

# 聚合物分散液晶薄膜的极化特性 及其对电光性能的影响\*

陈昊鹏<sup>1)2)</sup> 聂永杰<sup>3)†</sup> 李国倡<sup>4)</sup> 魏艳慧<sup>4)</sup>  
胡昊<sup>2)</sup> 鲁广昊<sup>1)2)</sup> 李盛涛<sup>1)</sup> 朱远惟<sup>1)2)‡</sup>

1) (西安交通大学, 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

2) (西安交通大学, 前沿科学技术研究院, 西安 710054)

3) (云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217)

4) (青岛科技大学, 自动化与电子工程学院, 青岛 266000)

(2023年4月24日收到; 2023年6月28日收到修改稿)

液晶含量和外加电场类型是影响聚合物分散液晶薄膜电光性能的重要因素, 而对薄膜微观形貌的分析并不能直接反映电光性能的变化机理. 因此本文以液晶材料 E7 和光聚物 NOA65 共混制备的聚合物分散液晶薄膜作为研究对象, 通过对其极化特性的研究, 揭示了在不同液晶含量和不同类型电场下极化过程对薄膜电光性能的调控规律和微观机制. 结果表明, 在  $10^{-1}$ — $10^6$  Hz 频率范围内, 薄膜在低频、中频和高频存在 3 个松弛极化过程, 分别为热离子极化、界面极化和转向极化. 通过 Arrhenius 公式拟合计算了各极化过程的活化能, 发现随着液晶含量的增大, 转向极化的活化能从 0.88 eV 下降至 0.83 eV, 导致液晶分子转向的阈值场强和饱和场强降低. 相比于交流电场, 直流电场下热离子极化形成内建电场, 导致阈值场强和饱和场强大幅增大, 而极化弛豫时间的延长会导致响应时间的延长. 此项研究对进一步分析和提升聚合物分散液晶薄膜的电光性能具有指导意义.

**关键词:** 介电松弛, 电光性能, 极化, 弛豫时间

**PACS:** 77.22.-d, 77.22.Gm, 77.84.Lf

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230664

## 1 引言

聚合物分散液晶 (PDLC) 器件由于其独特的电控开关特性而受到广泛关注<sup>[1-4]</sup>. 与传统电致变色材料的电控特性不同<sup>[5,6]</sup>, 在未施加电场时, PDLC 聚合物基体中的液晶分子随机取向, 入射光被散射, 薄膜呈现乳白色. 当施加足够的电场时, 液晶分子发生转向, 折射率随之发生改变<sup>[7]</sup>, 当液晶的寻常光折射率与聚合物基体折射率匹配时, 薄

膜变透明. 随着国内外学者的广泛研究, 聚合物分散液晶的应用已逐渐推广到智能窗、显示器<sup>[8]</sup>、光栅<sup>[9]</sup>、传感器<sup>[10]</sup>、有机发光二极管<sup>[11]</sup>、场效应晶体管<sup>[12]</sup>和太阳能收集器件<sup>[13]</sup>等领域.

高驱动电压、低对比度和相对较长的响应时间是现阶段限制 PDLC 实际应用的主要瓶颈, 因此如何提高其电光性能成为学术界研究的主要课题, 而研究不同条件下 PDLC 的电光响应机制, 是提升其电光特性的重要前提<sup>[14-17]</sup>. Liang 等<sup>[18]</sup>研究了不同液晶和交联剂含量对 PDLC 薄膜电光性能

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51907148)、中国南方电网科技项目 (批准号: YNKJXM20190717)、云南省基础研究计划 (批准号: 202001AU070062) 和电工材料电气绝缘全国重点实验室 (批准号: EIPE23407) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: nieyongjie@stu.xjtu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhuanyuanwei@xjtu.edu.cn

的影响,发现交联剂和液晶含量能够影响薄膜的整体交联度,从而导致聚合物网络和液晶微滴尺寸的变化.更大的聚合物网络减小了对液晶微滴的锚定作用,使液晶分子取向一致所需的电压更小,即降低了PDLC薄膜的阈值电压. Nasir等<sup>[19]</sup>发现光引发剂的浓度能够直接影响相分离过程,而相分离过程又反向调控了PDLC薄膜的形貌.基于以上发现,他们通过优化引发剂的浓度,获得了驱动电压低、开关时间短、功耗低的PDLC器件. Meng等<sup>[20]</sup>通过向PDLC薄膜中添加低浓度的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米粒子,吸附其中的杂质离子,提高了薄膜的有效介电常数和折射率,获得了高对比度,低驱动电压和阈值电压的PDLC薄膜.

综合而言,此前对PDLC薄膜电光性能演变机制的研究多是基于对薄膜微观形貌的表征,通过分析液晶微滴和聚合物网络之间的相互作用实现性能提升,缺乏相关机制的阐述和实验验证.聚合物的分子和配比结构会显著影响其极化和电气特性<sup>[21]</sup>,介电特性研究可实现对材料微观结构和宏观电学性质的关联分析<sup>[22–25]</sup>.因此本文通过对PDLC薄膜介电性能的测试,分析了其极化特性,研究了不同液晶含量和不同类型电场条件下极化过程对电光性能的调控规律和影响机制.

