单的一种是亮暗二元化,但在我们生活的自然界中,影像并不是只有亮与暗,而是充满了介于其间的明亮程度,为了要重现我们所看到的自然影像,需要显示出不同的明亮程度,此即为灰阶。自然界的明亮程度是连续性的,而以显示器重现图像时,并无法做到完全连续,只能在从最暗到最亮的范围内,增加区分的阶层,也就是减少暗亮区分的级距,来增加灰阶的数目。为了配合数字记忆体(存储器),一般区分灰阶的数目是 2^N (N 为自然数),而以二进位码来表示,如以 4 bit 分成 16 灰阶或以 8 bit 分成 256 灰阶。

灰阶的分级方法有以下几种。

1.1.3.1 以亚像素(sub-pixel)分级灰阶

如图 1.5 所示,每个像素以 2×2 个亚像素(sub-pixel)组成,其中深色的像素中,亮的亚像素个数分别为 0、1、2 时的情况。当像素小到人眼难以分辨,也就是落在视网膜上的密度大于人眼感知细胞的密度时,如图中缩小 6 倍的字元所示,其灰阶愈小,颜色愈深,也就是愈暗。

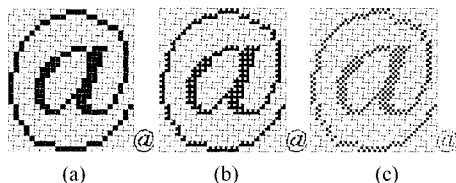


图 1.5 深色像素中

(a) 0 个亚像素是亮的; (b) 1 个亚像素是亮的; (c) 2 个亚像素是亮的

1.1.3.2 以像素发光的时间比例分级灰阶

这种方法无法以此纸本为媒介来表达,需要想象一下,一个光源并非一直是亮的,而是在很短的时间内周期性地时暗时亮,当此光源以超过人眼可以反应的频率闪烁时,也就是在视觉暂留的效应下,我们并不会感觉到光源时暗时亮,而会感觉到其平均亮度,因此,可以改变像素发光的时间比例达到分级灰阶的效果。

1.1.3.3 以像素发光强度分级灰阶

以上 1.2.3.1 和 1.1.3.2 所述的两种方法,像素都只有亮和暗的二元状态,在高于人眼的空间频率或时间频率之分辨能力的范围内改变像素,因此,需要极小的亚像素尺寸或极快的反应时间来符合该频率要求,但灰阶数增加到某一个程度,会使暗亮级距细分要求升高,而使所需亚像素尺寸或反应时间缩小到显示空间或尺寸上的极限,到这地步,便难以再进一步显示更多的灰阶。

改变像素本身的发光强度,即可达到分级灰阶的效果,但此方法需要精确地控制像素本身的亮度,所需的灰阶数越多,对像素亮度控制的精确度要求越高。

理想情况下,最小的灰阶应该是 0,但实际上在显示器中,灰阶只能在最亮与最暗之间作区分,所以对比度会是影响灰阶表现的重要因素,举例而言,当对比度为 3:1 时,若分成 5 个灰阶,其对比度是 1:1.5:2:2.5:3,而不是理想上的 0:1:2:3:4,但是当对比度越高时,其亮度比便会越接近理想情况 0:1:2:3:4。更复杂的情况是,人眼在不同亮度的环境下,对亮度区别的感觉会不同,所以灰阶区分不是固定的,亮度越暗要区分的越细(参见 4.3),使得对低亮度时的灰阶表现要求更加严格。

在 TFT LCD 中,即是以这种方法来设定灰阶,透过 1.2.3.2 节中说明的电

压-透射率关系，只要精确控制写入像素液晶的电压，即可控制像素液晶的透射率，来实现所需要的灰阶。

1.1.4 颜色(color)

自然界中的影像除了亮与暗，还有各种不同的颜色。关于颜色有很多理论，与一些进阶的驱动设计有很大的关系，需要具有颜色的基本知识，才能了解驱动设计的原因与目的，在本书中无法详加说明所有细节，仅会在相关的章节引入一些必要的概念。在此先就颜色的基本常识作一简介。

1.1.4.1 颜色是一种感知

在物理学世界中所存在的光，是由各种波长的光，以不同的能量组合而成的。人眼对这些不同波长的光，有不同的反应。一般而言，如果波长超过 700 nm 或短于 400 nm，人眼便无法察觉，亦即所谓的红外线或紫外线。即使光的波长介于 700 nm 与 400 nm 之间，对于相同的能量，人眼也有不同的“感觉”。对某个波长的光，人眼中的几种细胞会有不同的反应强度，而我们的大脑会组合各种细胞的反应，去“感觉”出各个波长的光有不同的颜色。更神奇的是，当进入人眼的光是由不同波长的光，以不同的能量组合而成时，人眼细胞的反应强度会有加成的作用，而人脑仍可根据这些反应而形成一种“感觉”，也就是颜色。经过更深入的研究，主要由人眼的细胞对光有三种与波长有关的反应，而其对各种波长的光，各有不同的敏感度，如图 1.6 所示，其敏感度较高的波长分布各对应至红、绿、蓝三个颜色，我们可以用这三个颜色来组合出大部分的颜色。

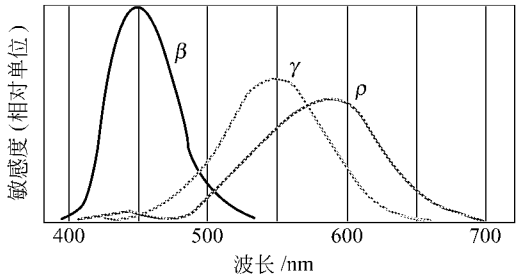


图 1.6 人眼细胞对三种波长的敏感度

根据以上的叙述，可进一步了解颜色的下述几个重要特性。

1.1.4.1.1 多波长光源颜色的非唯一性

人脑对颜色的判断与辨别，是根据人眼细胞对光的反应，就多波长的光而言，当不同波长以不同能量组合而成时，只要对人眼细胞造成相同的反应，人脑便会认为是相同的颜色。而就单波长的光而言，由于其中已没有其他波长的成分，因此无

