

文章编号:1007-2780(2010)03-0351-04

液晶面板 PI 层电荷累积和释放过程分析

张武勤^{1,2}

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450044, E-mail: zhangwuqin@126.com;
2. 郑州师范高等专科学校 物理系, 河南 郑州 450044)

摘 要: 液晶显示器的聚酰亚胺配向层(Polyimide, PI)电荷累积过程属于凝聚态物理的电介质理论范畴, 由于电介质物理理论还不够完整, 造成液晶显示器 PI 层电荷累积和释放过程机理不甚清晰。文章应用麦克斯韦方程组分析液晶 PI 层表面电荷累积过程, 应用可将快慢效应分开的时域谱学理论分析慢电荷的释放过程, 得出液晶面板 PI 层和液晶层接触面电荷累积与两者的介电常数和电导率的关系, 以及累积慢电荷的释放时间常数与 PI 层厚度的关系。

关 键 词: 电荷极化; 快电荷; 慢电荷

中图分类号: O482.4; TN141.9 **文献标识码:** A

Analysis of Electric Charges Accumulation and Release in LCD Panel PI Layer

ZHANG Wu-qin^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450044, China, E-mail: zhangwuqin@126.com;
2. Department of Physics, Zhengzhou Teachers College, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: The electric charges accumulation of liquid crystal display PI (polyimide) is part of dielectric theory of condensed physics. But, less-advanced dielectric physics theory fails to offer a clear explanation in the process of charge accumulation and release in liquid crystal display PI layer. The paper here analyzes accumulation of charges in liquid crystal PI layer through the use of the Maxwell's equations, and then it analyzes the release of charges in the light of temporal-frequency spectrum in which the effect can be separated into fast charges and slow charges. Correlation is therefrom demonstrated between the permittivity and conductivity to PI layer and Liquid Crystal layer. The relationship between the release time of the slow charge and the thickness of PI is shown also.

Key words: polarization of electric charge; fast charge; slow charge

1 引 言

向列相液晶是液晶显示器件普遍使用的液晶材料。在液晶显示器件的制造中, 需要使用聚酰亚胺配向层(Polyimide, PI)使向列相液晶分子沿确定的方向排列。在电场的作用下, 液晶分子的

指向会发生变化, 从而实现对偏振光的调制, 达到显示目的。加电时, 覆盖在电极上的 PI 层将会捕获 LC 层电离产生的电荷并聚集到其表面; 去除电压后, 这些积聚的电荷缓慢释放, 其过程会持续数小时至数十小时。孙元、唐军等对静电荷在 PI 层产生的电压值下降过程进行了研究, 给出了电

压值与时间关系的实验测量结果^[1]。电荷的聚集会给液晶面板的图像显示产生一定不良影响,例如图像残留、显示速度减慢等。研究 PI 层电荷累积产生的原因,对改善液晶显示器的响应速度、显示效果有重要影响。

本文应用麦克斯韦方程组对 PI 层表面电荷的累积过程进行了研究,应用可将快慢效应分开的时域谱学理论分析了慢电荷的释放过程,得出液晶面板 PI 层和液晶(Liquid Crystal, LC)层接触面电荷累积与两者的介电常数和电导率的关系,以及累积慢电荷的释放时间常数与 PI 层厚度的关系。

2 累积电荷分类

电介质物理学认为:在两种相互接触的不同介电常数和电导率的电介质上施加电压,电介质中的自由电荷载流子(正、负离子或电子)可以在电介质的缺陷和界面上积聚,形成空间电荷的局部累积,使电介质中的电荷分布不均匀,产生宏观电矩。这种极化称为空间电荷极化或夹层、界面极化。此时电极表面要生成 3 种电荷,电极上的总电荷可表示为:

$$Q_0 = Q_H + Q_L + Q_r$$

其中 Q_H 为快电荷,遵从麦克斯韦理论,生成速度快,电场消失时又很快释放,是电荷形成和释放初期的主要部分^[2]; Q_L 为慢电荷,其释放不遵从麦克斯韦理论,释放速度缓慢,可持续数小时之久; Q_r 为剩余电荷,在零外电场恒温平衡状态下不释放,可以认为此电荷是物质的电子和原子核贡献的电荷,可用高次矩来描述,例如电四极矩、电八极矩。

