

河 北 工 业 大 学

毕 业 论 文

作 者： 戴亚雨 学 号： 150074

学 院： 理学院

专 业： 应用物理学

题 目： 快速响应的纳米掺杂型液晶材料及  
驱动技术设计研究

指导者： 叶文江 副教授

评阅者：

2019 年 5 月 18 日

# 毕业论文中文摘要

## 快速响应的纳米掺杂型液晶材料 及驱动技术设计研究

### 摘要:

液晶显示器件的动力学响应特性主要取决于液晶材料的选择和器件的驱动技术。通过  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子掺杂和过电压与下冲电压驱动技术设计,分别从液晶材料的微观机制与宏观调控方式两方面入手,探究和改善液晶显示中图像残留与运动拖尾等动力学响应问题。掺杂不同浓度  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子的混合液晶材料仍然保持液晶态以及良好的温度稳定性,并相较于无掺杂的纯液晶材料具有更低的光学阈值电压,更高的双折射特性以及更短的上升和下降时间。宏观上通过采用过电压和下冲电压驱动技术能够使液晶单元实现更快的转动,使得透过率维持在所需的灰阶水平,大大缩短每个灰阶间的响应时间,上升和下降时间分别减少了 74.8% 和 21.7%。因此,结合  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子掺杂与过电压和下冲电压驱动技术能够使混合液晶材料的总响应时间减少 71.5%,响应速度相对于纯液晶材料提升了近 3 倍。

**关键词:**  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子; 液晶显示; 动态响应; 电光特性; 过电压与下冲电压

## 毕业论文外文摘要

### **Improvement of the dynamic responses of liquid crystal mixtures through $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle doping and driving mode adjustment**

#### **Abstract:**

The dynamic response property of liquid crystal (LC) devices mainly depends on the selection of LC materials and driving method of the devices. In this work, we explored the modulation of the dynamic response property of LC mixtures through the microscopic mechanism and macroscopic method of  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle doping and driving mode adjustment, respectively. LC mixtures doped with different concentrations of  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles retained the dielectric and elastic properties of the LC state and good temperature stability. In addition, doped LC mixtures had lower threshold voltage, higher birefringence, and faster rise and decay times than pure LC materials. Besides, the application of voltage overdriving and undershooting methods could reduce the rise and decay times of LC mixtures by 74.8% and 21.7%, respectively. Moreover, the combined methods of  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle doping and voltage overdriving and undershooting decreased the total response time of LC mixtures by 71.5%, and the response speed of doped LC mixtures increased by 3-fold relative to that of the pure LC materials.

**Keywords:**  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles; Liquid crystal display; Dynamic response; Electro-optical property; Voltage overdriving and undershooting

# 目 录

1 引言.....	1
1.1 液晶动力学响应研究背景.....	1
1.2 本文研究内容及意义.....	2
2 液晶材料与液晶盒.....	3
2.1 $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 纳米粒子制备、表征及与液晶材料混合 .....	3
2.2 液晶盒参数测量.....	4
3 实验与分析.....	5
3.1 液晶介电各向异性.....	5
3.2 动态响应特性.....	6
3.2.1 动态响应和电光特性.....	6
3.2.2 黏弹特性 ( $\gamma_1/k_{11}$ ) .....	8
3.2.3 双折射特性.....	10
3.2.4 品质因数 (FoM) .....	11
3.3 过电压与下冲电压驱动法.....	11
结论.....	14
参考文献.....	15
攻读学位期间所取得的相关成果.....	19
致谢.....	21

# 1 引言

## 1.1 液晶动力学响应研究背景

液晶具有晶体的各向异性和液体的流动性,在促进自适应和集成光学器件的发展方面,具有至关重要的地位,从而被广泛用于显示、相位调制,信息存储,和光通信等领域<sup>[1-3]</sup>。液晶显示器(LCD)作为一种重要的平板显示器件,由于其具有低功耗,重量轻,易驱动和分辨率高等优点,被广泛用于各种高端显示器件中<sup>[4-5]</sup>。但是,目前的向列相液晶显示器件响应时间一般较长,通常在毫秒量级,这也是限制其性能发挥的弱点所在<sup>[6-7]</sup>。随着人们对显示器件画面质量的要求越来越高,液晶显示的动力学响应问题已经成为亟待解决的问题之一。LCD 的响应时间是指在给液晶单元施加电压或是撤去电压的过程中,液晶分子从开始扭转 to 再次回到无外场驱动下能量最低的初始状态所需要的时间,这决定了显示一帧画面所需的最少时间,这决定了显示一帧画面所需的最短时间,是 LCD 的重要参数。如果 LCD 的响应时间过长,液晶材料的粘滞特性会导致每一个显示画面在各帧之间切换时产生响应延迟,后一帧画面中将会出现前一帧画面的残影,造成“重像”的运动画面和显示品质的退化,从而产生图像和视觉残留的现象,不能进行正常画面的显示。因此,为了减少运动画面模糊和运动拖尾、控制场序色彩,改善低温工作性能,实现液晶显示器件显示画面更加清晰流畅,寻求一种快速响应的液晶材料以及驱动技术显得极为重要。

通常来说, LCD 的响应速度主要取决于液晶材料的选择以及器件的驱动方法<sup>[8-13]</sup>。铁电液晶(FLC)可以自发极化,因此 FLC 在外场作用下受到的驱动力远大于普通液晶材料,从而表现出非常快的响应速度。然而 FLC 的显示模式需要具有均匀且较薄的液晶层,其工业化很难实现;双频液晶低频和高频的外加电压驱动下,其介电各向异性可正可负,即在驱动过程中始终有电场参与,因此具有较快的响应速度,但其较难合成,具有明显的温度效应且驱动电压较高,因此无法实现实用化;蓝相液晶由于其特有的扭曲双螺旋结构,具有快速响应特性,但其驱动电压过高,温度范围较窄和透明度不高等问题也限制了其工业化发展。

向列型液晶(NLC)作为当今显示领域应用最为广泛的液晶材料,具有排列简单、驱动电压低等显著优点。一般来说,可实现快速响应的 NLC 材料具有高的双折射特性和较低的黏度。在施加电压的过程中,液晶分子受到由粘滞特性以及外加电场引起

的力矩的共同作用；在撤掉电压的过程中，液晶分子又会受到自身弹性回复力以及黏度引起的力矩的共同作用。因此，不论是在施加电压的上升过程或是撤去电压的衰减过程中，液晶分子的转动均会受到液晶黏度的阻碍作用，其转动粘滞系数( $\gamma_1$ )越大，转动越困难，响应时间也就越长。另一方面，具有高双折射特性液晶化合物必然具有较长的 $\pi$ 电子共轭体系，而随着 $\pi$ 电子共轭体系长度的增加，液晶的黏度也会增加。

通过纳米粒子掺杂技术，能够很好的改善液晶材料的介电、弹性性能以及响应速度、阈值电压等光学特性。目前掺杂在液晶材料中的纳米粒子主要包括  $C_{60}$  材料，碳纳米管，金属和金属氧化物纳米粒子等<sup>[14-25]</sup>。这些纳米粒子的掺杂能够显著改善液晶材料的物理和化学性质，分散在液晶体系中的金纳米粒子能够捕获液晶体系中残留的杂质离子并对施加在液晶盒上的电压信号有分压作用，从而增强液晶的电光和动态响应特性<sup>[26]</sup>。特别的是，当在液晶中掺入铁磁性纳米粒子  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  时，利用其在外场下的磁化效应，能够更大程度的吸附分散在液晶体系中的杂质离子，此外，磁偶极子与电偶极矩之间的相互作用（**M-E** 效应）可以显著提升整个液晶体系的磁化有序度<sup>[27]</sup>，从而改善纳米掺杂混合液晶的动力学响应特性。近年来，开发新的驱动方法也是改善液晶显示动力学响应的主要研究方向之一。文献<sup>[28-29]</sup>介绍了通过在点反转驱动技术中利用电容耦合方式<sup>[28-29]</sup>调整相邻每一个像素的数据信号极性，使像素电压特性变化更均一，从而改善液晶的响应速度，但随着极性的反转，正负电荷相互抵消，意味着功耗和驱动电压的增大，因此改善效果并不明显。