## 2 薄膜制备与实验

### 2.1 薄膜制备

本文使用的液晶材料是向列相液晶E7,聚合物是紫外光固化胶NOA65.配制液晶质量分数为50%、60%、70%的共混溶液,在热台上搅拌均匀后置于100℃烘箱中加热24h使其混合充分.使用绝缘双面胶对两块清洗干净的ITO玻璃的ITO

电极面进行粘合制备成液晶空盒,上下ITO电极间距为20 $\mu\text{m}$ .制备用于电光性能测试试样时,先将向列相液晶E7与紫外光固化胶NOA65的共混溶液在各向同性态(60℃)下进行预热,之后将共混溶液利用毛细作用注入到制备好的液晶空盒中;制备用于介电性能测试的试样时,通过移液枪将共混溶液均匀滴涂在直径为40mm的铜电极上.随后在波长为365nm的紫外光源下照射20min完成两种测试样品的固化,制备后的样品如图1所示.

### 2.2 电光性能及介电性能测试

通过图2所示的自建电光测试系统对复合薄膜的电光性能进行测量,测试系统主要由Zolix公司光谱范围为200–1100nm的150W氙灯光源、Agilent B2900系列数字源表、Ocean Optics HR4000 CG-UV-NIR高分辨率光谱仪和计算机构成.在测试时,可编程数字源表用作电压源,与液晶盒的ITO电极相连,入射光通过光纤透过试样后被光谱仪接收,从而获得不同电场强度下PDLC薄膜在550nm波长处透过率的变化.介电性能通过Concept80宽频介电谱仪测得,为保证试样与电极的良好接触,测试前在试样表面喷镀直径为12mm的金作为上电极,外电极结构为平行板电极,测试采用1V交流小信号,测试温度范围为–40–60℃,频率范围为 $10^{-1}$ – $10^6$ Hz.

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 PDLC薄膜的极化特性

在 $10^{-1}$ – $10^6$ Hz范围内,一般存在热离子极化、界面极化和转向极化.热离子极化的松弛时间较长,一般出现在低频区域.界面极化的松弛峰

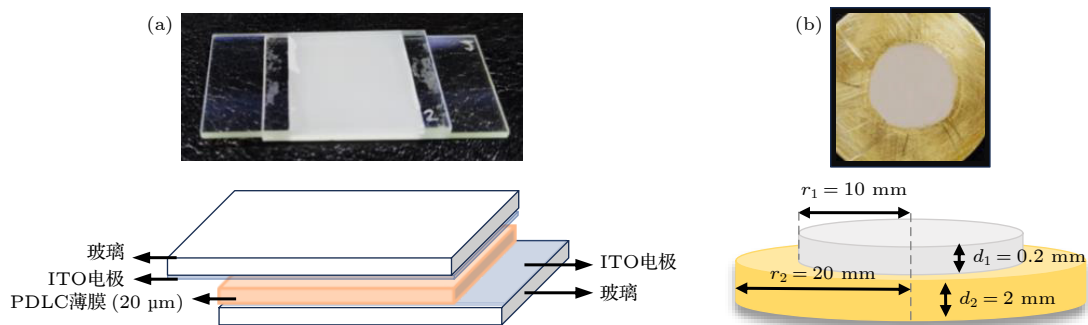


图1 (a)电光性能测试和(b)介电性能测试的样品示意图

Fig. 1. Sample diagram of (a) electro-optical property test and (b) dielectric property test.

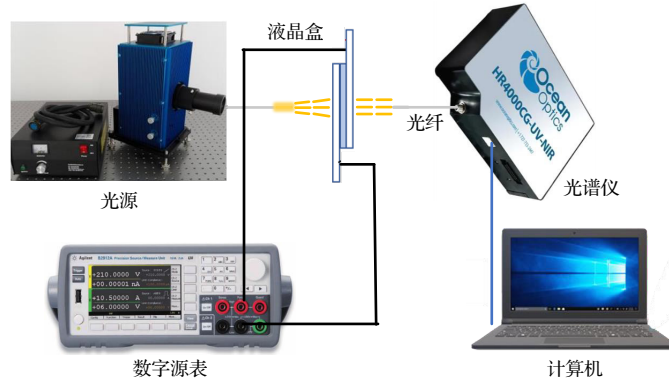


图 2 电光测试系统示意图

Fig. 2. Schematic diagram of electro-optical test system.

一般出现在  $10^1$ — $10^3$  Hz. 转向极化受到分子热运动、电场的作用以及分子间相互作用的影响, 松弛峰一般出现在  $10^2$ — $10^6$  Hz. 介电模量谱能够为材料的极化和弛豫提供有效的信息<sup>[26]</sup>, 图 3 为 PDLC 薄膜的介电模量谱虚部, 可以发现在低频、中频和高频段出现 3 个松弛峰. 结合不同极化类型松弛峰出现的频段, 认为峰 A 对应于热离子极化过程, 其中, 热离子来源于液晶中存在的杂质离子. 以所使用的液晶材料 E7 为例, 杂质离子浓度在  $10^{15}$   $\text{cm}^{-3}$  数量级<sup>[27]</sup>. 而杂质离子为弱联系离子, 在无外施电场时均匀分布, 不呈现宏观偶极矩; 施加电场后, 具有单一方向的直流电场破坏了离子随机的均匀分布, 形成宏观偶极矩, 发生热离子极化. 峰 B 为界面极化过程. 在薄膜制备过程中, 液晶微滴会析出并被聚合物网络包络形成丰富的不均匀界面, 在电场的作用下, 内部的自由电荷在界面处积聚, 发生界面极化. 峰 C 对应于转向极化, 薄膜中的转向极化主要来源于具有偶极特性的液晶分子, 是影响 PDLC 薄膜电光性能的主要因素.

