

文章编号:1007-2780(2018)03-0175-07

## 外加电压频率对液晶介电各向异性的影响

戴亚雨<sup>1</sup>, 高 林<sup>1</sup>, 庞 泽<sup>1</sup>, 李振杰<sup>1</sup>, 蔡明雷<sup>2,3</sup>, 王晓燕<sup>2,3</sup>, 朱吉亮<sup>1</sup>, 叶文江<sup>1\*</sup>

(1. 河北工业大学 理学院, 天津 300401;

2. 河北冀雅电子有限公司, 河北 石家庄 050071;

3. 河北省液晶显示器工程技术研究中心, 河北 石家庄 050071)

**摘要:**液晶材料的介电各向异性通常与频率有关。为进一步研究频率对液晶材料介电常数的影响,首先,使用紫外可见分光光度计(METASH UV-9000S)和表面轮廓仪(Contor GK-T)分别测量液晶盒厚度以及聚酰亚胺(PD)取向层厚度,通过精密热台(LTS 350)控制实验温度 20 ℃,使用精密 LCR 表(Agilent E4980A)测定 4 种不同液晶材料在 100~2 000 Hz 的频率内的平行和垂直排列向列相液晶盒电容;然后,利用液晶盒电容模型计算出不同频率下液晶的平行和垂直介电常数,并绘制频率-介电各向异性曲线;最后,分析频率对液晶介电各向异性的影响。实验结果表明:温度一定,正性液晶的介电各向异性随频率的升高而减小,然后逐渐趋于平缓,负性液晶的介电各向异性随频率变化基本保持不变。此项研究对进一步分析液晶材料的介电特性具有一定的指导意义。

**关键词:**液晶盒电容模型;介电各向异性;频率;电容

**中图分类号:**O753.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183303.0175

## Influence of the frequency of external applied voltage on the dielectric anisotropy of liquid crystal

DAI Ya-yu<sup>1</sup>, GAO Lin<sup>1</sup>, PANG Ze<sup>1</sup>, LI Zhen-jie<sup>1</sup>, CAI Ming-lei<sup>2,3</sup>,  
WANG Xiao-yan<sup>2,3</sup>, ZHU Ji-liang<sup>1</sup>, YE Wen-jiang<sup>1,\*</sup>

(1. School of Sciences, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Hebei Jiya Electronics Co Ltd, Shijiazhuang 050071, China;

3. Hebei Provincial Research Center of LCD Engineering Technology,  
Shijiazhuang 050071, China)

**Abstract:** The dielectric anisotropy of liquid crystal materials is usually related to the frequency. For

**收稿日期:**2017-12-09; **修订日期:**2018-01-09.

**基金项目:**国家自然科学基金(No.11374087; No.11504080);河北省自然科学基金(No. A2014202123; No. A2017202004);河北省教育厅项目(No.QN2014130);河北省高等教育教学改革研究与实践项目(No. 2017GJJG018);大学生创新创业训练计划项目(No.20170080289);河北省高校重点学科资助课题  
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11374087 and 11504080); Natural Science Foundation of Hebei Province (No. A2014202123 and A2017202004); Research Project of Hebei Education Department (No. QN2014130); Research and practice project of Hebei Province Higher Education and Teaching Reform(No.2017GJJG018);Project of College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program (No.20170080289);Key Subject Construction Project of Hebei Province University.

\* 通信联系人, E-mail: wenjiang\_ye@hebut.edu.cn

further investigations of the influence of frequency on the dielectric constant of liquid crystal materials, firstly, the thickness of the liquid crystal cells and the thickness of the polyimide (PI) orientation layers were measured by UV spectrophotometer (METASH UV-9000S) and Surface Profiler (Contor GK-T) respectively. The precision hot-stage (LTS 350) was used to control the experimental temperature of 20 °C, and the capacitance of parallel and vertical aligned nematic liquid crystal cells were measured by a precision LCR meter (Agilent E4980A) at the frequency of 100~2 000 Hz for four different liquid crystal materials. Then, the parallel and vertical dielectric constants of liquid crystals at different frequencies were calculated through the capacitance model of LC cell, the curves of dielectric constant versus frequency were plotted as well. Finally, the influence of the frequency of external applied voltage on the dielectric anisotropy of liquid crystal was analyzed. The experimental results showed that the dielectric anisotropy of the positive liquid crystal decreased with the increase of the frequency at a certain temperature first, and then gradually flatten out, while dielectric anisotropy of negative liquid crystal remained unchanged with the change of frequency. This research has a guiding significance for further analysis of the dielectric characteristics of liquid crystal materials.