2.1 电荷极化形成原因

下面以最简单的双层电介质为例说明电荷极化形成的原因。如图 1 所示,由两种不同电性的

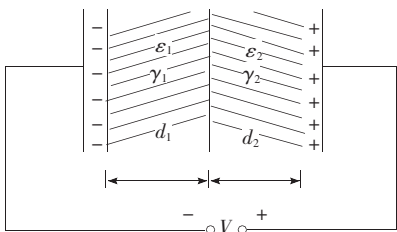


图 1 电荷极化示意图
Fig. 1 Polarization diagram

电介质串联组合成一双层介质电容器,其厚度分别为 d_1 、 d_2 。 ϵ_1 与 ϵ_2 、 γ_1 与 γ_2 分别表示第一、第二层电介质的介电常数和电导率。

在电压刚加上的瞬间,电源电压对电容器立即充电,双层介质的界面上电位移 D 是连续的:

$$D_1 = D_2 \tag{1}$$

双层电介质中的电场强度按介电系数分布:

$$\epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2 \tag{2}$$

两层电介质上的电压为:

$$V_1 = E_1 d_1, V_2 = E_2 d_2, V = V_1 + V_2 \tag{3}$$

其中, V 为外加电压。由式(2)、(3)可得,加上电压时,两层电介质中的电场强度为:

$$E_1 = \frac{\epsilon_2 V}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1}, E_2 = \frac{\epsilon_1 V}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} \tag{4}$$

双层电介质中的电流密度可表示为:

$$J_1(t) = \gamma_1 E_1(t), J_2(t) = \gamma_2 E_2(t) \tag{5}$$

由于它们是不相等的,所以将会有电荷积聚在界面上。积聚在界面上的电荷又将使双层介质中的电场发生变化,电场的改变引起电流的变化,这一过程直到双层介质中的传导电流相等,界面上电荷的积聚停止时才结束,最终达到稳定状态。所以,在稳定时,双层介质中的电场强度按电导率分布:

$$\gamma_1 E_1 = \gamma_2 E_2 \tag{6}$$

这时,第一层和第二层介质中的电场强度分别为:

$$E_1 = \frac{\gamma_2 V}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1}, E_2 = \frac{\gamma_1 V}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1} \tag{7}$$

因为双层电介质界面上的全电流密度必须连续,所以:

$$J = \gamma_1 E_1 + \epsilon_0 \epsilon_1 \frac{dE_1}{dt} = \gamma_2 E_2 + \epsilon_0 \epsilon_2 \frac{dE_2}{dt} \tag{8}$$

式中, $\epsilon_0 \epsilon_1 \frac{dE_1}{dt}$ 和 $\epsilon_0 \epsilon_2 \frac{dE_2}{dt}$ 分别为第一、二层电介质中的位移极化电流密度。

注意到式(3),将式(7)代入式(8),消去 E_2 , 且 $\frac{dE_1 d_1}{dt} = -\frac{dE_2 d_2}{dt}$, 得:

$$\frac{dE_1}{dt} + \frac{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1}{\epsilon_0 \epsilon_1 d_2 + \epsilon_0 \epsilon_2 d_1} E = \frac{\gamma_2}{\epsilon_0 \epsilon_1 d_2 + \epsilon_0 \epsilon_2 d_1} V \tag{9}$$

设, $\tau = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 d_2 + \epsilon_0 \epsilon_2 d_1}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1}$, τ_0 为时间常数, 式(9)可变为:

$$\frac{dE_1}{E - \frac{\gamma_2}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1} V} = -\frac{1}{\tau} dt \tag{10}$$

积分以后,根据初始条件可得:

$$E_1 = \frac{\gamma_2}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1} V + \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} - \frac{\gamma_2}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1} \right) V e^{-t/\tau} \quad (11)$$

同理求得:

$$E_2 = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1} V + \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} - \frac{\gamma_1}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1} \right) V e^{-t/\tau} \quad (12)$$