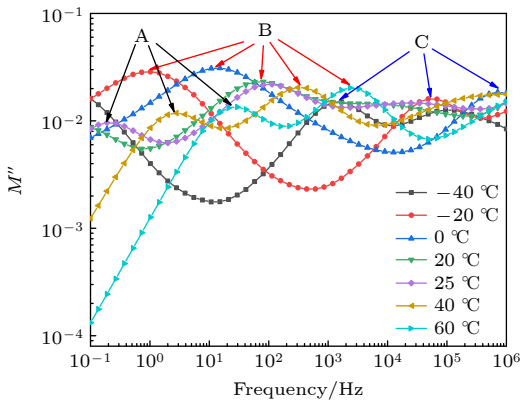


图 3 PDLC 薄膜的  $M''$  谱

Fig. 3.  $M''$  spectrum of PDLC film.

介电损耗谱中损耗峰峰值的大小反映该类型极化程度的大小, 由于低频处电导损耗较大掩盖热离子极化的损耗峰, 因此选取  $25$   $^{\circ}\text{C}$  和  $-40$   $^{\circ}\text{C}$  下 PDLC 薄膜的介电损耗谱, 分别研究液晶含量对界面极化和转向极化的影响, 结果如图 4 所示. 从图 4(a) 可以看出,  $25$   $^{\circ}\text{C}$  下界面极化的损耗峰峰值随液晶含量的增大从  $0.64$  下降到  $0.47$ , 这是由于液晶含量增大, PDLC 薄膜中液晶微滴尺寸增大, 比表面积减小, 与聚合物基体形成的界面减小, 导致薄膜中界面极化强度的降低. 转向极化的损耗峰峰值随液晶含量的增大从  $0.069$  增大到  $0.087$ , 这是由于转向极化主要来源于 PDLC 薄膜中的液晶分子, 液晶含量增大, 导致薄膜中转向极化程度增大. 值得注意的是, 在图 4(b) 所示的  $-40$   $^{\circ}\text{C}$  下转向极化损耗峰的高频方向存在一个特征峰, 这是结构损耗引起的, 结构损耗一般存在于高频低温处.

极化活化能能够反映极化发生的难易程度, 以上分析的 3 个松弛峰都随温度的升高向高频方向移动, 属于类德拜松弛过程. 其特征峰频率与温度符合 Arrhenius 公式, 在介电模量谱中可以通过松弛峰对应的弛豫时间来计算活化能, 计算公式如下<sup>[28]</sup>:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\mu}{k_B T}\right), \quad (1)$$

其中,  $\tau$  为不同温度  $T$  下的弛豫时间,  $\tau_0$  为最大概率值的松弛时间,  $\mu$  为活化能,  $k_B$  为玻尔兹曼常数. 在特征峰峰值处满足:

$$2\pi f_m \tau = 1, \quad (2)$$

其中,  $f_m$  为介电模量谱中特征峰对应的频率. 将 (2) 式代入 (1) 式可以得到:

$$\ln f_m = -\frac{\mu}{k_B T} - \ln(2\pi \tau_0). \quad (3)$$

通过一次函数拟和  $\ln f_m$  与  $1/T$  可以求得活化能. 由于测试频率并非连续变化, 两个测试点之间存在间隔, 峰的位置可能出现在两个测试点之间. 同时, 由于峰 A 和峰 B 相邻较近, 且峰 B 的值较大, 对峰 A 的干扰较强, 因此采用高斯分峰的方法确定峰 A 和峰 B 的位置. 不同液晶含量 PDLC 薄膜 3 个松弛峰活化能的拟合结果如图 5(a)—(c) 所示, 其中热离子极化的活化能最大, 转向极化次之, 界面极化最小. 活化能随液晶含量的变化

趋势如图 5(d) 所示, 随着液晶含量的增大, 热离子极化的活化能增大, 界面极化与转向极化的活化能减小, 且减小趋势相仿. 需要特别注意的是, 转向极化作为影响液晶分子转向的重要因素, 其活化能从 0.88 eV 减小到 0.83 eV. 相关前期研究表明, 液晶微滴的尺寸会随液晶含量的增大而增大 [12], 从而导致聚合物网络的锚定作用减弱, 转向极化活化能的减小为其提供了直接的实验证据.