## 1.2 本文研究内容及意义

本文从纳米掺杂型液晶材料以及电压驱动技术两方面入手，探究液晶材料快速响应的微观机制以及宏观调控方法。将铁磁性纳米粒子  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  掺入液晶体系中，利用纳米粒子在外场下的磁化效应，吸附分散在液晶体系中的杂质离子，提高整个液晶体系的磁化有序度；同时采用过电压与下冲电压驱动法，有效地缩短了液晶驱动时的上升时间和下降时间，实现了快速响应。结合  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子掺杂以及过电压与下冲电压驱动方法，在提升液晶系统稳定性的同时，有效改善其动态响应特性，大幅加快了液晶单元的响应速度，提升了液晶显示画面的品质。

首先采用化学诱导相变法制备铁磁性纳米粒子  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ，并对纳米颗粒表面的形貌以及团簇情况进行检测和分析，结合吸收光谱的方法，通过对纳米颗粒的吸收光谱、散射光谱等的测量来表征其光学特性。接着基于电容法，应用液晶盒电容模型及双盒

模型, 结合实验与理论分析, 综合运用电学、光学测试方法, 探究了混合液晶材料的介电、弹性性能以及双折射、动态响应等特性, 建立了一套完整的液晶材料电学与光学参量测试系统, 并对不同掺杂浓度的混合液晶材料的动力学响应性能进行评估。同时, 自主搭建实验光路并设计驱动电压波形, 采用过电压与下冲电压驱动相结合的方法, 即在施加(撤去)电压的上升(下降)过程中, 分别给液晶盒施加一个短脉冲的高(低)电压, 让液晶单元实现更快的转动, 使得透过率维持在所需的灰阶水平, 从而提升液晶单元的响应速度, 改善液晶显示中的响应速度缓慢、运动画面拖尾等动力学响应问题。

## 2 液晶材料与液晶盒

### 2.1 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米粒子制备、表征及与液晶材料混合

首先, 通过化学共沉淀法<sup>[35-36]</sup>合成前体  $\text{FeOOH}$  和  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , 将所得氢氧化物前体  $\text{FeOOH}$  与  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  用  $\text{FeCl}_2$  溶液处理,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  化合物溶解并且  $\text{FeOOH}$  脱水并转化成各向同性磁赤铁矿单晶 ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) 磁性纳米粒子, 并使用油酸对其进行表面修饰处理, 从而制备出表面包裹油酸的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  复合磁性纳米粒子。实验制备所得的纳米粒子磁芯半径尺寸为 10nm, 油酸尺寸为 2nm。  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子具有电学和光学各向同性, 使用透射电子显微镜 (TEM) 表征  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子的微观形态, 如图 2-1 所示。

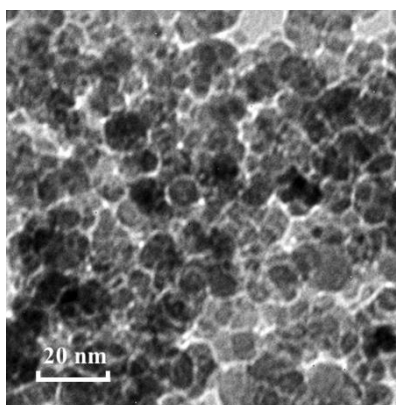


图 2-1  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子 TEM 显微照片

$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子掺杂液晶分为三个阶段。首先, 将制备所得的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子混合到正己烷(挥发性)中, 超声处理 40 分钟, 将所得混合物在 5000 rpm 下离心 30 分钟以获得稳定的磁性胶体; 然后将少量的(通过胶体密度计算质量百分比,  $\phi_m=1\%$

[37]) 磁性胶体混合到液晶材料中, 超声处理 30 分钟; 最后将混合物暴露于低真空环境, 使正己烷自然挥发, 得到掺杂有  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子的液晶混合物[38]。

图 2-2 表示在偏光显微镜(POM)下分别观察无掺杂的纯液晶材料与掺杂 0.11wt%  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米颗粒混合液晶的开态和关态微观照片, 对比图 2-2(a)、(b) 和 (c)、(d)可知, 掺杂  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子的液晶材料没有发生团簇、聚集和漏光的情况, 仍然表现出较好的取向。如图 2-3 所示为平行向列相 (PAN) 液晶盒在可见光范围 (380nm-780nm) 内透过率随波长的变化曲线, 由图可知  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子很好地分散在混合液晶中, 没有造成液晶盒透过率的损失。

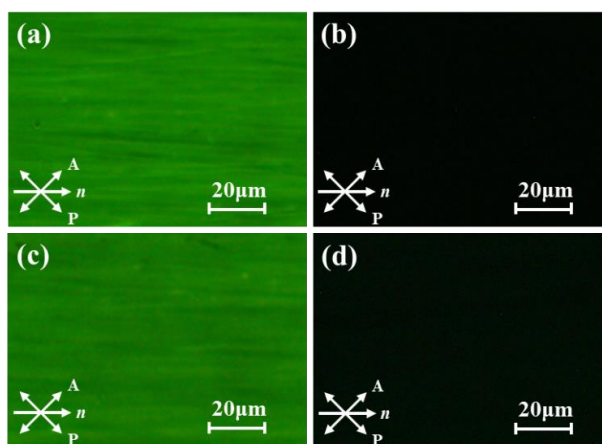


图 2-2 不同  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子掺杂浓度(a), (b): 0.00wt%; (c), (d): 0.11wt% 的 PAN 液晶盒在开态(b), (d)和关态(a), (c)下的 POM 显微照片

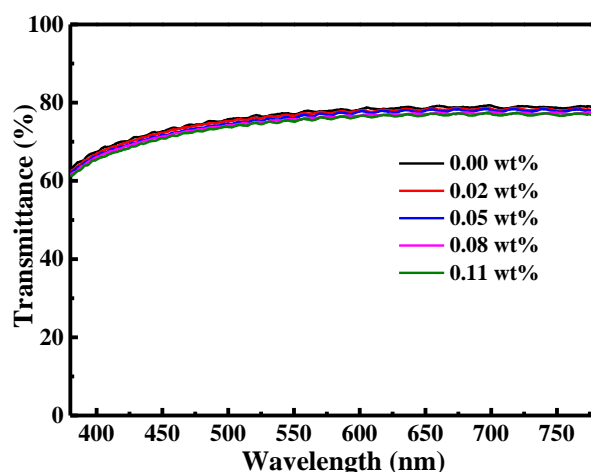


图 2-3 掺杂不同浓度的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子的 PAN 液晶盒透过率随波长变化曲线

## 2.2 液晶盒参数测量

实验中使用的 PAN, 垂直排列向列相 (VAN) 和扭曲向列相 (TN) 液晶盒均由河北冀雅电子有限公司提供。PAN, VAN 和 TN 液晶盒盒厚以及上下玻璃基板表面的



聚酰亚胺（PI）取向层厚度分别是由紫外可见分光光度计（METASH UV-9000S）和非接触表面轮廓仪（Contor GK-T）测量，测量结果如表 2-1 所示。三种液晶盒上、下基板的预倾角同为  $1.5^\circ$ 、 $88.5^\circ$  和  $1.5^\circ$ ，上、下基板的氧化铟锡（ITO）电极均为直径 1cm 的圆形区域，PI 层介电常数均为 3.1。

表 2-1 液晶盒盒厚与 PI 层厚度

	盒厚/ $\mu\text{m}$	平行取向 PI 厚度(nm)	垂直取向 PI 厚度(nm)
PAN 盒	7.356	49.7	---
VAN 盒	3.967	---	14.8
TN 盒	7.885	69.8	---