将式(10)、式(11)代入式(5),得到双层电介质的电流密度为:

$$J_1 - J_2 = \frac{\gamma_1 \epsilon_2 - \gamma_2 \epsilon_1}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} V e^{-t/\tau} \quad (13)$$

双层电介质面积积聚的电荷密度为:

$$\int_0^\infty (J_1 - J_2) dt = \frac{\epsilon_0 (\gamma_1 \epsilon_2 - \gamma_2 \epsilon_1)}{\gamma_2 d_1 + \gamma_1 d_2} V \quad (14)$$

由此可见,介面上积聚电荷的多少由 $\gamma_1 \epsilon_2 - \gamma_2 \epsilon_1$ 的值、电介质施加电压以及 $\gamma_2 d_1 + \gamma_1 d_2$ 的值 3 个因素决定。 $\gamma_1 \epsilon_2 - \gamma_2 \epsilon_1$ 的值越小则累积电荷越小,当 $\gamma_1 \epsilon_2 - \gamma_2 \epsilon_1 = 0$ 时,电介质界面将不累积电荷;驱动电压越低则累积电荷越小;电介质的电导率越大、 $\gamma_2 d_1 + \gamma_1 d_2$ 值越大,则累积电荷越少。

2.2 慢电荷的释放

上面的计算过程仅能说明 PI 层电荷聚集的原因,要解释聚集电荷的缓慢释放还需要用到电介质的慢极化自由弛豫理论。慢电荷的释放过程如图 2 所示。介电慢效应与物质的体系自由边界有关,实验研究证明,慢极化效应来源于电介质的二级和三级结构带的束缚空间电荷或局域偶极矩的运动^[3]。有关线型参数^[4]和响应时间^[5]的理论实验证明,慢效应和样品的形状尺寸有关。

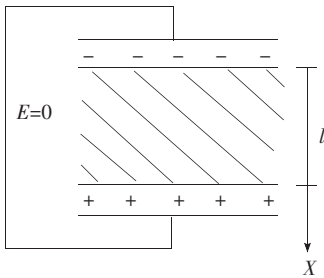


图 2 慢电荷释放过程

Fig. 2 Release of slow charge

介质的慢极化强度^[6]为:

$$P_0 = eN_0 = en_0 l \quad (15)$$

两电极短路,使快极化电荷消失,外电场为 0,此时体系的非热平衡空间电荷初始态分布:

$$t = 0, n(x, t) = n_0, N(t) = N_0 \quad (16)$$

经足够长时间,体系回复到平衡态时:

$$t = \infty, n(x, t) = 0, N(t) = 0 \quad (17)$$

电位移的等效扩散方程为:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \quad (18)$$

利用边界条件:

$$x = 0, n(x, t) = 0 \quad (19)$$

式(15)~(19)可以用来描述体系中的非平衡态正空间电荷的扩散。一般来说,正空间电荷与等效扩散系数 D 相差很大,故简化处理时可以只考虑一种扩散机构。若 l 较大,则可以认为 $n_0 = N_0/l$ 有确定的值。做 Laplace 变换:

$$\bar{n}(x, s) = \int_0^\infty n(x, t) e^{-st} dt \quad (20)$$

令 $m(x, t) = n_0 - n(x, t)$, 带入式(16)、(18)、(19),得到:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D \frac{\partial^2 m}{\partial x^2} \quad (21)$$

$$m(x, 0) = 0, m(0, t) = n_0 \quad (22)$$

做 Laplace 变换,计算得到:

$$\bar{m}(x, s) = D \frac{d^2}{dx^2} \bar{m}(x, s) \quad (23)$$

$$\text{且: } \bar{m}(0, s) = \int_0^\infty m(0, t) e^{-st} dt = \frac{n_0}{s} \quad (24)$$

$$\text{解得: } \bar{m}(x, s) = (n_0/s) \exp(-x \sqrt{s/D}) \quad (25)$$

做逆 Laplace 变换得到:

$$m(x, t) = n_0 \operatorname{erfc}(x/2\sqrt{Dt}) \quad (26)$$

当 l 不太大时,用 $x=l$ 边界条件得到:

$$n(x, t) = n_0(t) \operatorname{erfc}(x/2\sqrt{Dt}) \quad (27)$$

负空间电荷扩展到 $x=0$ 时使介质表面极化电荷数目减少到 0:

$$dN = j(0, t) dt = -N_0 \sqrt{D} dt / l \sqrt{\pi t} \quad (28)$$

其中 $N(t) = ln_0(t)$, 可解得:

$$N(t) = N_0 \exp(-\sqrt{t/\tau}) \quad (29)$$

$$\tau = \pi l^2 / 4D \quad (30)$$

l 即电介质层的厚度,在液晶显示器中, l 为 PI 层的厚度。通过以上分析可知,PI 层厚度越小,则慢电荷释放越快。

2.3 剩余电荷

慢电荷的产生来自于物质体系的二、三级结

构,这些结构的运动需要热运动起伏能量的激活,其响应速度慢,并且高级结构有许多不同的热平衡态,不同平衡态性质各异,外作用下可使部分电荷从一个平衡态过渡到另一平衡态,外电场除去后,这些电荷在恒温下不能回到退极化态,称为剩余电荷。在温度不太高,外力作用不强时,这种状态可以长期保持下去。

Q_L 和 Q_r 都可称为慢电荷,一般的聚合物和液体^[7]中广泛存在介质的慢极化效应,它们和 Q_H 一起构成电介质极化时的总电荷。一般聚合物和液体的静态介电常数 ϵ 可以分为快介电常数 ϵ_H 和慢介电常数 ϵ_L ,一般 $\frac{\epsilon_L}{\epsilon_H}$ 的值在 $10^{-3} \sim 10^2$,选取

ϵ_L 值小的物质来制作液晶显示器的 PI 层,可以减少显示器显示时的图像残留时间。

3 结 论

针对液晶显示器 PI 层的电荷累积进行了计算分析。结论认为,PI 层电荷累积的大小与 $(\gamma_1\epsilon_2 - \gamma_2\epsilon_1)$ 的值和驱动电压成正比,与介质的 $(\gamma_1d_1 + \gamma_1d_2)$ 值成反比,而电荷的释放时间常数 τ 则与电介质层厚度平方成正比。为减小液晶 PI 层电荷的累积则应该使用 $(\gamma_1\epsilon_2 - \gamma_2\epsilon_1)$ 值小、 ϵ_L 值小而 γ_2 值大的材料,同时降低驱动电压;为了加快慢电荷的释放则应该降低 PI 层厚度。

参 考 文 献:

[1] Sun Yuan, Tang Jun, Wang Feng. Effect of ions trapped on the PI layer of TFT in VA mode[C]//Asia Display'07, Shanghai,China;AD,2007:54-57.

[2] 雷德铭,冷叔贤,余延胜,等. 铁电体高电阻的测量 [J]. 无机材料学报,1991,(1):5-10.

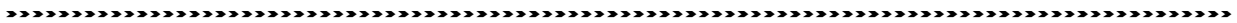
[3] 李景德,沈韩,陈敏. 电介质理论 [M]. 北京:科学出版社,2003:212-214.

[4] 李景德,陈敏. 慢效应的扩散理论 [J]. Science in China,1996,(11):1044-1049.

[5] 李景德,邓人忠,陈敏,等. 绝缘液体中空间电荷的扩散和介电谱 [J]. 物理学报,1997,6(1):155-161.

[6] 孙目珍. 电介质物理基础 [M]. 广州:华南理工大学出版社,2002:12-14.

[7] 邓颖宇,唐新桂,周镇宏,等. 电容器介质吸收电流的测量和表征 [J]. 无机材料学报,1996,11(2):337-342.



常见的废弃单位及换算因数

单位名称	符 号	换算因子
英寸	in	1 in=2.54 cm
托	Torr	1 Torr=133.322 Pa
毫米汞柱	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
毫米水柱	mmH ₂ O	1 mmH ₂ O=9.80665 Pa
西西	cc	1 cc=1 mL
熙提	sb	1 sb=10 ⁴ cd/m ²
尼特	nt	1 nt=1 cd/m ²
屈光度	D	1 D=1 m ⁻¹
体积克分子浓度	M	1 M=1 mol/L
标准大气压	atm	1 atm=101.325 kPa