法对人眼细胞造成完全相同的反应,其颜色也就不同。

1.1.4.1.2 颜色的加成性

不同波长的光会造成人眼细胞各种不一样的反应,但人眼细胞对其能量的反应强度却是线性的。因此,只要知道各波长对人眼细胞造成的反应,再知道多波长光源在各波长的能量分布,即可依线性组合计算出总反应。而多个多波长光源所组合成的光,亦可用各多波长光源的线性组合作加成,而得到组合效果的整体反应。

1.1.4.1.3 色度学坐标系统

在色度学中,颜色是以三个值来表示的,不同的三个值代表不同的颜色。但是表示系统并不是唯一的,某个表示系统中的三个值可以经由线性转换到另外一个系统中的三个值,其中很常用的一个是系统是 XYZ(其代表的意义请参本章开始时的注①或其他的色度学相关书籍)。这三个值可分成两个部分:一个部分是亮度(luminance),即其中的 Y 值,而如 1.1.2 节中所述,瞳孔会调节进入人眼的光量,所以这个部分要另行考量;另一个部分是色度(chrominance),习惯上,并不是直接用 X 和 Z 来表示,而是用 $x = X/(X+Y+Z)$ 和 $y = Y/(X+Y+Z)$ 来表示,如图 1.7 所示。我们可以很容易地由 (X, Y, Z) 换算成 (Y, x, y), 反之亦然:

$$X = x(X+Y+Z) = x(Y/y) \quad (1.1a)$$

$$Y = Y \quad (1.1b)$$

$$Z = z(X+Y+Z) = (1-x-y)(Y/y) \quad (1.1c)$$

1.1.4.1.4 颜色的合成

利用色度学坐标系统和颜色的加成性,我们便可以根据计算公式而组合出所需的颜色来。举例而言,有红、蓝、绿三个光源,其色度学坐标各为 $R(Y_r, x_r, y_r)$ 、 $G(Y_g, x_g, y_g)$ 和 $B(Y_b, x_b, y_b)$, 则由其所组合成的新的颜色,对应的 XYZ 值为

$$X = x_r(Y_r/y_r) + x_g(Y_g/y_g) + x_b(Y_b/y_b) \quad (1.2a)$$

$$Y = Y_r + Y_g + Y_b \quad (1.2b)$$

$$X+Y+Z = Y_r/y_r + Y_g/y_g + Y_b/y_b \quad (1.2c)$$

可求得

$$\begin{aligned} x &= X/(X+Y+Z) \\ &= [x_r(Y_r/y_r) + x_g(Y_g/y_g) + x_b(Y_b/y_b)] \\ &\quad / (Y_r/y_r + Y_g/y_g + Y_b/y_b) \end{aligned} \quad (1.3a)$$

$$\begin{aligned} y &= Y/(X+Y+Z) \\ &= (Y_r + Y_g + Y_b) / (Y_r/y_r + Y_g/y_g + Y_b/y_b) \end{aligned} \quad (1.3b)$$

在此表示系统中, (x, y) 值会描述出颜色的色度, 在我们所认识的颜色中, 如

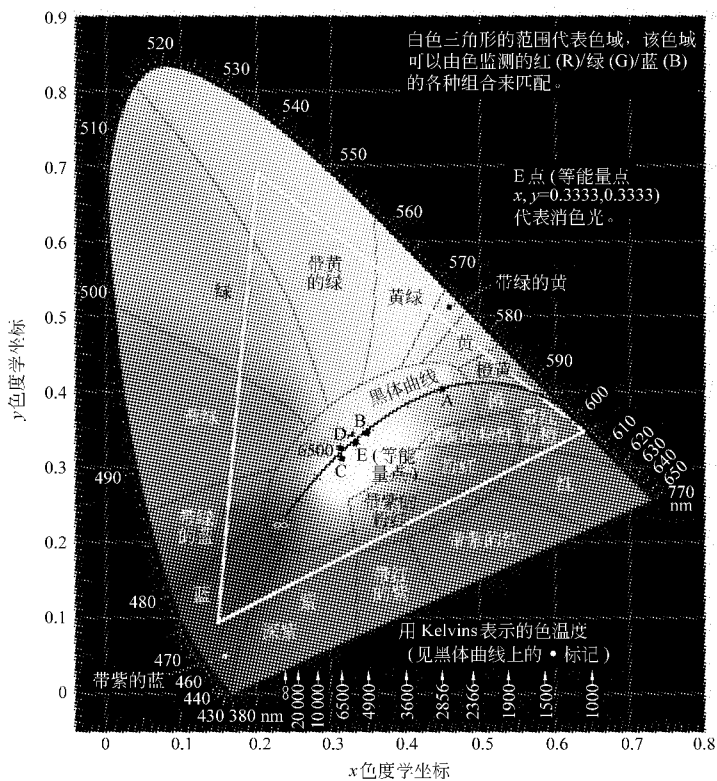


图 1.7 CIE_{x,y} 1931 色度坐标图

黄色、金黄色、棕色、褐色，可能都对应到相同的 (x, y) ，而仅仅是代表亮度的 Y 值有所不同。相同的情况也发生在白色、浅灰色、深灰色、黑色，与红色、浅红色、深红色等。适当地调配红、蓝、绿三个光源的 Y_r, Y_b, Y_g ，如图 1.8 所示为微软视窗应用软件中对颜色的设定，将 Y_r, Y_g, Y_b 、各分成 0 至 255，共 256 个灰阶，我们可组合出各种颜色。

1.1.4.2 以显示器表现颜色

目前的显示技术，三原色的色度 (x, y) 在制造时便是固定的，而以控制三原色的亮度 Y ，来组合表现出各种颜色 (Y, x, y) 来。如上所述，至少需要三原色来组成各种颜色。因



图 1.8 微软视窗应用软件中对颜色的设定

此,需要在每一个像素中显示出三原色,而且,要能各自独立地控制这三原色的亮度,有空间分割与时间分割两种方式来在一个像素中显示三原色。

1.1.4.2.1 亚像素

如图 1.9 所示,将每个像素在空间上分割成三个亚像素,各显示红、蓝、绿三色,其色度(x, y)是固定的,而藉由控制各个亚像素的亮度,当像素的尺寸很小时,亦即,当画面变化的空间频率很大时,人眼不会察觉到三原色的显示位置稍有不同,如此即可使每个像素显示出所需的各种颜色来。