### 3 实验与分析

#### 3.1 液晶介电各向异性

液晶显示的动力学响应特性与其介电各向异性和弹性性能有关，增大液晶材料的介电各向异性或降低弹性常数可以降低液晶的驱动电压，但较小的弹性常数由于存在较弱的复转扭矩，会导致液晶的响应速度变慢，因此，在降低液晶显示驱动功耗的同时提升液晶的响应速度，需要选取具有适中的介电各向异性和黏弹比系数（ $\gamma_1/k_{11}$ ）的液晶材料。基于电容法，运用液晶盒电容模型和双盒模型<sup>[39-41]</sup>分别测量低电压（小于阈值电压）下的 PAN 盒和高电压（高于饱和电压）下的 VAN 盒的电容来测量掺杂  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子的混合液晶材料介电各向异性。由于液晶材料的介电各向异性受温度影响，其电容值会随着温度的变化而变化，因此实验中需要使用精密热台（LTS 350）严格控制液晶盒的温度，再通过精密 LCR 表（Agilent E4980A）改变施加在液晶盒上的电压值测得液晶盒的电容。首先控制实验温度，对精密 LCR 表进行开路和短路的初始化校准；接着在液晶盒两端分别夹上两只金属引线腿，连接导线后与精密 LCR 表相连，实验中为了避免导线过长引起损耗的增大而对测量值产生影响，因此控制连接的导线尽可能短；最后固定施加在液晶盒上的电压频率为 1kHz，改变电压值，分别测量 PAN 盒以及 VAN 盒的液晶盒电容值。

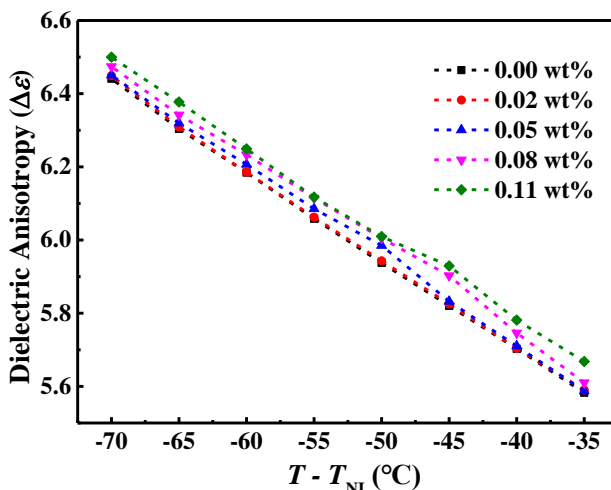


图 3-1 掺杂不同浓度  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子混合液晶材料的介电各向异性随温度的变化

图 3-1 表示在  $T - T_{NI} = -70^\circ\text{C}$  至  $T - T_{NI} = -35^\circ\text{C}$  的温度范围内, 掺杂不同浓度的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子的混合液晶材料的介电各向异性 ( $\Delta\epsilon$ ) 与  $T - T_{NI}$  的关系曲线。实验结果表明, 掺杂  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子的混合液晶材料仍然能够保持液晶状态的介电各向异性以及较好的温度稳定性。此外, 当  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米颗粒的掺杂浓度从 0.02 wt% 增加到 0.11 wt% 时, 混合液晶材料的介电各向异性略微增加。随着温度在  $T - T_{NI} = -70^\circ\text{C}$  增加到  $T - T_{NI} = -35^\circ\text{C}$  时,  $\Delta\epsilon$  以近似线性方式降低。

## 3.2 动态响应特性

### 3.2.1 动态响应和电光特性

纳米掺杂混合液晶材料的动态响应特性测试装置如图 3-2 所示。控制起偏器透光轴方向与 PAN 盒基板摩擦方向成  $45^\circ$ , 检偏器与起偏器透光轴方向相互正交, 选用波长  $\lambda=632.8\text{nm}$  的红激光, 使用衰减器衰减入射激光的强度, 通过可调光阑或者小孔来得到聚集程度较好的激光束。使用信号发生器为液晶盒施加所需要的外部驱动电压, 而由于信号发生器能够产生的电压幅值大小有限, 因此需要通过在液晶盒和信号发生器之间使用高压放大器来达到实验所需的电压幅值。利用  $\lambda/4$  波片将激光器出射的固定偏振方向的线偏振光变成圆偏振光, 之后再使用一个偏振片将圆偏振光变成线偏振光, 通过调整这个偏振片就可以得到任意偏振方向的线偏振光。

调制圆偏振光的具体方法如下: 首先将偏振片  $P_0$  放置在 He-Ne 激光器后面, 并调节  $P_0$  的透光轴方向使得激光通过  $P_0$  后透射光强达到最大; 然后在  $P_0$  后放置另一块偏振片  $P_1$ , 调节  $P_1$  使得其透光轴方向与  $P_0$  相互垂直, 这时激光经由两偏振片偏振后实现消光; 接着将  $\lambda/4$  波片放置在两偏振片  $P_0$  和  $P_1$  之间, 并旋转  $\lambda/4$  波片方向同样

实现消光；最后将  $\lambda/4$  波片再旋转  $45^\circ$ ，此时通过  $\lambda/4$  波片出射的激光即为圆偏振光。

由于液晶的双折射效应，激光穿过液晶盒后，液晶分子在电压驱动下发生随时间改变的形变，其透过光强会发生变化，用示波器接收检偏器右侧的光探测器接收到的光强信号。施加在 PAN 盒上的电压信号振幅为  $V_0 = 1.41 \text{ V}$ ，周期  $1000 \text{ ms}$ ，控制实验温度  $25^\circ\text{C}$ 。不同  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子掺杂浓度液晶响应时间与电光特性曲线分别如图 3-3 和图 3-4 所示。