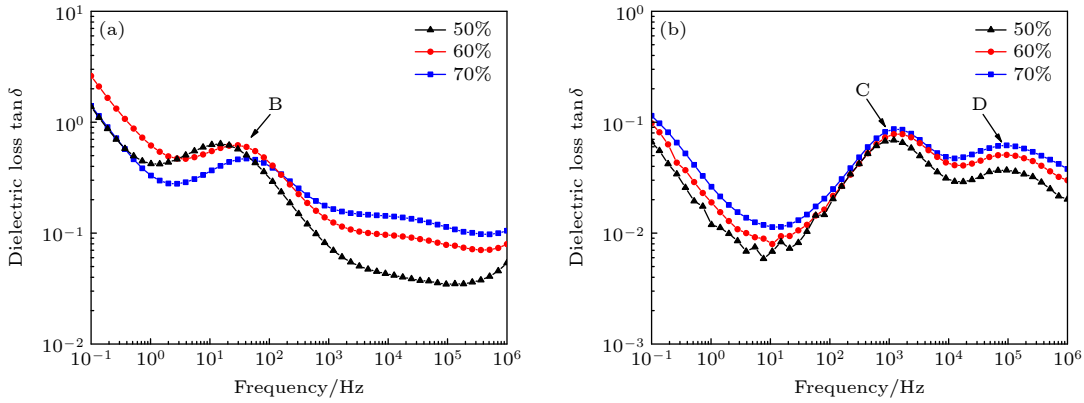


图 4 (a) 25 °C 和 (b) -40 °C 下不同液晶含量 PDLC 薄膜的介电损耗谱

Fig. 4. Dielectric loss spectrum of PDLC films with different liquid crystal content at (a) 25 °C and (b) -40 °C.

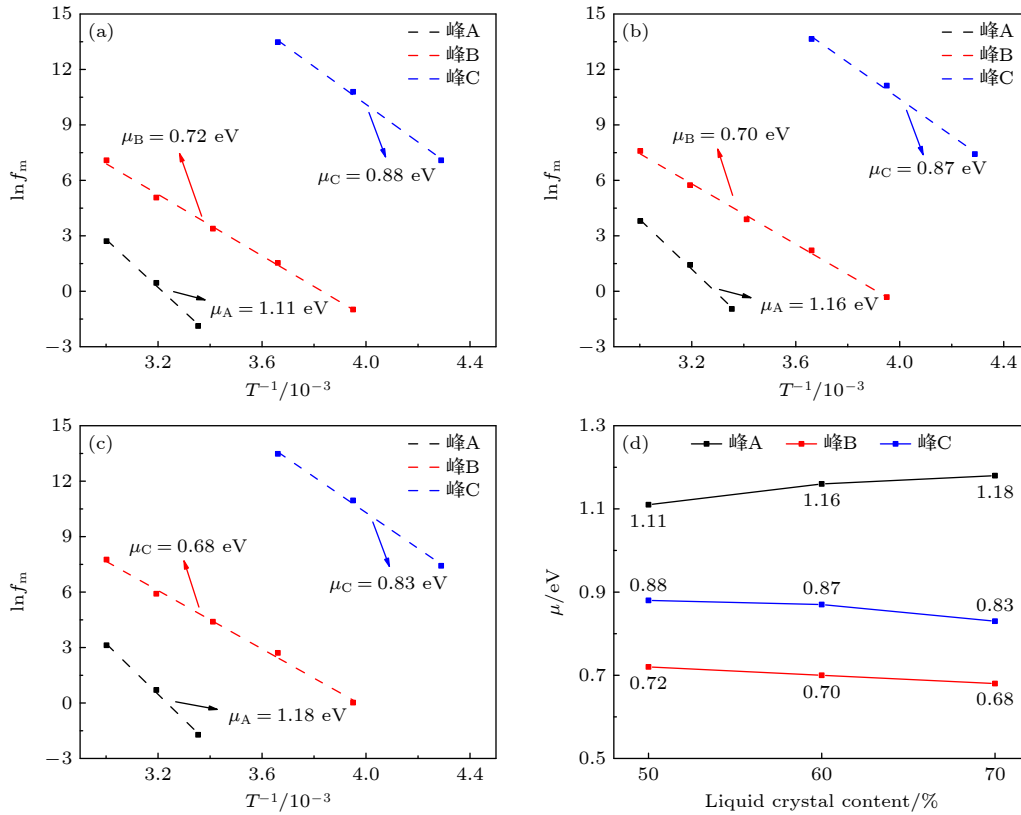


图 5 PDLC 薄膜的极化活化能 (a) 50%, (b) 60%, (c) 70% 和 (d) 极化活化能随液晶含量的变化趋势

Fig. 5. Polarization activation energy of PDLC films: (a) 50%, (b) 60%, (c) 70%, and (d) variation trend of polarization activation energy with liquid crystal content.

### 3.2 PDLC 薄膜的电光性能

在液晶/聚合物共混体系中,受制于聚合物网络结构的阻碍作用,液晶分子的转向程度取决于所施加的电场的大小,50 Hz 交流电场下 PDLC 薄膜的电场强度-透过率变化曲线如图 6(a) 所示. 50%, 60% 和 70% 液晶含量 PDLC 薄膜的最大透过率分别为 75.0%, 74.1% 和 72.9%, 这是由于随着液晶含量的增大,形成的液晶微滴尺寸增大,对光的散射增强,从而导致最大透过率发生微弱下降. 定义最大透过率的 10% 和 90% 对应的电场强度为 PDLC 薄膜中液晶分子发生转向的阈值场强 ( $E_{th}$ ) 和饱和场强 ( $E_{sat}$ ), 其统计结果如图 6(b) 所示,随着液晶含量的增大,  $E_{th}$  和  $E_{sat}$  下降,这是由于液晶含量的增大导致转向极化活化能降低,聚合物的锚定作用减弱,液晶分子更容易在电场的作用下发生转向.