**Key words:** LC cell capacitance model; dielectric anisotropy; frequency; capacitance

## 1 引言

随着液晶材料在显示领域的广泛应用,液晶显示特性的研究也越发重要。作为影响液晶分子在电场中取向的一个重要参数,液晶材料的介电各向异性直接影响液晶器件的显示性能,包括阈值电压、响应时间、占空比等<sup>[1]</sup>。液晶材料的介电各向异性主要取决于液晶分子极化度的大小,与液晶分子的形状<sup>[2]</sup>、极性基团的位置<sup>[3]</sup>、永久偶极矩、 $\pi$ 电子体系以及中心基团<sup>[4]</sup>等因素的贡献相关,同时受外界环境温度<sup>[5]</sup>、外加压力大小<sup>[6]</sup>等物理因素影响。液晶材料之间的相互混合以及在液晶材料中掺杂纳米粒子等<sup>[7-9]</sup>方法也会对液晶分子极性基团的位置和极性产生影响。除此之外,外加电压频率的变化能够改变液晶分子极化度的大小,使得液晶的介电各向异性有所不同。因此,在液晶材料及外部影响因素确定的条件下,外加电压频率对液晶材料介电各向异性的影响需要做进一步研究。

在外电压低于阈值电压时,平行排列向列相(PAN: Parallel Aligned Nematic)和垂直排列向列相(VAN: Vertical Aligned Nematic)液晶盒中的液晶分子分别平行于和垂直于基板表面排列;当外加电压大于阈值电压时,液晶分子受电场作用会发生形变,直至液晶分子排列颠倒,即垂直于和平行于基板表面排列。因此,通过测量 PAN

盒在低压(低于阈值电压)和高压下的电容<sup>[10]</sup>,可以分别计算得到正性液晶的平行介电常数 $\epsilon_{//}$ 和垂直介电常数 $\epsilon_{\perp}$ 。然而,基板表面聚酰亚胺(PI: Polyimide)取向层的电容也会对液晶电容的测量产生一定影响<sup>[11]</sup>。同时,考虑到液晶盒基板强锚定作用,即使在高压下也难以保证所有液晶分子完全颠倒,尤其是基板表面液晶分子。负性液晶介电常数的测量存在类似的问题,只是测量中采用 VAN 盒。因此,选取双盒模型<sup>[12-13]</sup>分别测量液晶的介电常数 $\epsilon_{//}$ 和 $\epsilon_{\perp}$ ,同时考虑 PI 层的影响,即对于正性液晶,测量低电压下 PAN 盒和高电压下 VAN 盒电容;对于负性液晶,测量高电压下 PAN 盒和低电压下 VAN 盒电容。本文首先使用精密热台(LTS 350)控制实验温度 20 °C,再用精密 LCR 表(Agilent E4980A)测定四种不同液晶材料(E7、5CB、81H82300-100、81H82200-100)在 100~2 000 Hz 的频率内的液晶盒电容,通过液晶盒电容模型<sup>[13]</sup>计算出四种液晶在不同频率下的平行介电常数 $\epsilon_{//}$ 和垂直介电常数 $\epsilon_{\perp}$ ,并绘制频率-介电各向异性曲线( $f-\Delta\epsilon$ )曲线,由此分析了外加电压频率对液晶材料介电各向异性的影响。

## 2 理论分析

### 2.1 液晶盒电容模型

通用液晶盒是由涂覆 PI 取向层的两块透明

导电玻璃(ITO 玻璃)中间灌注液晶构成的,其本身可以看作是电容器。液晶盒电容模型如图 1 所示,两个 PI 层和液晶层对液晶盒电容都是有贡献的,它们串联在一起构成整个液晶盒电容。