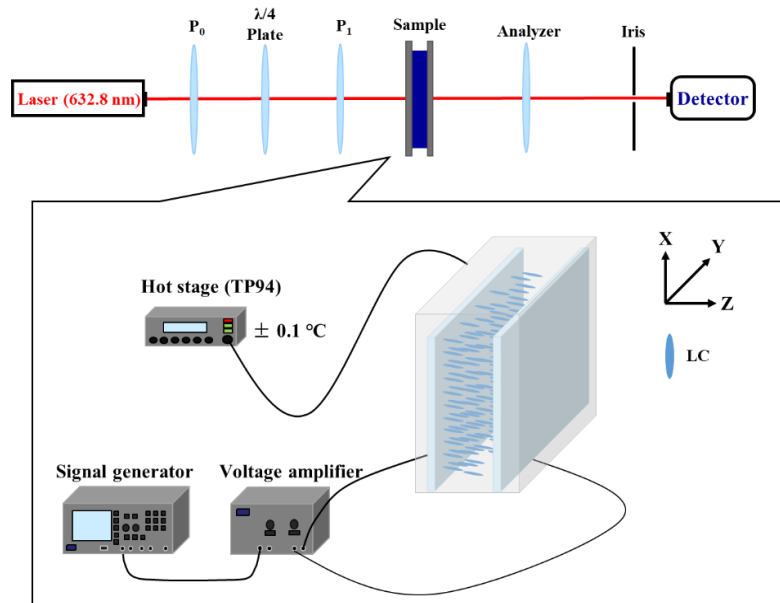


图 3-2 液晶动态响应实验光路图

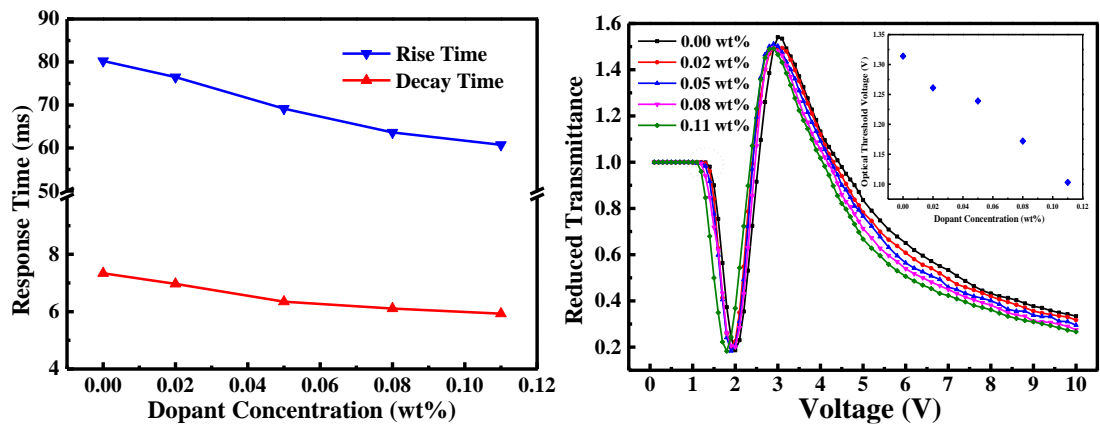


图 3-3 不同  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子掺杂浓度液晶的上升与下降时间

图 3-4 不同  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子掺杂浓度液晶的电光特性曲线

结果表明，掺杂  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子后，混合液晶材料的液晶动态响应及电光特性均得到较大程度的提升，如图 3-3 所示。随着  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  掺杂浓度的增加，液晶的上升和下降时间均得到一定程度的改善。当掺杂浓度达到  $0.11 \text{ wt\%}$  时，液晶单元的上升和下降时间分别降低  $24.3\%$  和  $19.2\%$ 。对于未掺杂的纯液晶材料，其中的杂质离子会分

散并聚集在液晶盒上下基板 PI 取向层上。当施加电压时，取向层上聚集的杂质离子会阻碍基板表面的液晶分子的运动，从而导致显示时的漏光现象，引起运动画面的模糊和拖尾。当在液晶体系中掺入  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子后，施加电场时纳米粒子发生磁化，能够吸附残留在液晶体系中的杂质离子，从而大大减少了聚集在 PI 取向层上以及分散在液晶体系中的杂质离子，如图 3-5 所示。杂质离子的吸附与去吸附过程可以通过 Langmuir 吸附等温线来评估<sup>[42-44]</sup>，从理论上建立离子动力学模型来研究纳米粒子对液晶系统中杂质离子的吸附作用。此外，磁偶极子和电偶极矩之间的相互作用提升了液晶分子主轴方向水平分量的有序程度，从而整个液晶系统的磁化有序度都得到了提升。因此，掺杂  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子的液晶单元在外界交变电场的驱动下，其动态响应速度和电光特性大大提高<sup>[45-46]</sup>。

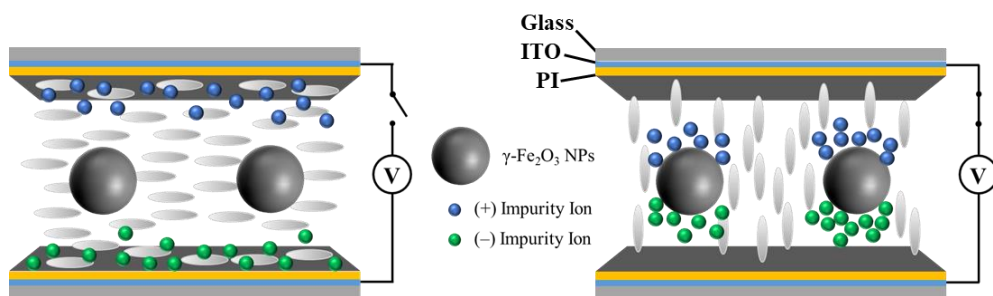


图 3-5 外加电压下  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子吸附杂质离子的微观机制

随着  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子掺杂浓度的增加，混合液晶材料的光学阈值电压有所降低，其电光特性曲线如图 3-4 所示。当掺杂浓度达到 0.11wt% 时，混合液晶材料的光学阈值电压为降至 1.103V，而无掺杂的纯液晶材料光学阈值电压为 1.314V。即当  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子的掺杂浓度从 0.02wt% 增加至 0.11wt% 时，混合液晶的光学阈值电压相对于纯液晶材料降低了 16.1%。此外，随着掺杂浓度的提升，液晶的电光曲线陡度也具有一定程度的改善，能够有效减少液晶显示中的串扰问题。

### 3.2.2 黏弹特性 ( $\gamma_1/k_{11}$ )

在施加电压的上升过程中，液晶分子受到由黏度和弹性形变引起的力矩以及电场的共同作用，在撤掉电压的下降过程中，液晶又会受到弹性回复力和黏度引起的力矩的影响。因此，不论是在施加电压的上升过程或是撤去电压的下降过程中，液晶分子的转动均会受到液晶黏度以及弹性回复力的作用，其黏弹比系数 ( $\gamma_1/k_{11}$ ) 越大，转动越困难，响应时间也就越长。

当忽略回流和惯性效应时，液晶指向矢重新取向的动态响应特性可以通过以下

Erickson-Leslie 方程<sup>[47]</sup>描述:

$$\gamma_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} = (k_{11} \cos^2 \theta + k_{33} \sin^2 \theta) \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + (k_{33} - k_{11}) \sin \theta \cos \theta \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 + \varepsilon_0 \Delta \varepsilon E^2 \sin \theta \cos \theta, \quad (3-1)$$

其中  $\gamma_1$  是液晶的转动粘滞系数,  $k_{11}$  和  $k_{33}$  分别是展曲和弯曲弹性常数,  $\Delta \varepsilon$  为介电各向异性,  $\varepsilon_0 \Delta \varepsilon E^2$  是电场的能量密度,  $\theta$  是液晶指向矢的倾角。

一般来说, 方程(3-1)只有数值解, 然而当倾角足够小 ( $\sin \theta \approx \theta$ ) 和  $k_{11} \approx k_{33}$  时, Erickson-Leslie 方程可以通过小角度近似简化如下:

$$\gamma_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} = k_{11} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \varepsilon_0 \Delta \varepsilon E^2 \theta. \quad (3-2)$$

在这种情况下, 光学下降时间  $\tau_{\text{decay}}$  具有简单的解析解,  $\tau_{\text{decay}}$  与指向矢下降时间  $\tau_0$  具有近似的系数关系<sup>[48]</sup>, 动态响应中液晶下降时间的公式可表示如下:

$$\tau_{\text{decay}} = \frac{\tau_0}{2} \ln(3) \approx 0.55 \frac{\gamma_1 d^2}{\pi^2 k_{11}}. \quad (3-3)$$

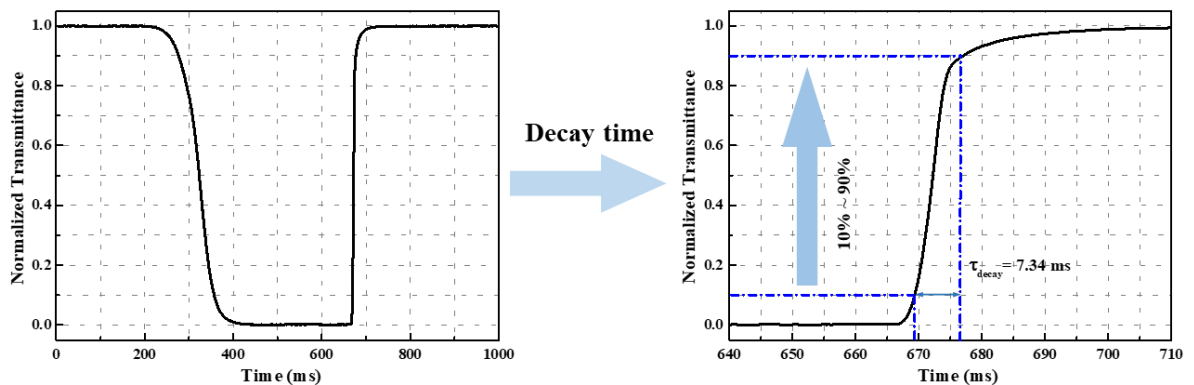


图 3-6 纯液晶动态响应特性曲线

如图 3-6 所示, 无掺杂的纯液晶材料光学下降时间  $\tau_{\text{decay}}=7.34 \text{ ms}$ 。对于掺杂不同浓度  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子的混合液晶材料, 其黏弹特性和动态响应均得到了一定程度的改善, 如表 3-1 所示。