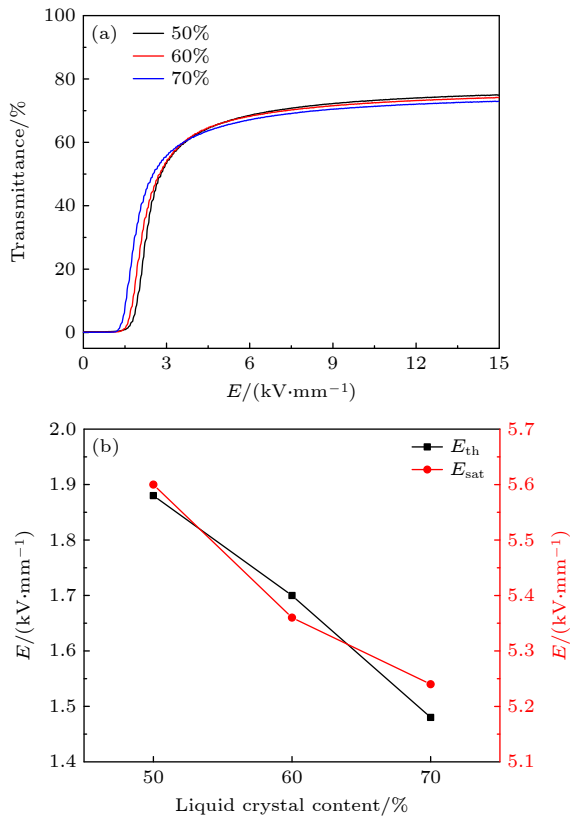


图 6 交流电场下,不同液晶含量 PDLC 薄膜 (a) 电场强度-透过率关系; (b) 阈值场强和饱和场强  
Fig. 6. (a)  $E$ - $T$  relationship and (b)  $E_{th}$  and  $E_{sat}$  of different liquid crystal content PDLC films under AC electric field.

直流电场和交流电场下 PDLC 薄膜的透过率对比如图 7 所示,联立图 8(a) 所示的直流电场下不同液晶含量 PDLC 薄膜的电场强度-透过率曲

线,发现相比于交流电场,直流电场下 PDLC 薄膜在相同电场强度下的透过率明显下降. 其产生机制是薄膜中的热离子极化导致杂质离子在直流电场作用下发生定向移动,形成与外加电场方向相反的内建电场,使作用于液晶分子的有效电场降低,从而导致透过率下降. 值得注意的是,透过率的下降随着液晶含量的增大更为明显,以 15  $\text{kV}/\text{mm}$  下的透过率为例,50%, 60%, 70% 液晶含量的复合薄膜透过率分别下降 22%, 37%, 61%, 这是由于液晶含量越高,杂质离子越多,热离子极化程度越大,形成的内建电场越大,最终导致更为明显的透过率下降. 如图 8(b) 所示,内建电场也导致直流电场下薄膜的  $E_{th}$  和  $E_{sat}$  大幅增大,但与交流电场下不同,其  $E_{sat}$  随液晶含量的上升而增大,这是由于此时形成的内建电场较大,其对饱和场强的影响大于转向极化活化能减小带来的影响.

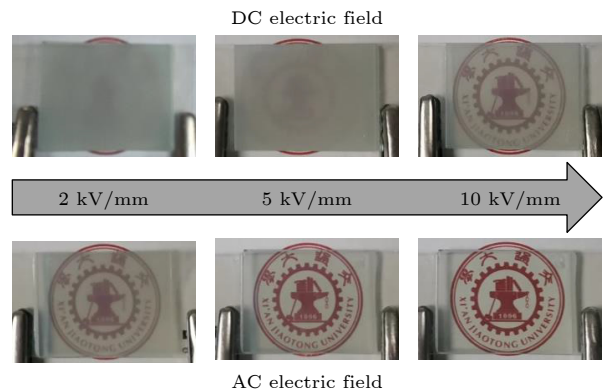


图 7 直流电场和交流电场下 PDLC 薄膜的透过率对比图  
Fig. 7. Transmittance comparison of PDLC films in DC and AC electric fields.

图 9(a), (b) 分别为 PDLC 薄膜在 15  $\text{kV}/\text{mm}$  的交流和直流电场下的透过率响应特性,交流电场下薄膜在施加电场时透过率快速增大并保持稳定,撤掉电场时透过率恢复且不再变化,展现出快速且稳定的响应特性. 与交流电场下不同的是,直流电场下在施加和撤去外施电场时透过率都存在一个明显的响应峰,且此响应峰的弛豫时间可达数秒之久. 此响应峰来源于 PDLC 薄膜中的热离子极化,电场施加初期薄膜的透率先达到最大值,随后热离子极化过程在直流电场下建立内建电场,随着外加电场的持续施大,内建电场幅值不断增大,导致作用于液晶分子的有效电场不断减小. 此极化完全建立后,薄膜中形成稳定的内建电场,透过率不再