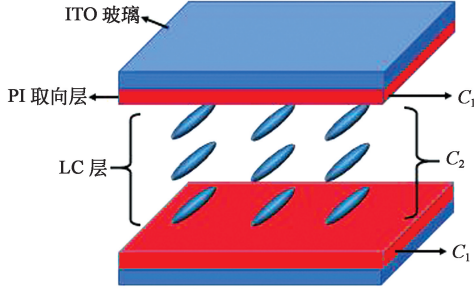


图 1 液晶盒电容模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of LC cell capacitance model

设液晶盒总电容为  $C$ , 两个 PI 层电容均为  $C_1$ , 液晶层电容为  $C_2$ , 由电容串联关系可知:

$$\frac{1}{C} = \frac{2}{C_1} + \frac{1}{C_2}, \quad (1)$$

液晶层电容  $C_2$  为:

$$C_2 = \frac{CC_1}{C_1 - 2C}, \quad (2)$$

一般平行板电容器的电容表达式为:

$$C = \frac{S\epsilon_0\epsilon}{L}, \quad (3)$$

其中:  $S$  为基板有效电极面积,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\epsilon$  为介质的相对介电常数,  $L$  为两电极间距。于是, PI 层电容  $C_1$  和液晶层电容  $C_2$  分别为:

$$C_1 = \frac{S\epsilon_0\epsilon_1}{L_1}, \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{S\epsilon_0\epsilon_2}{L_2}, \quad (5)$$

其中:  $\epsilon_1$  和  $L_1$  分别为 PI 层的相对介电常数和 PI 层厚度,  $\epsilon_2$  和  $L_2$  分别为液晶层的相对介电常数和液晶层厚度。

## 2.2 $\epsilon_{//}$ 和 $\epsilon_{\perp}$ 的计算方法

液晶盒中液晶层的电容  $C_2$  表达式为

$$C_2 = \frac{S\epsilon_0\epsilon_{\perp}}{L_2} \int_0^{L_2} \frac{d\xi}{1 + \gamma \sin^2 \theta}, \quad (6)$$

其中:  $\theta$  为液晶指向矢倾角,  $\gamma = \frac{\epsilon_{//}}{\epsilon_{\perp}} - 1$ ,  $\epsilon_{//}$  为液晶材料的平行介电常数,  $\epsilon_{\perp}$  为液晶材料的垂直介电常数。

对正性液晶而言, 在外电压较低或低于阈值电压时, PAN 盒中的液晶分子受强锚定作用, 其长轴方向基本平行于玻璃基板, 此时液晶的介电常数为  $\epsilon_{\perp}$ , 考虑基板表面液晶分子  $1^\circ$  的预倾角, 对应的 PAN 盒液晶层电容  $C_{2-PAN}$  表达式为

$$\frac{1}{C_{2-PAN}} = \frac{L_{2-PAN}}{S\epsilon_0\epsilon_{\perp}} \cdot \frac{1}{1 + \gamma \sin^2 1^\circ}. \quad (7)$$

当外加电压大于 PAN 盒的阈值电压时, 液晶分子受电场作用会发生形变。若外加电压很高, 盒内液晶分子将沿电场方向排列, 即垂直基板排列。但由于 PAN 盒中基板表面液晶分子受强锚定作用, 高电压下这些液晶分子不能完全垂直于基板排列, 因此测得的  $\epsilon_{//}$  并不准确。而对于 VAN 盒而言, 由于存在预倾角, 低电压下液晶分子不能完全垂直于基板排列, 所以测量 VAN 盒高电压下的电容值以消除预倾角对液晶电容的影响, 由此计算所得的  $\epsilon_{//}$  较为准确。考虑 VAN 液晶盒的预倾角度为  $89^\circ$ , 其液晶层电容  $C_{2-VAN}$  表达式为

$$\frac{1}{C_{2-VAN}} = \frac{L_{2-VAN}}{S\epsilon_0\epsilon_{\perp}} \cdot \frac{1}{1 + \gamma \sin^2 89^\circ}, \quad (8)$$