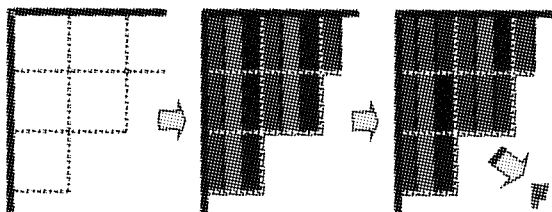


图 1.9 以红、蓝、绿三个亚像素组成像素来显示颜色

1.1.4.2.2 色序法(color sequential method)

如图 1.10 所示,将每个像素在时间上分划成三个次序,各显示红、蓝、绿三色,其色度(x, y)是固定的。而藉由控制各个次序的亮度,当切换的时间很短时,亦即,当画面变化的时间频率很大时,人眼不会察觉到三原色的显示时间稍有不同,如此即可使每个像素显示出所需的各种颜色来。

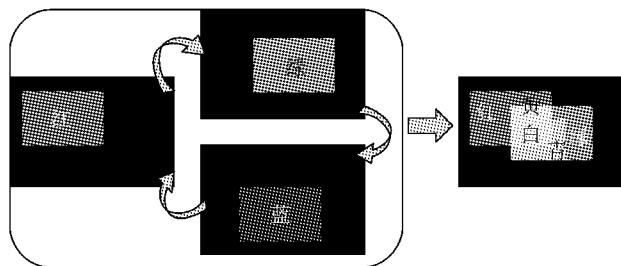


图 1.10 以红、蓝、绿三个次序组成像素来显示颜色

1.2 液晶显示器(liquid crystal display, LCD)

在对显示器有所了解后,我们进一步地来介绍液晶显示器(LCD),一方面也更具体地了解显示原理。

1.2.1 光阀的概念

显示器可根据其像素是否发光而分成下面的发光型(emissive)和非发光型(non-emissive)两类。

1.2.1.1 发光型显示器

像素本身即为发光源,如阴极射线管(cathode ray tube, CRT)和等离子显示器(plasma display)等,直接控制像素发光能量可决定其亮暗程度。

1.2.1.2 非发光型显示器

像素本身不发光,如 LCD 和 digital mirror display(DMD,数字微镜显示器),以外部光源照射在像素上,而以控制像素对发光能量的透射率或反射率来决定其亮暗程度,故又分为穿透式、反射式与半穿透半反射式。

TFT LCD 属于非发光型,其中大部分为穿透式,配合安装在背面的外部光源,以像素作为光源的开关阀门,来决定其亮暗程度,若将阀门打开让光通过,即可得到亮的像素,若将阀门关闭不让光通过,即可得到暗的像素。而 TFT LCD 这种光阀最重要的一项特征,是不仅有开和关两种状态,而且可以藉由施加电压的大小来控制光阀的开关程度,再配合固定的背光源强度,即可以 1.1.3.3 中所述控制像素发光强度的方式,达成分级灰阶的功能。

1.2.2 如何利用 LCD 制成光阀

1.2.2.1 光的偏极化(polarization)

如图 1.11 所示,可将光视作一种电磁波,以电场和磁场相互垂直而交互振荡的方式向前传播。

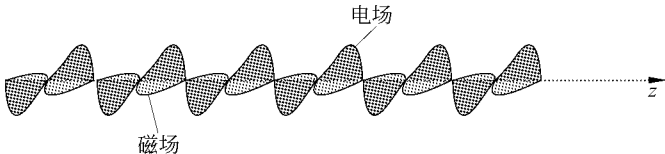


图 1.11 光以电场和磁场相互垂直而交互振荡的方式向前传播

从光的行进方向上看,如图 1.12(a)所示,电场在某个方向上振荡,振荡的幅度愈大,光所具有的能量愈大。在自然界中的光,如图 1.12(b)所示,光的能量可能分布在各个振荡方向上。如图 1.12(c)所示,某个方向上振荡的光可分成两个垂直方向上的分量,而自然界中的光既然由各振荡方向的光所组成,故可以将两个垂直方向上的分量加总,而得到最简单的方式来表示振荡,如图 1.12(d)所示。

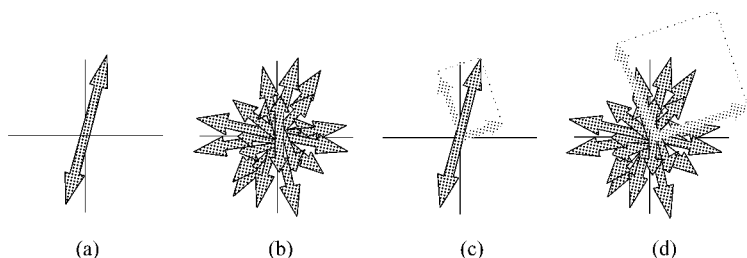


图 1.12

- (a) 光的电场在某个方向上振荡；(b) 自然界中的光在各个方向上振荡；
 (c) 某个方向上振荡的光可分成两个垂直方向上的分量；
 (d) 以最简单的方式来表示自然界中光的振荡

1.2.2.2 偏光片(polarizer)

如图 1.13 所示,偏光片的作用,是让在某个方向上振荡的光通过,而把在其垂直方向上振荡的光挡住。

1.2.2.3 偏光片组(polarizer/analyzer)

如图 1.14 所示,第一偏光片(一般称为起偏片, polarizer)仅让在某个方向上振荡的光通过,而第二偏光片(一般称为检偏片, analyzer)再把所通过的光挡住,即可阻绝光的行进,而达到“关闭”光的效果。