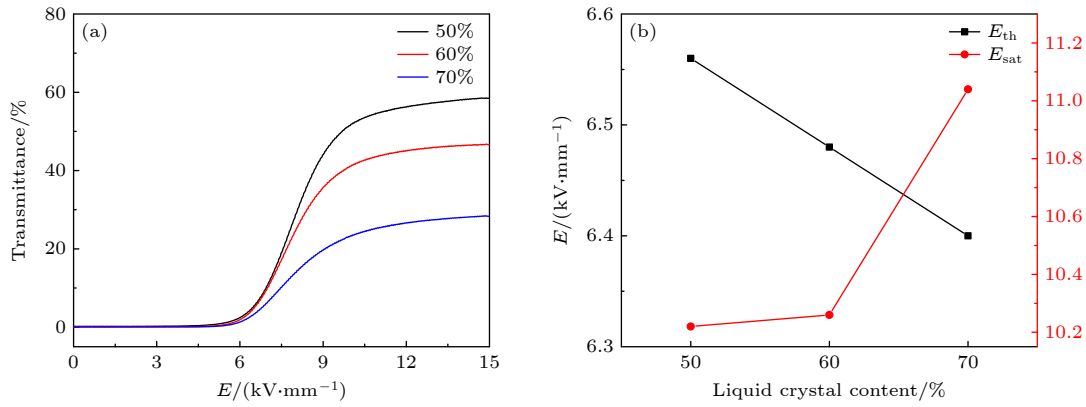


图 8 直流电场下, 不同液晶含量 PDLC 薄膜 (a) 电场强度-透过率关系; (b) 阈值场强和饱和场强  
Fig. 8. (a)  $E$ - $T$  relationship and (b)  $E_{th}$  and  $E_{sat}$  of different liquid crystal content PDLC films under DC electric field.

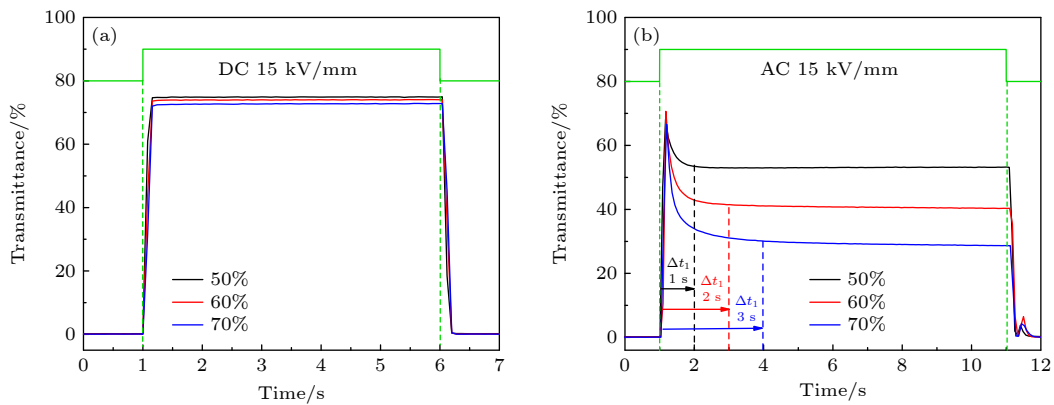


图 9 (a) 交流电场和 (b) 直流电场下 PDLC 薄膜的响应特性  
Fig. 9. Response characteristics of PDLC films under (a) AC and (b) DC electric field.

发生变化. 同时, 发现内建电场的建立时间随液晶含量的增大而增长, 由图 2(a) 可知, 室温下热离子极化出现的频率在  $10^{-1}$ — $10^0$  Hz, 内建电场的建立时间和热离子极化的弛豫时间一致, 进一步证实了 PDLC 薄膜中热离子极化的存在. 撤掉直流外施电场后, 在透过率迅速衰减至关断态时, 内建电场的作用导致透过率小幅上升, 之后, 伴随着正负杂质离子的复合, 透过率最终降低至关态值. 而在交流电场下, 电场变化的周期为 0.02 s, 远小于热离子极化的弛豫时间, 导致杂质离子的移动跟不上电场方向的变化, 内建电场不能完全建立, 因此对透过率的变化影响很小.

综上, 通过对 PDLC 薄膜极化特性的研究, 解释了其在不同液晶含量和不同电场类型下的电光性能的调控机理. 随着液晶含量的增大, 聚合物的锚定作用减弱, PDLC 薄膜中转向极化的活化能降低, 在电场的作用下液晶分子转向变得更加容易, 引起阈值场强和饱和场强的降低; 另一方面,

PDLC 薄膜中液晶含量的提升, 会引入较多的杂质离子, PDLC 薄膜的热离子极化增强, 内建电场增大, 最大透过率下降. 直流电场下, 杂质离子定向移动形成与外施电场方向相反的内建电场, 使作用于液晶分子的有效电场强度减小, 导致阈值场强和饱和场强增大, 且此种热离子极化的弛豫过程会导致响应时间的延长; 交流电场下, 由于热离子极化的弛豫时间远大于外施电场的变化周期, 内建电场较难建立, 对电光性能的影响很小.

## 4 结 论

通过对 PDLC 薄膜介电性能和电光性能的测试, 研究了薄膜的极化特性及其对电光性能的调控规律和机制.