由此可知, 正性液晶  $\epsilon_{//}$  和  $\epsilon_{\perp}$  分别为

$$\epsilon_{//} = \frac{C_{2-VAN}L_{2-PAN}(1 - \sin^2 1^\circ) - C_{2-PAN}L_{2-PAN}(1 - \sin^2 89^\circ)}{S\epsilon_0(\sin^2 89^\circ - \sin^2 1^\circ)}, \quad (9)$$

$$\epsilon_{\perp} = \frac{C_{2-PAN}L_{2-PAN} \sin^2 89^\circ - C_{2-VAN}L_{2-VAN} \sin^2 1^\circ}{S\epsilon_0(\sin^2 89^\circ - \sin^2 1^\circ)}. \quad (10)$$

对负性液晶而言, 外加电压低于阈值电压时, VAN 盒中的液晶分子受基板强锚定作用, 其长轴方向垂直于玻璃基板排列, 此时液晶的介电常数为  $\epsilon_{//}$ ; 当外加电压很高时, VAN 盒中基板表面

液晶分子受强锚定作用, 不能完全平行于基板排列, 因此测量 PAN 盒在高压下液晶分子的电容值, 并由此计算  $\epsilon_{\perp}$ 。

### 3 实 验

#### 3.1 液晶盒厚度及取向层厚度的测量

实验中使用的 PAN 和 VAN 盒由河北冀雅电子有限公司提供,液晶盒厚度通过紫外可见分光光度计(METASH UV-9000S)测定。液晶盒取向层 PI 的相对介电常数为 3.1,其厚度由表面轮廓仪(Contor GK-T)测定。

##### 3.1.1 液晶盒厚度的测量

采用紫外可见分光光度计(METASH UV-9000S)测量时,光线垂直液晶空盒表面射入,改变入射光波长,穿过液晶空盒的透射光强度也随之改变,由此得到透射率随波长的变化曲线,即波长-透射率( $\lambda$ - $T$ )曲线,根据干涉原理,液晶空盒的 $\lambda$ - $T$ 曲线相邻两个极大值的光程差为波长的整数倍,且满足下列关系

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)}, \quad (11)$$

其中: $d$  为液晶空盒的厚度, $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别表示相

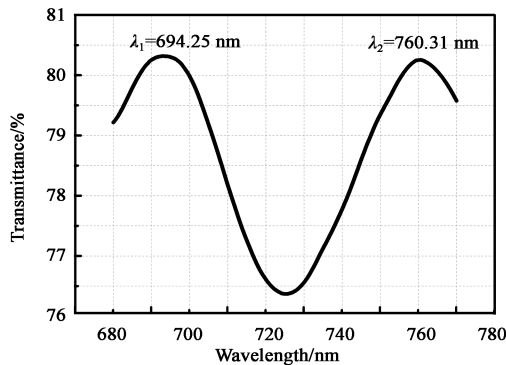


图 2 PAN 盒  $\lambda$ - $T$  曲线

Fig.2 Wavelength-transmittance curve of PAN cell

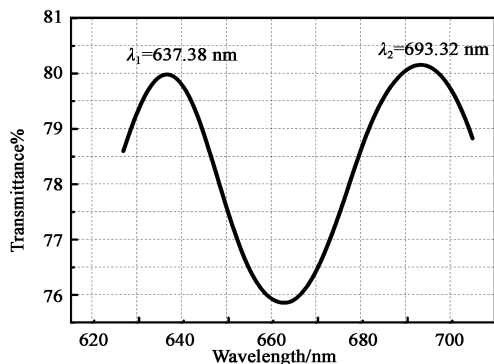


图 3 VAN 盒  $\lambda$ - $T$  曲线

Fig.3 Wavelength-transmittance curve of VAN cell

邻两个透射率极大点所对应的波长值。

PAN 盒和 VAN 盒的  $\lambda$ - $T$  曲线分别如图 2 和图 3 所示,选取 PAN 盒和 VAN 盒对应的  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  值,代入式(11)计算得到 PAN 盒厚为 3 995.19 nm,VAN 盒厚为 3 949.84 nm。