表 3-1 掺杂不同浓度的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子的混合液晶材料黏弹系数和响应时间

	1	2	3	4	5
掺杂浓度 (wt%)	0.00	0.02	0.05	0.08	0.11
$\gamma_1/k_{11}$ ( $10^9 \text{ s/m}^2$ )	2.40	2.29	2.07	2.00	1.95
响应时间 (ms)	87.57	83.46	75.51	69.74	66.66
降低程度	---	-4.69%	-13.77%	-20.36%	-23.88%

由表 3-1 可知,  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子的掺杂对液晶的响应速度有一定提升, 当少量铁磁性纳米粒子  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  掺杂到液晶体系中, 由于外加交变电场的激发纳米粒子的磁化作用, 提升了整个液晶系统的磁化有序度, 弹性回复力以及黏度所引起的力矩变小, 因此黏弹比系数  $\gamma_1/k_{11}$  随着掺杂浓度的升高而减小, 液晶分子在外场作用下更易驱动, 响应速度也随着掺杂浓度的升高得到了很大的提升。

### 3.2.3 双折射特性

双折射特性是液晶材料的重要特性, 可实现快速响应的液晶材料通常具有较高的双折射特性, 因此需要进一步探究掺杂  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子对混合液晶双折射特性的影响。PAN 液晶盒置于两个两块偏振方向相互垂直的正交偏振片之间, 液晶盒的透过率表达式为:

$$T = \sin^2(2\chi) \sin^2\left(\frac{\pi \Delta n d}{\lambda}\right), \quad (3-4)$$

其中,  $\chi$  为偏振片的透光轴方向与液晶层光轴平面的夹角,  $\Delta n$  为液晶的双折射率,  $d$  为液晶盒厚,  $\lambda$  为入射激光波长大小。令  $\chi = \pi/4$ , 因此光入射到液晶层后只会产生相位延迟量的变化。理论推导液晶双折射率的微观表达式, 将不可测得的微观量宏观化, 得到液晶双折射率近似的宏观表达式<sup>[49]</sup>

$$\langle n^2 \rangle + 2 \approx \sqrt{10} \langle n \rangle - 0.5, \quad (3-5)$$

其中  $\langle n^2 \rangle = (n_e^2 + 2n_o^2)/3$  与  $\langle n \rangle = (n_e + 2n_o)/3$ , 分别对应于  $n^2$  和  $n$  的统计平均值, 并与  $\Delta n = n_e - n_o$  联立可得  $n_e$  和  $n_o$ 。

对于各向同性介质的液晶材料, 有两个主折射率, 非寻常光折射率  $n_e$  和非寻常光折射率  $n_o$ , 每个折射率都与相应的分子极化率  $\alpha_e$  和  $\alpha_o$  有关。在外加电场的作用下, 纳米粒子沿电场方向发生极化, 负电荷的中心向阳极一方靠近, 从而使得正电荷中心和负电荷的中心发生位置的偏离, 产生诱导偶极子, 液晶分子中易动的  $\pi$  电子的分子轨道会在分子的长轴方向延伸, 从而提高长轴方向的极化率, 因此提升了液晶系统的电极化强度, 其双折射特性也得到了一定的提升。

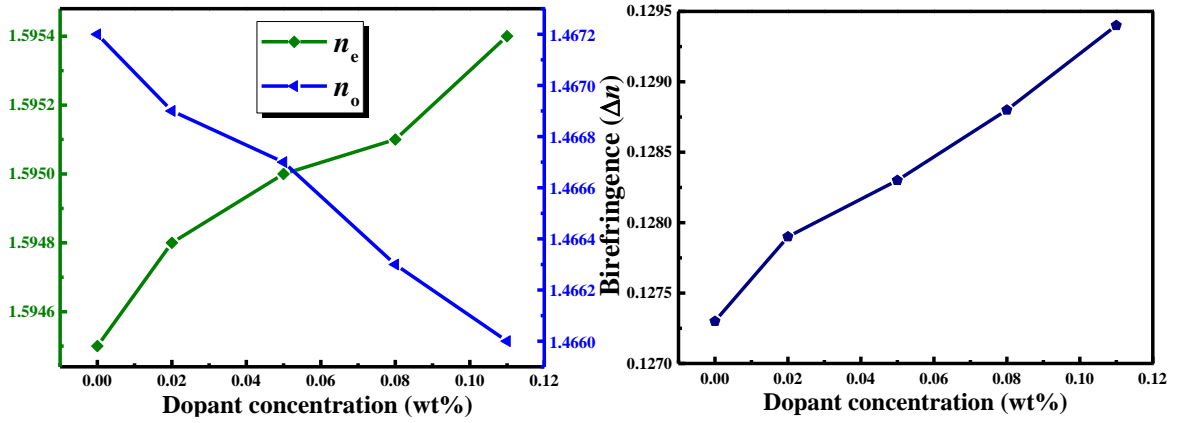


图 3-7 掺杂不同浓度的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子的 LC 混合物的双折射特性

### 3.2.4 品质因数 (FoM)

为了比较掺杂不同浓度的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子混合液晶材料的动力学响应特性，定义液晶材料的动力学响应品质因数 (FoM) 如下<sup>[50]</sup>

$$\text{FoM} = k_{11}(\Delta n)^2 / \gamma_1, \quad (3-6)$$

其中  $k_{11}$ 、 $\Delta n$  和  $\gamma_1$  分别代表 LC 材料的展曲弹性常数，双折射特性和转动粘度系数。

混合液晶材料的 FoM 随  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子掺杂浓度的变化曲线如图 3-8 所示。掺杂了少量  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子的液晶材料相比于无掺杂的纯液晶具有更低的光学阈值电压，更高的双折射特性和更低的黏弹系数比  $\gamma_1/k_{11}$ ，这些结果表明少量的掺杂能够有效改善混合液晶材料的动力学响应特性，随着掺杂浓度从 0.00wt% 增加到 0.11wt%，FoM 从  $12.2\mu\text{m}^2/\text{s}$  增加到  $15.7\mu\text{m}^2/\text{s}$ 。

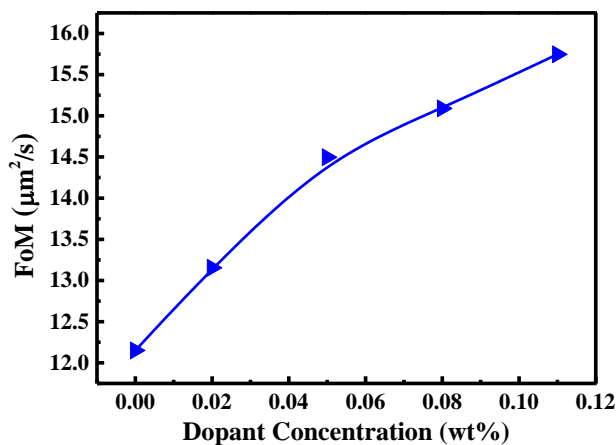


图 3-8 掺杂不同浓度的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子的混合液晶材料品质因数 FoM

## 3.3 过电压与下冲电压驱动法

当 LCD 在显示图像画面时，屏幕内容不仅仅只是黑白画面之间的切换，更多的



是五颜六色的画面或者深浅不同的层次等各个灰阶之间的转换。由于中间灰阶画面切换时的驱动电压差值没有黑白灰阶画面切换时的驱动电压差值大，所以中间灰阶之间的响应速度比黑白画面切换时的响应速度慢。因此在显示动态画面时，提升中间灰阶的响应速度就变得非常重要，如果响应速度较慢，会导致后一帧画面中将会出现前一帧画面的残影，产生画面拖尾的现象。