1) PDLC 薄膜在  $10^{-1}$ — $10^6$  Hz 频率范围内存在 3 种松弛极化, 在低频、中频、高频段分别为热离子极化、界面极化、转向极化. 热离子极化主要

来源于液晶材料中的杂质离子, 界面极化主要来源于液晶微滴与聚合物网络形成的界面, 转向极化主要来源于液晶分子本身.

2) 根据 Arrhenius 公式计算了各极化过程的活化能, 随着液晶含量的增大, 转向极化的活化能降低, 表明聚合物网络对液晶微滴的锚定作用减弱, 导致 PDLC 薄膜中液晶分子转向的阈值场强和饱和场强减小.

3) 直流电场下, 薄膜中的热离子极化过程形成内建电场, 使作用于液晶分子的有效电场减小, 导致其转向的阈值场强和饱和场强增大, 而极化弛豫时间的延长导致响应时间的延长.

4) 结合 PDLC 薄膜极化特性与电光性能的研究结果, 可以通过提高液晶材料的纯度, 削弱内建电场的形成, 提高最大透过率, 降低阈值场强和饱和场强, 并显著改善 PDLC 薄膜在直流电场下的电光特性, 进而扩大 PDLC 薄膜的许用场强范围, 提升其电响应灵敏度.

## 参考文献

- [1] Shen W B, Wang L, Zhong T J, Chen G, Li C X, Chen M, Zhang C H, Zhang L Y, Li K X, Yang Z, Yang H 2019 *Polymer* **160** 53
- [2] Hu G, Chen H X, Liu Z Q, Zhang S, Zhou Y, Zhu B L, Gu H Z 2020 *Liq. Cryst.* **47** 1582
- [3] Zhong T J, Mandle R J, Goodby J W, Zhang L Y, Zhang C H 2019 *Polym. Adv. Technol.* **30** 2781
- [4] Li C X, Chen M, Shen W B, Chen G, Zhang L Y, Yang H 2019 *Liq. Cryst.* **46** 1718
- [5] Nie Y J, Jing Y, Zhang M, Chen H P, Zhao X P, Zhao T F, Xiang E X, Wang K, Lu G H, Zhu Y W 2021 *Electric Power* **54** 144 (in Chinese) [聂永杰, 景钰, 张萌, 陈昊鹏, 赵现平, 赵腾飞, 项恩新, 王科, 鲁广昊, 朱远惟 2021 *中国电力* **54** 144]
- [6] Nie Y J, Zhang M, Zhu Y W, Jing Y, Shi W L, Li G P, Chen H P, Jiang Y H, Zhao X P, Zhao T F, Lu G H, Li S T 2021 *Materials* **14** 5901
- [7] Long J, Li J S 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 074201 (in Chinese) [龙洁, 李九生 2021 *物理学报* **70** 074201]
- [8] Hemaida A, Ghosh A, Sundaram S, Mallick T K 2020 *Sol. Energy* **195** 185
- [9] Li W C, Liu Y G, Xuan L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 046101 (in Chinese) [李文萃, 刘永刚, 宣丽 2011 *物理学报* **60** 046101]
- [10] Zhang W C, Fan D H, Gong Y L, Liang W L 2021 *Liq. Cryst.* **48** 1643
- [11] Jiang J H, McGraw G, Ma R Q, Brown J, Yang D K 2017 *Opt. Express* **25** 3327
- [12] Seo J, Nam S, Jeong J, Lee C, Kim H, Kim Y 2015 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **7** 504
- [13] Nasir N, Hong H R, Rehman M A, Kumar S, Seo Y 2020 *RSC Adv.* **10** 32225
- [14] Meng X S, Li J, Lin Y Q, Liu X D, Zhao J W, Li D C, He Z H 2022 *Crystals* **12** 163
- [15] Shi Z H, He Z M, Li C S, Miao Z C, Wang D, Luan Y, Li Y Z, Zhao Y Z 2022 *Appl. Mater. Today* **29** 101622
- [16] Zhao Y Z, Li J Q, Yu Y, Zhao Y, Guo Z, Yao R J, Gao J J, Zhang Y M, Wang D 2022 *Molecules* **27** 7265
- [17] Chen F, Xu R Q, Li R Z, Yan J 2018 *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* **33** 631 (in Chinese) [陈菲, 徐荣青, 李若舟, 严静 2018 *液晶与显示* **33** 631]
- [18] Liang Z, Zhao Y Z, Gao H, Wang D, Miao Z C, Cao H, Yang Z, He W L 2021 *Liq. Cryst.* **48** 2016
- [19] Nasir N, Kumar S, Kim M, Nguyen V, Suleman M, Park H M, Lee S, Kang D, Seo Y 2022 *ACS Appl. Energy Mater.* **5** 6986
- [20] Meng X S, Li J, Lin Y Q, Liu X D, Liu N N, Ye W J, Li D C, He Z H 2021 *Liq. Cryst.* **48** 1791
- [21] Zhu Y W, Qiao N, Dong S Q, Qu G H, Chen Y, Lu W L, Qin Z Z, Li D F, Wu K N, Nie Y J, Liu B, Li S T, Lu G H 2022 *Chem. Mater.* **34** 6505
- [22] Cheng P F, Li S T, Li J Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 187302 (in Chinese) [成鹏飞, 李盛涛, 李建英 2012 *物理学报* **61** 187302]
- [23] Li G C, Li S T 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 239401 (in Chinese) [李国倡, 李盛涛 2019 *物理学报* **68** 239401]
- [24] Li G C, Zhou X G, Li X J, Wei Y H, Hao C C, Li S T, Lei Q Q 2020 *High Volt.* **5** 280
- [25] Yang J J, Wang Z C, Feng H, Wei Y H, Li G C, Zhu Y C, Hao C C, Lei Q Q, Li S T 2023 *Ceram. Int.* **49** 14057
- [26] Li S T, Wang H, Lin C J, Li J Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 087701 (in Chinese) [李盛涛, 王辉, 林春江, 李建英 2013 *物理学报* **62** 087701]
- [27] Costa M R, Altafim R A C, Mammanna A P 2001 *Liq. Cryst.* **28** 1779
- [28] Islam R, Papanthassiou A N, Chan-Yu-King R, Roussel F 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 182901