##### 3.1.2 取向层厚度的测量

图 4 和图 5 为表面轮廓仪(Contor GK-T)测量得到的 PAN 盒与 VAN 盒去除部分 PI 层的 ITO 玻璃基板表面三维形貌图像,可以观察到表面轮廓及颜色的演变,红色为 PI 层表面,绿色为 ITO 玻璃表面。图中有部分绿色区域出现红斑,这是由于人工去除部分涂覆在 ITO 玻璃上的 PI 时操作不当导致的,不会影响取向层厚度的测量。在图中分布均匀且密集的绿色区域与红色区域各选取一个点,两点之间的高度差即为 PI 取向层厚度。

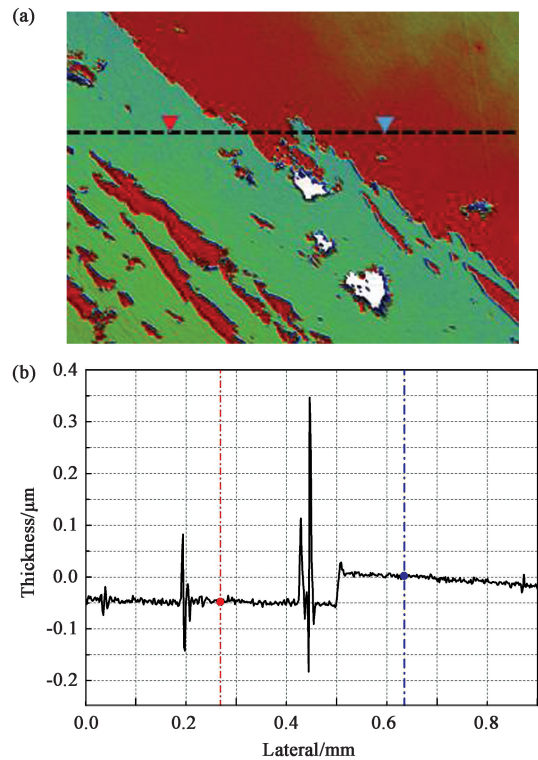


图 4 (a) PAN 盒 ITO 玻璃基板去除部分 PI 层表面轮廓图,(b) PAN 盒 ITO 玻璃基板 PI 层厚度分布

Fig.4 (a) Surface outline of ITO glass substrate removed part PI layer of PAN cell, (b) Thickness distribution of PI layer on the ITO glass substrate of PAN cell

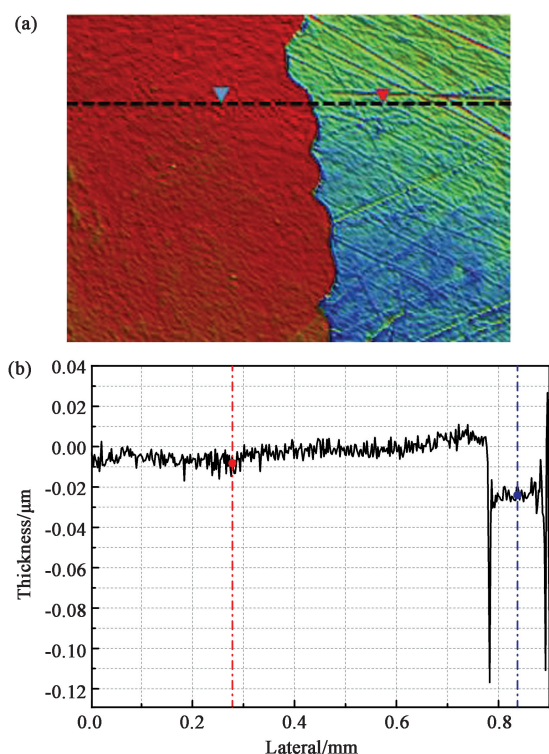


图5 (a) VAN盒ITO玻璃基板去除部分PI层表面轮廓图, (b) VAN盒ITO玻璃基板PI层厚度分布

Fig.5 (a) The surface outline of ITO glass substrate removed part PI layer of VAN cell, (b) The thickness distribution of PI layer on the ITO glass substrate of VAN cell