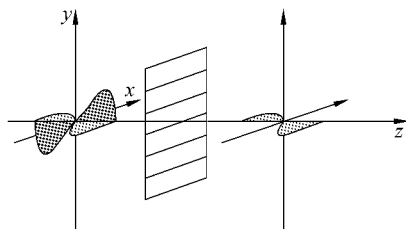


图 1.13 偏光片的作用

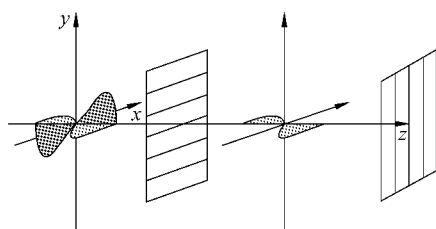


图 1.14 偏光片组的作用

1.2.2.4 液晶的作用

液晶具有双折射(birefringence)的特性,而且在不同的电场下,会有不同的排列方式。因此,当光通过液晶时,会受其影响而改变或保持其振荡的方向,如图 1.15 所示,当液晶不改变光的振荡方向时,光无法通过第二偏光片而被“关闭”,而当液晶将光的振荡方向改变,光可再分为两个分量,虽有一个分量无法通过第二偏光片,但仍有一个分量可以通过第二偏光片,而成为“打开”的状态。因此,可藉由施加电场来改变液晶的排列方式,来实现“光阀”的作用。

本书的内容,皆以穿透式 LCD 为例,反射式 LCD 虽然在光学显示原理上与穿

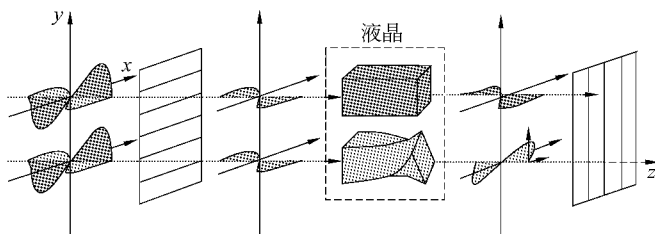


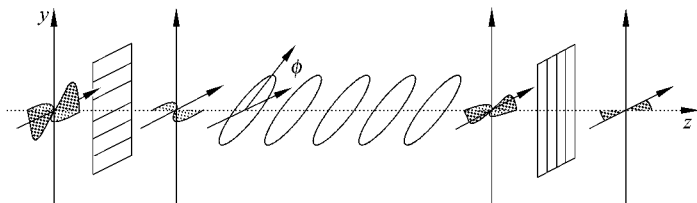
图 1.15 液晶的作用

透式有所不同,但对驱动原理而言是相同的。

1.2.2.5 液晶光阀的例子

如图 1.16 所示,入射光在 x, y 两个方向上的电场振幅分别为 A_x 和 A_y , 经过第一偏光片之后,仅有 A_x 继续行进,而 A_y 则被挡住。接着,为了对应液晶分子排列状况,将坐标系旋转 ϕ 角,在液晶分子长轴上的分量,因液晶的折射系数较大而行进速度较慢,而在短轴上的分量,则因折射系数较小而行进速度较快,因而,二者产生相位差 $\delta = 2\pi(\Delta n)d/\lambda$ 。其中, Δn 为液晶分子长、短轴折射系数的差; d 为液晶层厚度; λ 为入射光的波长。然后,再配合第二偏光片的方向将坐标系旋转回 $-\phi$ 角。最后再经过第二偏光片,则仅有 y 方向振动的分量继续行进,而 x 方向振动的分量被挡住。由一连串矩阵运算,我们可以得到 $A_{x'} = 0$, 以及

$$A_{y'} = A_x [\sin(2\phi)] [\sin(\delta/2)] \quad (1.4)$$



[入射光] [第一偏光片] [旋转 ϕ] [相位延迟] [旋转 $-\phi$] [第二偏光片] = [射出光]

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-i(\delta/2)} & 0 \\ 0 & e^{i(\delta/2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{x'} \\ A_{y'} \end{bmatrix}$$

图 1.16 液晶光阀的例子

光的能量与振幅平方成正比,假设 $A_x = A_y$, 我们可以得到此液晶光阀的透射率:

$$T = (A_{x'}^2 + A_{y'}^2) / (A_x^2 + A_y^2) = (1/2) [\sin^2(2\phi)] [\sin^2(\delta/2)] \quad (1.5)$$

由公式(1.5), 我们可以观察到以下几点:

(1) 藉由控制液晶分子长轴与偏光片的夹角 ϕ , 即可控制液晶光阀的透射率。

(2) 当夹角 $\phi=0$ 时,可得到最暗的状态;而当夹角 $\phi=45^\circ$ 时,可得到最亮的状态。

(3) 透射率 T 与相位差 δ 有关,相位差的公式为

$$\delta = 2\pi(\Delta n)d/\lambda \quad (1.6)$$

因此,透射率 T 与入射光的波长 λ 、液晶的双折射系数 Δn 和液晶的厚度 d 皆有关。

(4) 液晶的双折射系数 Δn 和液晶的厚度 d 需要适当的设计,来得到最佳的透射率。

(5) 不同的射入光颜色波长 λ 不同,射入相同的液晶光阀,会得到不同的透射率(在 4.3.2.4 中会有相关的讨论)。

1.2.2.6 液晶光阀的不同模式

在 1.2.2.5 中所讨论的液晶光阀,是将液晶分子的长轴设定在与偏光片平行的方向上,藉由电场控制其旋转的 ϕ 角来改变透射率,即是所谓的横向电场驱动(in-plane switch, IPS)模式。事实上,还有其他各式各样的液晶光阀模式,特别是一种所谓的扭曲向列(twist nematic, TN)模式,是在 TFT LCD 中最常用的,在这种模式中,若不施加电场,液晶分子的长轴会平行于偏光片,而在此平面上旋转 ϕ 角;在不同电场下,液晶分子的长轴不仅会在与偏光片平行的平面上旋转 ϕ 角,还会与该平面形成 θ 角的倾角,其偏极光的相位变化与透射率的计算就更为复杂。从概念上讲,可以将液晶顺着光行进的方向分割为 n 层超薄液晶,先计算出在不同电压(电场)下每层超薄液晶的分子排列,再计算出每层超薄液晶的相位变化,类似于图 1.16 中所示,以 n 个超薄液晶层对应的 n 个矩阵相乘,再配合偏光片选出特定方向的振幅,便可得到透射率。更详细的内容不在本书讨论范围之内,请读者另行参考其他液晶相关书籍^①。

1.2.2.7 LCD 的视角

如图 1.17 所示,可以从不同的角度来看 LCD,换言之,光可以从不同的角度进入 LCD,再进入观察者的眼中。基于光是直线前进与图 1.16 所呈现的概念,偏极化的光在以不同的角度进入液晶层时,所遇到的相位延迟情况便不相同,透射率也因而变化,亦同时造成对比度的改变;此外,如 1.2.2.5 中所讨论的,相位延迟又会因光的波长而不同,所以各颜色的透射率也会有所不同,从而造成不同视角观察时的颜色偏移。