# Polarization characteristics of polymer dispersed liquid crystal films and their effects on electro-optical properties<sup>\*</sup>

Chen Hao-Peng<sup>1)2)</sup> Nie Yong-Jie<sup>3)†</sup> Li Guo-Chang<sup>4)</sup> Wei Yan-Hui<sup>4)</sup>  
Hu Hao<sup>2)</sup> Lu Guang-Hao<sup>1)2)</sup> Li Sheng-Tao<sup>1)</sup> Zhu Yuan-Wei<sup>1)2)‡</sup>

1) (*State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

2) (*Frontier Institute of Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China*)

3) (*Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China*)

4) (*College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266000, China*)

( Received 24 April 2023; revised manuscript received 28 June 2023 )

## Abstract

The electro-optical properties of polymer dispersed liquid crystal film vary with liquid crystal content and externally applied electric field, but the analysis of the film morphology cannot directly reflect the mechanism of electro-optical properties. Therefore, the polymer dispersed liquid crystal film prepared by blending liquid crystal material E7 and photopolymer NOA65 is used. Herein, the dielectric polarization regulated electro-optical properties and their related mechanisms under different liquid crystal content and electric fields are revealed. The results show that in a frequency range of  $10^{-1}$ – $10^6$  Hz, the film exhibits three relaxation processes respectively at low frequency, medium frequency and high frequency, which are generated by thermionic polarization, interfacial polarization and orientation polarization. According to the Arrhenius equation, the activation energy values of such polarization processes are calculated. It is found that with the increase of liquid crystal content, the activation energy of orientation polarization decreases from 0.88 eV to 0.83 eV, leading the threshold field strength and the saturation field strength of the diversion of liquid crystal molecule to decrease. Thermionic polarization under DC electric field forms an internal electric field, which causes the threshold field strength and saturation field strength to increase greatly, as compared with the scenarios under AC electric field. Such a thermionic polarization also leads the polarization relaxation time to increase, resulting in the extension of response time. This study is of guiding significance in further analyzing and improving the electro-optical properties of polymer dispersed liquid crystal films.

**Keywords:** dielectric relaxation, electro-optical property, polarization, relaxation time

**PACS:** 77.22.-d, 77.22.Gm, 77.84.Lf

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230664

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51907148), the Science and Technology Project of China Southern Power Grid, China (Grant No. YNKJXM20190717), the Basic Research Plan of Yunnan Province, China (Grant No. 202001AU070062), and the State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, China (Grant No. EIPE23407).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [nieyongjie@stu.xjtu.edu.cn](mailto:nieyongjie@stu.xjtu.edu.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [zhuyuanwei@xjtu.edu.cn](mailto:zhuyuanwei@xjtu.edu.cn)

## 聚合物分散液晶薄膜的极化特性及其对电光性能的影响

陈昊鹏 聂永杰 李国倡 魏艳慧 胡昊 鲁广昊 李盛涛 朱远惟

## Polarization characteristics of polymer dispersed liquid crystal films and their effects on electro-optical properties

Chen Hao-Peng Nie Yong-Jie Li Guo-Chang Wei Yan-Hui Hu Hao Lu Guang-Hao Li Sheng-Tao  
Zhu Yuan-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 177701 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230664

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230664>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

单原子Lennard–Jones体黏弹性弛豫时间

Viscoelastic relaxation time of the monoatomic Lennard–Jones system

物理学报. 2020, 69(12): 123101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200138>

一种可用于极化 $^3\text{He}$ 实验的新型磁场系统

A new magnetic field system for  $^3\text{He}$  polarization

物理学报. 2018, 67(17): 176701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180571>

无铅四方相钙钛矿短周期超晶格压电效应机理研究

Piezoelectric effect mechanism in lead-free tetragonal perovskite short-period superlattices

物理学报. 2018, 67(7): 077701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172710>

改进分析型嵌入原子法在W(100)表面声子谱中的应用

Application of the modified analytic embedded atomic method in W(100) surface phonon spectrum

物理学报. 2020, 69(7): 076301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191910>

用双稳态势场模型研究观点转变的驱动–响应关系

Theoretical studies on the drive–response relationship for opinion particles in a bistable potential field

物理学报. 2020, 69(6): 060501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191516>

基于电光晶体平板部分相位调制动态产生涡旋光束

Dynamic generation of vortex beam based on partial phase modulation of electro-optical crystal plate

物理学报. 2022, 71(20): 207801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220835>