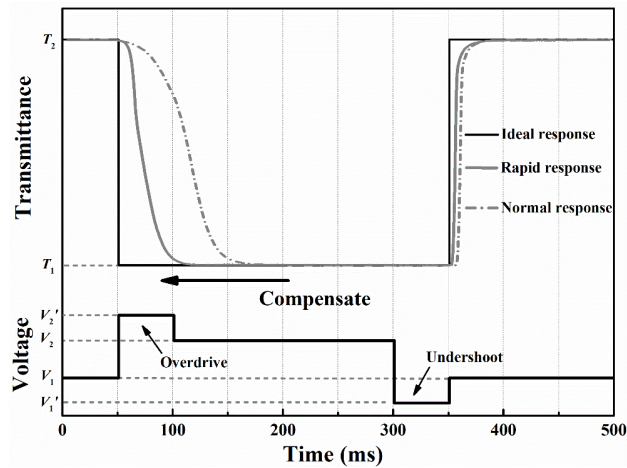
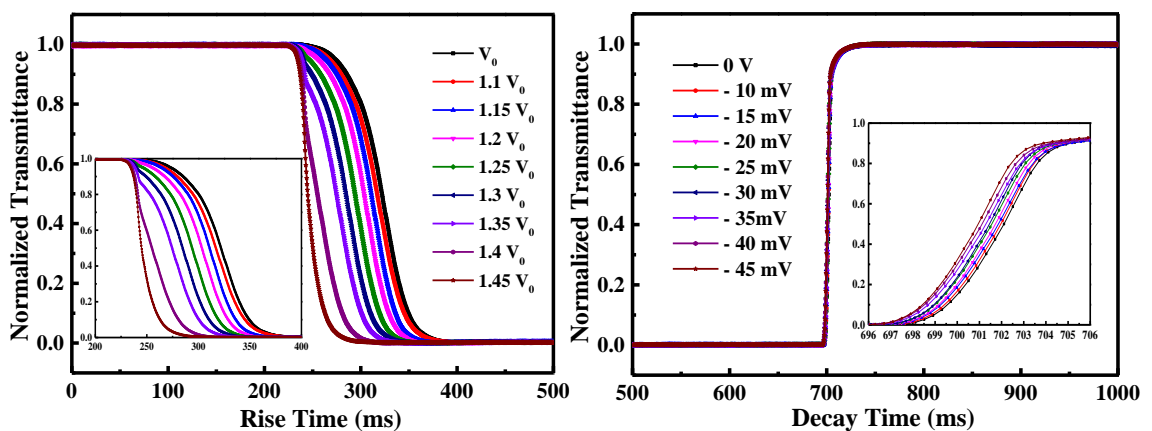


图 3-9 过电压与下冲电压驱动原理

为提升中间灰阶的响应速度，采用过电压和下冲电压相结合的驱动方法，如图 3-9 所示。在施加电压（ $V_2$ ）的上升过程中，预先在正极性写入时施加一个更高的电压（ $V_2'$ ），即给液晶盒施加一个短脉冲的高电压，让液晶单元实现更快的转动，来补偿一帧驱动难以达到的透过光，使得透过率维持在所需的灰阶水平，从而大大缩短每个灰阶间的响应时间；同时，在下降过程中，施加更低的 Undershoot 电压（ $V_1'$ ），也使得透过率维持在当前的灰阶水平，产生下冲效应。





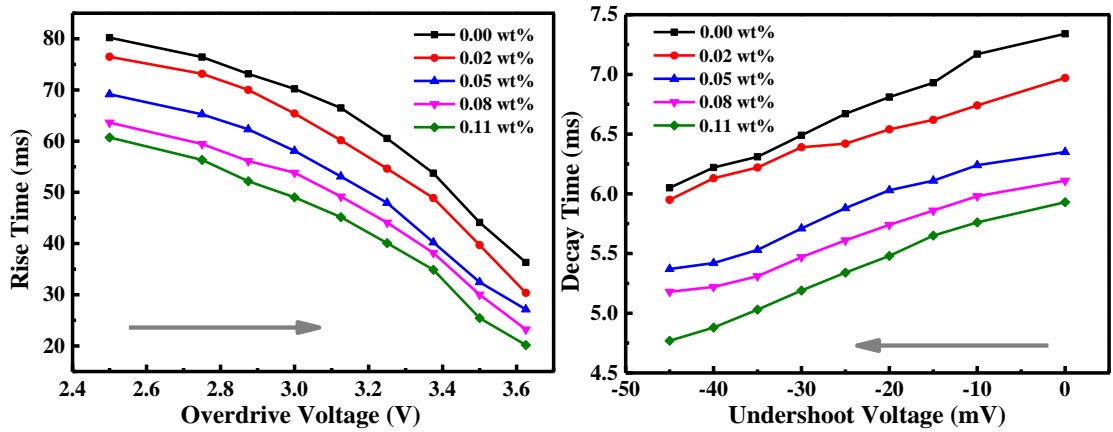


图 3-10 过电压与下冲电压驱动下不同掺杂浓度混合液晶材料的响应时间

由图 3-10 可知，对于不同掺杂浓度的混合液晶来说，随着施加的短脉冲过驱动电压的升高，液晶单元的响应速度有了显著的提升，上升时间能够降低 50%-60%，当过驱动电压达到  $1.45V_0$ ，且掺杂浓度达到 0.11wt% 时，对响应速度的改善效果达到最好，与无过压驱动且无掺杂的纯液晶相比，上升时间能够从 80.23ms 降低到 20.17ms，改善效果达到 74.8%。同时，对于下降时间，随着在下降过程中施加的下冲电压的影响，能够使得液晶单元的透过率维持在一帧驱动难以达到的灰阶水平，对下降时间也有一定的改善。当下冲电压达到 -45mV 时，下降时间达到最低，掺杂浓度最大时，改善效果最为明显，达到 21.7%。

## 结 论

本文从纳米掺杂型液晶材料以及电压驱动方式两方面入手，探究快速响应的液晶显示器件微观机制与宏观调控的最优化。通过将铁磁性纳米粒子  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  掺入液晶体系中，利用纳米粒子在外场下的磁化效应，吸附分散在液晶体系中的离子型不纯物，并通过磁偶极子与电偶极矩之间的相互作用，提高了整个混合液晶系统的磁化有序度。基于电容法，应用液晶盒电容模型和双盒模型，综合运用电学、光学测试方法，建立了一套完整的液晶材料电学与光学参量测试系统，并探究了液晶材料的介电、弹性性能以及双折射、动力学响应特性等， $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米掺杂混合液晶材料的动力学响应以及电光曲线均得到一定程度改善，响应时间和光学阈值电压分别降低 23.9% 和 11.8%。同时，结合过电压与下冲电压驱动方法，液晶单元的上升和下降时间均得到了一定程度的改善，混合液晶材料的响应时间降低了 71.5%，响应速度提高近 3 倍，为进一步提升液晶显示画面品质、开发新型液晶器件驱动技术及显示模式提供实验基础与技术支撑。