LCD 的亮度是背光源的亮度乘以透射率,背光源经过液晶屏在不同角度射出的亮度并不相同,因此,以不同视角看 LCD 会感觉到亮度、对比度以及颜色的变

① 参考: *Optical Waves in Layered Media* by Pochi Yeh. ISBN 9971-51-109-6

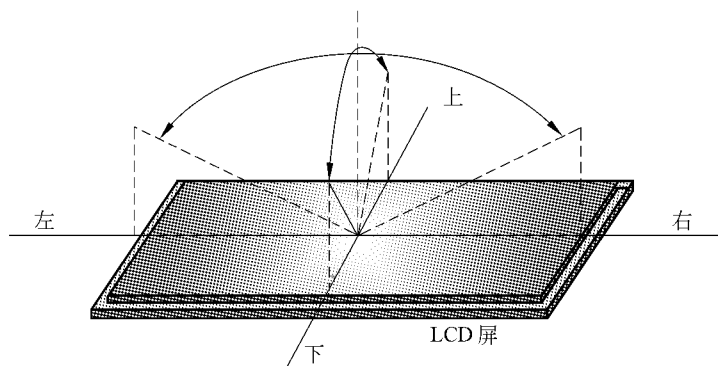


图 1.17 从不同角度来看 LCD

化。经适当的光学设计,可以使这些变化减到最小,而制成广视角型 LCD。

1.2.3 如何控制液晶光阀

有许多方法来改变液晶光阀的透射率,如偏光片的角度、液晶分子的厚度等;而其中最方便而能有效控制的一种方式,是利用施加电场来改变液晶分子的排列方式,而使得光在液晶层中的相位延迟不同来改变透射率,进而达成光阀的功能。

1.2.3.1 以电场控制液晶分子的排列^①

当液晶分子处在电场中时,在分子上的电子云,会受正电极吸引而向正电极移动,因而产生电偶极矩 $\mathbf{P}$ 。在电场 $\mathbf{E}$ 中的电偶极,会产生转动的力矩:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{P} \times \mathbf{E} \quad (1.7)$$

而电偶极矩 $\mathbf{P}$ 与电场 $\mathbf{E}$ 成正比:

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \mathbf{E} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E} \quad (1.8)$$

式中, $\chi = \epsilon_r - 1$ 为电极化率(susceptibility); ϵ_r 为相对介电常数; ϵ_0 为真空中的介电常数(permeability, 又称电容率)。

如图 1.18 所示,可将液晶分子的电偶极矩分解成与液晶分子长轴平行的分量 $|\mathbf{P}_{\parallel}|$, 以及与液晶分子短轴平行的分量 $|\mathbf{P}_{\perp}|$, 各为

$$|\mathbf{P}_{\perp}| = |\epsilon_0 \chi_{\perp} \mathbf{E}_{\perp}| = \epsilon_0 \chi_{\perp} E \sin \theta \quad (1.9a)$$

$$|\mathbf{P}_{\parallel}| = |\epsilon_0 \chi_{\parallel} \mathbf{E}_{\parallel}| = \epsilon_0 \chi_{\parallel} E \cos \theta \quad (1.9b)$$

这两个电偶极分量,会产生方向相反的力矩 $|\boldsymbol{\tau}_{\parallel}|$ 和 $|\boldsymbol{\tau}_{\perp}|$:

$$|\boldsymbol{\tau}_{\perp}| = |\mathbf{P}_{\perp} \times \mathbf{E}| = |\mathbf{P}_{\perp}| \times |\mathbf{E}| \times \cos \theta = \epsilon_0 \chi_{\perp} E^2 \sin \theta \cos \theta \quad (1.10a)$$

① 参考: *Field and Wave Electromagnetics* by David K. Chang, Section 3-8, ISBN 0-201-01239-1

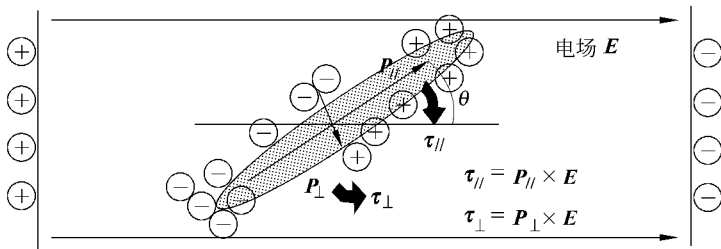


图 1.18 液晶分子在电场中的电偶极矩与力矩

$$|\tau_{//}| = |\mathbf{P}_{//} \times \mathbf{E}| = |\mathbf{P}_{//}| \times |\mathbf{E}| \times \sin \theta = \epsilon_0 \chi_{//} E^2 \sin \theta \cos \theta \quad (1.10b)$$

这两个力矩方向相反, 会相互抗衡, 产生净力矩 τ_{net} :

$$\begin{aligned} |\tau_{\text{net}}| &= |\tau_{//}| - |\tau_{\perp}| = \epsilon_0 (\chi_{//} - \chi_{\perp}) E^2 \cos \theta \sin \theta \\ &= 1/2 \epsilon_0 (\epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}) E^2 \sin(2\theta) \end{aligned} \quad (1.11)$$

当力矩不平衡时, 若其净力矩可以克服液晶本身的弹性, 则可使液晶分子朝力矩大的方向转动。一般的液晶材料, 液晶分子长轴的介电系数 $\epsilon_{//}$ 会比短轴的介电常数 $\epsilon_{\perp}$ 大(称为正型液晶), 所以电偶极矩 $\mathbf{P}_{//}$ 也会比 $\mathbf{P}_{\perp}$ 大, 因此由公式(1.10), 力矩 $|\tau_{//}|$ 也会比 $|\tau_{\perp}|$ 大, 使得液晶分子的长轴向电场方向扭转。也有少数的液晶材料, 其长轴的介电常数 $\epsilon_{//}$ 会比短轴的介电常数 $\epsilon_{\perp}$ 小(称为负型液晶), 其液晶分子在电场中的扭转方向与正型液晶相反。