## 参 考 文 献

- [1] Wu S T, Yang D K. Fundamentals of Liquid Crystal Devices, 1st ed. John Wiley & Sons, Ltd. 2014.
- [2] Liu C Y, Chen L W. Tunable photonic-crystal waveguide Mach-Zehnder interferometer achieved by nematic liquid-crystal phase modulation. *Opt. Express*. 2004, 12(12): 2616-2624.
- [3] Heilmeyer G H, Goldmacher J E. A new electric field controlled reflective optical storage effect in mixed liquid crystal systems. *Appl. Phys. Lett.* 1968, 13(4): 132-133.
- [4] Decker M, Kremers C, Minovich A, et al. Electro-optical switching by liquid-crystal controlled metasurfaces. *Opt. Express*. 2013, 21(7): 8879-8885.
- [5] Calero V, Garc ía Mart ínez P, Albero J, et al. Liquid crystal spatial light modulator with very large phase modulation operating in high harmonic orders. *Opt. Lett.* 2013, 38(22): 4663-4666.
- [6] Wu S T. Nematic liquid crystal modulator with response time less than 100  $\mu$ s at room temperature. *Appl. Phys. Lett.* 1990, 57(10): 986-988.
- [7] Rao L, Gauza S, Wu S T. Low temperature effects on the response time of liquid crystal displays. *Appl. Phys. Lett.* 2009, 94: 071112.
- [8] Chen Y, Ya J, Sun J, et al. A microsecond-response polymer-stabilized blue phase liquid crystal. *Appl. Phys. Lett.* 2011, 99(20): 201105.
- [9] Lin X W, Hu W, Hu X K, et al. Fast response dual-frequency liquid crystal switch with photo-patterned alignments. *Opt. Lett.* 2012, 37(17): 3627-3629.
- [10] Yan J, Li Y, Wu S T. High-efficiency and fast-response tunable phase grating using a blue phase liquid crystal. *Opt. Lett.* 2011, 36(8): 1404-1406.
- [11] Fan Y H, Ren H, Liang X, et al. Dual-frequency liquid crystal gels with submillisecond response time. *Appl. Phys. Lett.* 2004, 85(13): 2451-2453.
- [12] Chen C C, Chiang W F, Tsai M C, et al. Continuously tunable and fast-response terahertz metamaterials using in-plane-switching dual-frequency liquid crystal cells. *Opt. Lett.* 2015, 40(9): 2021-2024.
- [13] Chen Y, Xu D, Wu S T, et al. A low voltage and submillisecond-response polymer-stabilized blue

- phase liquid crystal. *Appl. Phys. Lett.* 2013, 102(14): 141116.
- [14] Dierking I, Scalia G, Morales P, et al. Aligning and reorienting carbon nanotubes with nematic liquid crystals. *Adv. Mater.* 2004, 16(11): 865–869.
- [15] Choi Y C, Lee J W, Lee S K, et al. The high contrast ratio and fast response time of a liquid crystal display lit by a carbon nanotube field emission backlight unit. *Nanotechnology.* 2008, 19(23): 235306.
- [16] Jeon S Y, Park K A, Baik I, et al. Dynamic response of carbon nanotubes dispersed in nematic liquid crystal. *Nano.* 2007, 2(1): 41-49.
- [17] Khoo I C, Ding J, Zhang, Y, et al. Supra-nonlinear photorefractive response of C<sub>60</sub> and single-wall carbon nanotube-doped nematic liquid crystal. *Appl. Phys. Lett.* 2003, 82(21): 3587-3589.
- [18] Ganguly P, Kumar A, Tripathi S, et al. Faster and highly luminescent ferroelectric liquid crystal doped with ferroelectric BaTiO<sub>3</sub> nanoparticles. *Appl. Phys. Lett.* 2013, 102(22): 222902.
- [19] Tripathi S, Ganguly P, Haranath D, et al. Optical response of ferroelectric liquid crystals doped with metal nanoparticles. *Appl. Phys. Lett.* 2013, 102(6): 063115.
- [20] Chung H K, Park H G, Ha Y S, et al. Superior electro-optic properties of liquid crystal system using cobalt oxide nanoparticle dispersion. *Liq. Cryst.* 2013, 40(5): 632-638.
- [21] Cho M J, Park H G, Jeong H C, et al. Superior fast switching of liquid crystal devices using graphene quantum dots. *Liq. Cryst.* 2014, 41(6): 761-767.
- [22] Gao L, Dai Y Y, Li T, et al. Enhancement of image quality in LCD by doping  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles and reducing friction torque difference. *Nanomaterials.* 2018, 8(911): 8110911.
- [23] Shivakumar U, Mirzaei J, Feng X, et al. Nanoparticles: complex and multifaceted additives for liquid crystals. *Liq. Cryst.* 2011, 38(11): 1495-1514.
- [24] Choudhary A, Singh G, Biradar A M. Advances in gold nanoparticle – liquid crystal composites. *Nano.* 2014, 6(14): 7743-7756.
- [25] Christophe B, Delphine C, Emmanuelle L. Ordering nano-and microparticles assemblies with liquid crystals. *Liq. Cryst. Rev.* 2013, 1(2): 83-109.
- [26] Podgornov F V, Gavril'yak M, Karaawi A, et al. Mechanism of electrooptic switching time enhancement in ferroelectric liquid crystal/gold nanoparticles dispersion. *Liq. Cryst.* 2018, 45(11): 1594-1602.
- [27] Vimal T, Pandey S, Gupta S K, et al. Manifestation of strong magneto-electric dipolar coupling in

- ferromagnetic nanoparticles–FLC composite: evaluation of time-dependent memory effect. *Liq. Cryst.* 2017, 45(6): 687-697.
- [28] Nanno Y, Maeda H, Yamamoto E, et al. An advanced capacitively coupled driving method for TFT-LCDs. *J. Soc. Inf. Display.* 2012, 2(3): 143-147.
- [29] Chan S H, Wu T X, Nguyen T Q. Comparison of Two Frame Rate Conversion Schemes for Reducing LCD Motion Blurs. *IEEE Signal Proc Lett.* 2010, 17(9): 783-786.
- [30] Love G D, Thalhammer G, Padgett MJ, et al. Speeding up liquid crystal SLMs using overdrive with phase change reduction. *Opt. Express* 2013, 21(2): 1779-1797.
- [31] Cho Y, Park C, Bhowmik A, et al. New overdrive technology for liquid-crystal displays with a simple architecture. *Opt. Eng.* 2010, 49(3): 770-775.
- [32] Kim J W, Choi T H, Yoon T H, et al. Superfast Low-Temperature Switching of Nematic Liquid, Crystals Using Quasi-Impulsive Driving and Overdrive. *J. Disp. Technol.* 2017, 12(1): 17-21.
- [33] Wu S T, Wu C S. Small angle relaxation of highly deformed nematic liquid crystals. *Appl. Phys. Lett.* 1988, 53(19): 1794-1796.
- [34] Sayyah K, Wu C S, Wu S T, et al. Anomalous liquid crystal undershoot effect resulting in a nematic liquid crystal-based spatial light modulator with one millisecond response time. *Appl. Phys. Lett.* 1992, 61(8): 883-885.
- [35] Wen B C, Li J, Lin Y Q, et al. A novel preparation method for  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  nanoparticles and their characterization. *Mater. Chem. Phys.* 2011, 128(1): 35-38.
- [36] Zhang T, Meng X S, He ZH, et al. Preparation of magnetic nanoparticles via chemically induced transition: Role of treating solution's temperature. *Nanomaterials.* 2017, 7(8): 7080220.
- [37] Meng X, Qiu X, Zhao J, et al. Synthesis of ferrofluids using a chemically induced transition method and their characterization. *Colloid Polym Sci.* 2019, 297(2): 297-305.
- [38] Podoliak N, Buchnev O, Bavykin D V, et al. Magnetite nanorod thermotropic liquid crystal colloids: Synthesis, optics and theory. *J Colloid Interf Sci.* 2012, 386(1): 158-166.
- [39] Ye W J, Yuan R, Dai Y Y, et al. Improvement of Image Sticking in Liquid Crystal Display Doped with  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  Nanoparticles. *Nanomaterials* 2018, 8(1): 8010005.
- [40] Jiao M Z, Ge Z B, Song Q, et al. Alignment layer effects on thin liquid crystal cells. *Appl. Phys. Lett.* 2008, 92(6): 061102.