因此, 对液晶施加不同的电场, 会改变其净力矩与液晶本身弹性的平衡关系, 因而使液晶分子的排列不同, 而导致光透射率的改变。

对以下两种特殊的情况, 电场无法有效地扭转液晶分子:

(1) 当温度升高时, 液晶分子会因能量的增加而摆动, 温度愈高, 分子摆动得愈厉害(参见 1.2.5), 宏观而言, 长、短轴的差别会因为空间上和时间上的平均效应而变小。当温度很高的时候, 液晶分子会具有足够的能量自由转动, 因而平均而言不再具有长、短轴的差别, 此时便不再具有液晶相, 电场也失去扭转液晶分子的效应。

(2) 当液晶分子的长轴完全平行于电场 $\mathbf{E}$ 时, 电偶极矩 $\mathbf{P}$ 亦会平行于电场 $\mathbf{E}$, 使力矩 $\tau_{//} = \mathbf{P}_{//} \times \mathbf{E} = 0$, 而力矩 $\tau_{\perp}$ 也因为没有 $\mathbf{P}_{\perp}$ 分量而等于 0, 因此液晶分子不会转动。相同地, 当液晶分子的短轴完全平行于电场 $\mathbf{E}$ 时, 电偶极矩 $\mathbf{P}$ 亦仅会平行于电场 $\mathbf{E}$, 力矩 $\tau_{//}$ 因为没有 $\mathbf{P}_{//}$ 的分量而等于 0, 而力矩 $\tau_{\perp} = \mathbf{P}_{\perp} \times \mathbf{E} = 0$, 因此液晶分子也不会转动。就正型液晶而言, 第二种状态是很不稳定的, 当液晶分子因温度而摆动时, 便会脱离此状态而使液晶分子的长轴开始向电场方向转动, 但液晶分子的摆动是随机的, 不同的液晶分子依不同的路径向电场方向转动, 使得液晶产生不同的区域(domain, 畴), 在一般的液晶光阀中, 会以制程技术定义出液晶的预倾角(pre-tilt angle), 来避免这种情况发生。

1.2.3.2 电压-透射率关系曲线(V-T(%) curve)

一般而言,对液晶光阀施加电场 E 的两个电极,其间的距离 d 是固定的,因此施加的电压 $V=E \cdot d$,会与电场 E 成正比,经由控制施加在液晶层上的电压 V ,即可改变液晶光阀的透射率,这就是液晶光阀与电压交互作用而制成显示器的原理。电压与透射率的关系,是以电压控制液晶光阀来实现画面显示的关键所在。

将施加在液晶光阀上的电压 V 置于横轴,将液晶光阀的透射率 $T(\%)$ 绘于纵轴,可得到电压 V - $T(\%)$ 的关系曲线,图 1.19 绘出 TN 型与 IPS 型液晶光阀的典型 V - $T(\%)$ 关系曲线。特别注意到, TN 型液晶光阀未施加电压($V=0$)的透射率最大,这种类型称为常白(normally white, NW)型;而 IPS 型液晶光阀未施加电压($V=0$)的透射率最小,称为常黑(normally black, NB)型。

如 1.1.3.3 中所述, TFT LCD 的灰阶系由电压的控制来设定,所要显示的灰阶愈多,电压的控制就要愈精确。而液晶模式的透射率对应电压的斜率愈大,电压的控制也要愈精确。以图 1.19 中所示的两种液晶模式为例, TN 型所需的灰阶电压控制,就会比 IPS 型所需的更精确。

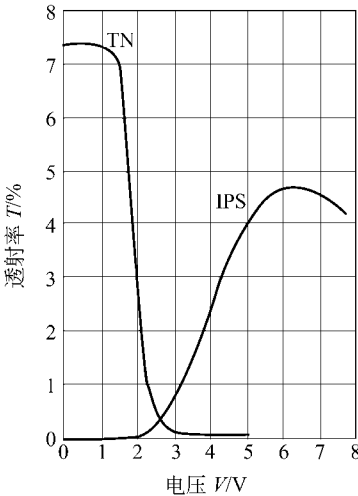


图 1.19 TN 型与 IPS 型液晶光阀的典型 V - $T(\%)$ 关系曲线

1.2.4 液晶电容

理想的液晶层是不导电的,而在液晶光阀中,液晶层介于施加电压的两个电极之间,我们知道,在两个电极之间夹置一个不导电的介电材质,即是一个电容,因此液晶光阀的行为就像是一个电容器,其电容的大小为 C_{LC} 。但由 1.2.3.1 的说明可知,液晶分子的介电常数 ϵ 并不是定值(在长、短轴上分别为 $\epsilon_{//}$ 和 $\epsilon_{\perp}$),故液晶电容 C_{LC} 会随着液晶分子的排列而改变,而液晶分子的排列又会受到液晶边界状态、温度与电场等效应的影响。

两个平行电极夹置一介电层的情况如图 1.20(a) 所示,其电容值的基本公式为

$$C = \epsilon A / d = \epsilon_r \epsilon_0 A / d \tag{1.12}$$

式中, ϵ 为电介质的介电常数; ϵ_r 为电介质的相对介电常数; ϵ_0 为真空中的介电常数(又称电容率, $8.854\,18 \times 10^{-12}$ F/m); A 为平行电极的面积; d 为平行电极的间

距(亦即介电层的厚度)。在液晶光阀中,平行电极的面积和间距是固定不变的。

当液晶分子长轴完全垂直或平行于电极时,如图 1.20(b)和图 1.20(c)所示,其电容值的计算,只需将 $\epsilon_{\perp}$ 或 $\epsilon_{\parallel}$ 代入 ϵ_r 即可,但是当液晶分子长轴并未完全平行或垂直于电极时,如图 1.20(d)所示,便需计算出等效的介电常数。

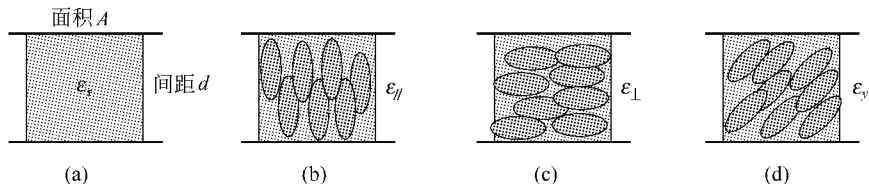


图 1.20 平行电容电极

(a) 均匀介电质; (b) 液晶分子长轴垂直电极;