- [41] Dai Y Y, Gao L, Chang Y K, et al. Dielectric and elastic properties of fluorine-containing tricyclic isothiocyanate liquid crystal. *Liq. Cryst.* 2018, 1540066.
- [42] Garbovskiy Y. Time-dependent electrical properties of liquid crystal cells: unravelling the origin of ion generation. *Liq. Cryst.* 2018, 45(10): 1540-1548.
- [43] Garbovskiy Y. Ions in liquid crystals doped with nanoparticles: conventional and counterintuitive temperature effects. *Liq. Cryst.* 2017, 44(9): 1402-1408.
- [44] Garbovskiy Y. Adsorption/desorption of ions in liquid crystal nanocolloids: the applicability of the Langmuir isotherm, impact of high electric fields and effects of the nanoparticle's size. *Liq. Cryst.* 2016, 43(6): 853-860.
- [45] Dai Y Y, Gao L, Wang M H, et al. Improvement of the dynamic responses of liquid crystal mixtures through  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  nanoparticle doping and driving mode adjustment. *Liq. Cryst.* 2019, 1593529.
- [46] Gao L, Dai Y Y, Li T, et al. Enhancement of Image Quality in LCD by Doping  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  Nanoparticles and Reducing Friction Torque Difference. *Nanomaterials*, 2018, 8(11): 8110911.
- [47] Soref R A. Field effects in nematic liquid crystals obtained with interdigital electrodes. *J. Appl. Phys.* 1974, 45(12): 5466-5468.
- [48] Wang H, Wu T X, Zhu X, et al. Correlations between liquid crystal director reorientation and optical response time of a homeotropic cell. *J. Appl. Phys.* 2004, 95(10): 5502-5508.
- [49] Gauza S, Wen C H, Tan B, et al. 46.1: UV - Stable High - Birefringence Low - Viscosity Isothiocyanate Liquid Crystals and Application to 50- $\mu\text{sec}$  Response Switching Device. Blackwell Publishing Ltd. 2004.
- [50] Li J, Wu S T. Self-consistency of Vuks equations for liquid-crystal refractive indices. *J. Appl. Phys.* 2004, 96(11): 6253-6258.

## 攻读学位期间所取得的相关成果

### 1. 主持或参加科研与创新训练项目

- [1] 大学生创新创业国家级重点项目, 201810080001, 快速响应的纳米掺杂型液晶材料及驱动技术设计研究, 2018/6-2019/5, 1 万元, 已结题, 主持.
- [2] 大学生创新创业校级培育项目, 201710080289, 基于迈克尔逊干涉原理液晶双折射率的实验测量研究, 2017/6-2018/5, 5 百元, 已结题, 主持.
- [3] 第十六届“挑战杯”全国大学生课外科技学术作品竞赛, 基于电容法  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米掺杂液晶显示动力学响应研究, 2018/4-至今, 在研, 主持.
- [4] 第十五届“挑战杯”全国大学生课外科技学术作品竞赛, 半导体温差发电暖气小夜灯, 2016/4-2016/11, 已结题, 参加.

### 2. 发表的论文

- [1] **Dai Yayu**, Gao Lin, et al. Dielectric and elastic properties of fluorine-containing tricyclic isothiocyanate liquid crystal. *Liquid Crystals*, 2019, 46(6): 930-940.
- [2] **Dai Yayu**, Gao Lin, et al. Improvement of the dynamic responses of liquid crystal mixtures through  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  nanoparticle doping and driving mode adjustment. *Liquid Crystals*, 2019, 1593529.
- [3] Gao Lin, **Dai Yayu**, et al. Enhancement of Image Quality in LCD by Doping  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  Nanoparticles and Reducing Friction Torque Difference. *Nanomaterials*, 2018, 8(11): 8110911.
- [4] Ye Wenjiang, Yuan Rui, **Dai Yayu**, Lin Gao, et al. Improvement of Image Sticking in Liquid Crystal Display Doped with  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  Nanoparticles. *Nanomaterials*, 2018, 8(1): 8010005.
- [5] **戴亚雨**, 高林, 等. 外加电压频率对液晶介电各向异性的影响. *液晶与显示*, 2018, 33(3): 175-181.
- [6] 高林, **戴亚雨**, 等. 含氟三环 NCS 液晶材料的介电性能研究. *液晶与显示*, 2018, 33(7): 561-567.

### 3. 获奖

- [1] 2019 年 5 月获第十六届“挑战杯”全国大学生课外科技学术作品竞赛河北省特等奖.
- [2] 2019 年 5 月获第四届河北省大学生创新创业年会学术论文组特等奖.
- [3] 2018 年 7 月获全国高等学校物理实验教学研讨会本科论文评比二等奖.
- [4] 2018 年 5 月获第三届河北省大学生创新创业年会学术论文组二等奖.
- [5] 2018 年 11 月获天津市大学生创新奖学金优秀奖.

### 4. 参加学术会议

- [1] 2019 年 5 月, 秦皇岛, 河北省第四届大学生创新创业年会, 投稿会议论文.
- [2] 2018 年 5 月, 秦皇岛, 河北省第三届大学生创新创业年会, 投稿会议论文.
- [3] 2018 年 7 月, 青岛, 第 10 届全国高等学校物理实验教学研讨会, 投稿会议论文.
- [4] 2019 年 1 月, 深圳, 第四届亚洲液晶国际会议, 投稿会议论文并张贴海报.



## 致 谢

时光荏苒，岁月如梭，转眼间在河北工业大学的四年本科生涯马上就要结束了。现在回想起来第一次进入学校报道的场景，那满满的憧憬与新鲜感，一切都像是在昨日。感谢河北工业大学这四年来对我的帮助和包容，在工大所有的回忆和经历，都将是我人生和求学道路上最为宝贵的财富。在临近毕业之际，我想对一直陪伴和帮助照顾我的父母、导师、师兄师姐、朋友和同学们致以最为真诚的感谢！

首先，我要衷心的感谢我的导师叶文江副教授，在我懵懂无知，对大学生活倍感迷茫的时候，是叶老师将我领到了科研的路上。在进入叶老师课题组进行科研训练的这两年多时间里，叶老师尽一切所能为我们提供实验科研平台、关键性技术指导 and 国内外会议交流机会，更为我们每个人精心制定个性化的科研创新训练培养方案，是我科研路上的领路人。同时，在生活上叶老师也给予我们无微不至的关怀，教会了我要时刻保持积极乐观的人生态度，更是我人生道路的导师与学习的榜样。在此，再次向叶老师表达最诚挚的感谢，祝老师工作顺利，身体健康，家庭幸福美满！

其次，我要感谢的同届的同学高林，我们在实验室一起做实验，一起探讨分析问题的场景，现在还历历在目。感谢已经毕业的袁瑞学长、李振杰学长、孙婷婷学姐以及即将步入研三的王墨涵学姐和刘宁宁学姐，正是有了你们耐心的指引与帮助，我才能够顺利的完成本科阶段的科研项目和毕业论文，有了你们照顾，我在实验室感受到了如家一般的温暖，衷心的祝愿师兄师姐们在以后的学习、科研和工作的道路上勇攀高峰、再创佳绩！我也相信，在你们的带领下，402 实验室的学术氛围会越来越浓厚，高水平的科研成果会越来越多！感谢大创的学弟学妹们，感谢你们的陪伴和在生活与学习上给予的帮助，相信你们以后一定能够取得更大的成果和进步。

同时，我要感谢物理系的所有老师们，你们的谆谆教诲和言传身教在这四年里一直督促着我迅速成长，很幸运在大学期间能遇见你们这样可爱、可亲、可敬的老师们，为我们传道、授业、解惑，我也会谨记你们的教诲。

最后，我想感谢这二十多年一直陪伴和照顾我的父母，无论何时何地，你们默默无闻的奉献与悉心呵护，都是我最为坚强的后盾和最为温暖的港湾，我会时刻牢记父母的养育之恩和谆谆教诲，继续奋发努力，不让你们失望。