(c) 液晶分子长轴平行电极; (d) 液晶分子长轴与电极成一角度

1.2.4.1 等效介电常数 ϵ_y 的计算

在两个平行电极上施加电压,会在平行电极之间产生电场 E ,假设液晶分子长轴与平行电极间成一角度 θ ,如图 1.21 所示,可以将电场分解成 $|E_{\perp}|$ 和 $|E_{\parallel}|$ 两个分量,进而在液晶分子的长、短轴上,各引起了电偶极矩 $|P_{\perp}|$ 和 $|P_{\parallel}|$ (见公式(1.9a)与公式(1.9b))。

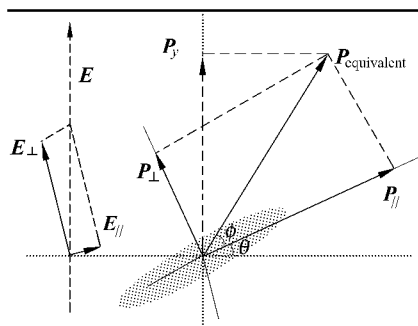


图 1.21 等效介电常数的计算

这两个电偶极矩再合成 $P_{\text{equivalent}}$:

$$|P_{\text{equivalent}}| = \sqrt{P_{\perp}^2 + P_{\parallel}^2} = \epsilon_0 E \sqrt{(\chi_{\perp} \cos \theta)^2 + (\chi_{\parallel} \sin \theta)^2} \quad (1.13)$$

由于 $\epsilon_{\perp}$ 不等于 $\epsilon_{\parallel}$, 电偶极 $P_{\text{equivalent}}$ 与电场 E 并不平行, 再假设电极化率 $\chi_{\text{equivalent}}$ 与液晶分子长轴成一角度 ϕ , 可计算 $\tan^2 \phi$:

$$\tan \phi = |P_{\perp}| / |P_{\parallel}| = (\epsilon_0 \chi_{\perp} E \cos \theta) / (\epsilon_0 \chi_{\parallel} E \sin \theta) = (\chi_{\perp} / \chi_{\parallel}) \cot \theta \quad (1.14)$$

由公式(1.9),可求得等效电极化率 $\chi_{\text{equivalent}}$:

$$\chi_{\text{equivalent}} = P_{\text{equivalent}} / \epsilon_0 E = \sqrt{(\chi_{\perp} \cos \theta)^2 + (\chi_{\parallel} \sin \theta)^2} \quad (1.15)$$

最后,由电极化率 $\chi_{\text{equivalent}}$ 在与电场 E 平行方向上的分量 χ_y 可求得等效介电常数 ϵ_y ,其与角度的关系之一,例如图 1.22 所示。

$$\begin{aligned} \epsilon_y &= 1 + \chi_y = 1 + \chi_{\text{equivalent}} \sin(\theta + \phi) \\ &= 1 + \sqrt{(\chi_{\perp} \cos \theta)^2 + (\chi_{\parallel} \sin \theta)^2} \\ &\quad \times \sin\{\theta + \arctan^{-1}[(\chi_{\perp} / \chi_{\parallel}) \cot \theta]\} \end{aligned} \quad (1.16)$$

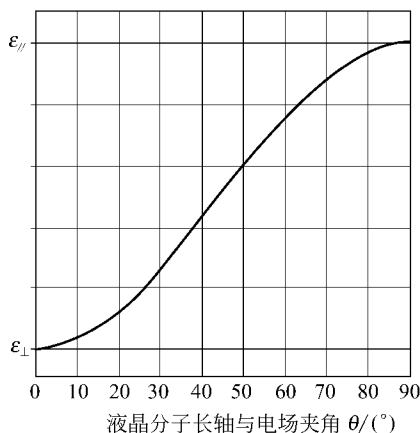


图 1.22 等效介电常数与液晶分子长轴和电场夹角的关系图之一例

1.2.4.2 液晶电容值 C_{LC} 的计算

在大部分的液晶光阀模式中,夹置于两个平行电极之间的液晶分子,与平行电极的角度并不是相同的,如图 1.23 所示,此时可应用类似 1.2.2.6 中所述的概念,将液晶层分成 n 个薄层,可假设在每个薄层中的液晶分子与平行电极之间的角度是相同的,由 1.2.4.1,我们可以计算出各个角度的等效介电常数,再由公式(1.12),即可计算出每个薄层的液晶电容。

在平行电极之间的等电位面,亦会平行于电极,这些等电位面可视为厚度为零的虚拟电极,因此,液晶电容值的计算,是将 n 个薄层的液晶电容“串联”起来,亦即

$$\begin{aligned} C_{LC} &= 1 / \left\{ \sum_i 1 / C_i \right\} \\ &= 1 / \{ [1 / C_1(\theta_1)] + [1 / C_2(\theta_2)] + [1 / C_3(\theta_3)] + \dots \} \end{aligned} \quad (1.17)$$

在不同电压下,液晶分子的排列会改变,一方面会反映在液晶电容值的变化上,同时另一方面也会反映在透射率的变化上。TN 型液晶光阀的典型电容/透射率-电压关系曲线如图 1.24 所示。

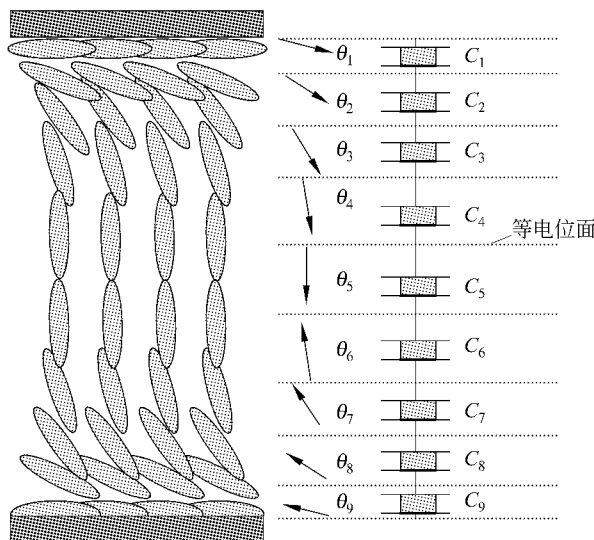


图 1.23 夹置于两个平行电极之间的液晶分子与其电容计算

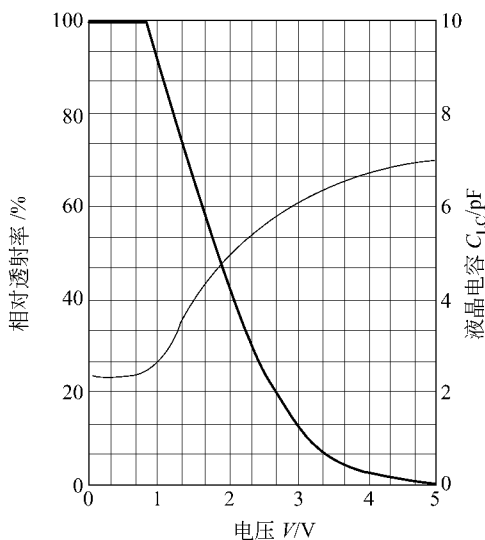


图 1.24 TN 型液晶光阀的典型电容/透射率-电压关系曲线

1.2.5 进一步认识液晶

一般的液晶分子是长条形的,包括两个部分,一是不易弯曲的部分,通常由苯环组成,二是可弯曲的部分。一种向列型(nematic)液晶分子(4'-n-pentyl-4-

cyanobiphenyl) 的结构如图 1.25 所示。

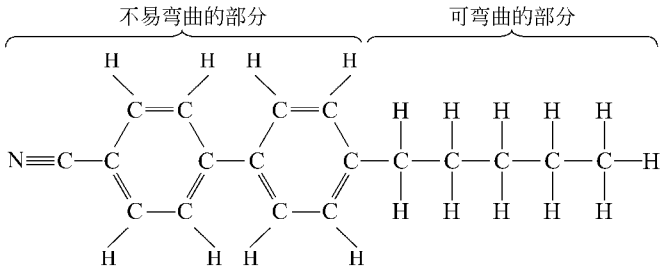


图 1.25 一种液晶分子结构

藉由图 1.26,描述一下想象中的液晶分子的行为: 液晶分子在液晶中,会有沿着长轴平行排列的趋势,虽然液晶分子大致上是以长轴平行的方式排列,且分子间有作用力存在,但液晶分子会从环境温度中取得能量,克服此作用力,本身动态地不断地按以下几种方式快速运动:

- ① 在长轴方向附近,以某个角度摇摆,如果在瞬间取得一个大的能量,甚至会翻转至相反方向;
- ② 以长轴方向为中心旋转;
- ③ 保持长轴方向而在液晶中平行地移动。

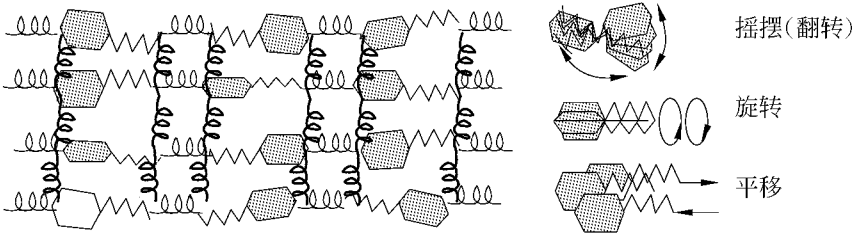


图 1.26 液晶分子动态运动示意图

由于液晶分子数目多,分子运动速度又快,液晶所表现出的特性其实是整体而平均的,所以从宏观角度,可以将液晶分子简化成如图 1.18 所示的长、短轴模型,在 1.2.3 与 1.2.4 中,大都是以此简化模型来讨论,不论折射率或介电常数,都是含有整体平均效应的宏观特性,而未直接考虑分子的详细结构。不过,为了理解温度效应和反应时间等液晶特性时,就必须先建立这样的概念。

1.3 了解薄膜晶体管(thin film transistor, TFT)

目前绝大部分的 TFT LCD 中所使用的薄膜晶体管(TFT),都是采用非晶硅(amorphous silicon, a-Si:H)所制成的,在本书第 1 至 5 章中所讨论的内容,都是基于非晶硅型的 TFT,至于其他的 TFT 技术,会在第 6 章中稍做介绍。

1.3.1 TFT 的结构与工作原理

如图 1.27 所示,非晶硅型 TFT 具有一个栅极(gate),一个源极(source),与一个漏极(drain),主要的结构是一个非晶硅半导体薄膜,此半导体层与栅极电极之间间隔着一个栅极绝缘层,此半导体层的两端,各经过一层 N^+ 型掺杂的非晶硅层,与源极与漏极电极相连接(实现欧姆连接)。

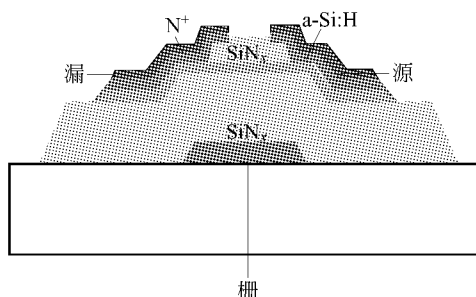


图 1.27 非晶硅型 TFT 的剖面示意图

此结构与金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)非常相似,其工作原理也很相近。当栅极施加正电压时,会在半导体层中产生吸引作用,形成电子沟道,使源极与漏极之间形成导通状态;栅极电压施加得愈大,吸引的电子也愈多,使得导通电流越大;而当栅极施加负电压时,会将半导体层中的电子排除,且因 N^+ 型非晶硅层的阻绝而无法吸引空穴,使源极与漏极之间形成关闭状态。

TFT LCD 即是利用 TFT 的栅极电压,可以控制源极与漏极之间的电流,而将 TFT 打开与关闭的特点,得以在适当的时机,与驱动信号的来源连接或断绝,而使得每一个显示像素可以独立地运作,且较不易受其他显示像素的影响。由于 TFT 属于一种主动元件,在显示画面中呈现矩阵式的排列,因此 TFT LCD 也被视为一种主动矩阵式(active matrix)LCD。