根据图4和图5可以得到PAN盒的PI层厚度为 $0.0506\ \mu\text{m}$ , VAN盒PI层厚度为 $0.0148\ \mu\text{m}$ 。

### 3.2 液晶介电各向异性的测量

#### 3.2.1 液晶盒阈值电压的测量

液晶介电常数的温度依赖特性导致液晶盒电容值随温度的变化而改变,因此,实验测量液晶盒电容时使用精密热台(LTS 350)控制液晶盒的温度为 $20\ ^\circ\text{C}$ ,再使用精密LCR表(Agilent E4980A)测量液晶盒电容。首先,对精密LCR表(Agilent E4980A)分别进行开路 and 短路校准;然后,用金属夹与导线将液晶盒与精密LCR表连接,由于导线长度引起损耗的增大对液晶盒电容值有一定的影响,因此测量过程中要求导线尽可能短;最后,固定施加电压频率为 $1\ \text{kHz}$ ,改变施加在液晶盒上的电压,经过多次测量数据绘制出正性液晶PAN盒和负性液晶VAN盒的电压-电容特性曲线,分别对应四种液晶材料

E7、5CB、81H82300-100和81H82200-100,如图6所示。

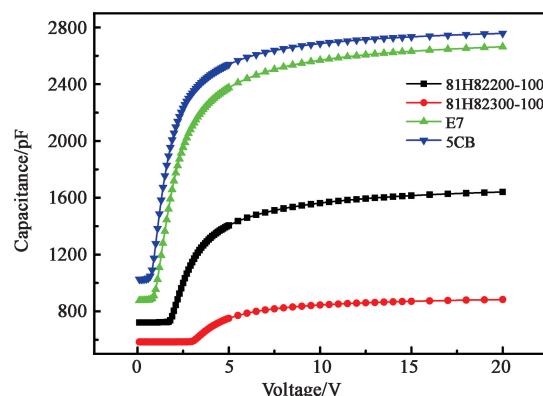


图6 正性液晶PAN盒和负性液晶VAN盒电压-电容特性曲线

Fig.6 Voltage-capacitance characteristic curves of PAN cells with positive liquid crystals and VAN cells with negative liquid crystals

根据图中曲线的变化趋势得到四种不同液晶材料PAN盒和VAN盒的阈值电压,如表1所示,由此确定正性液晶PAN盒以及负性液晶VAN盒实验时外加电压值。

表1 正性液晶PAN盒和负性液晶VAN盒阈值电压

Tab.1 Threshold voltages of PAN cells with positive liquid crystals and VAN cells with negative liquid crystals

| 液晶材料         | 阈值电压/V |
|--------------|--------|
| E7           | 0.8    |
| 5CB          | 0.7    |
| 81H82300-100 | 3.0    |
| 81H82200-100 | 1.8    |

#### 3.2.2 液晶介电各向异性-频率特性曲线

实验与上述测量液晶盒电容过程类似,差别在于固定液晶盒两端电压而改变施加电压的频率。当测量正性液晶材料的垂直介电常数 $\epsilon_{\perp}$ 和负性液晶材料的平行介电常数 $\epsilon_{\parallel}$ 时,施加在PAN盒和VAN盒的固定电压小于该材料的阈值电压;当测量正性液晶材料的平行介电常数 $\epsilon_{\parallel}$ 和负性液晶材料的垂直介电常数 $\epsilon_{\perp}$ 时,施加在VAN盒和PAN盒的固定电压为 $15\ \text{V}$ ,尽可能满足正性液晶分子垂直取向和负性液晶分子的平行

取向。随后,控制频率在 100~2 000 Hz 的范围内由小到大变化,在相对中低频段,液晶盒电容值随频率变化幅度较大,需缩短频率间隔,测量多组数据。利用液晶盒电容模型计算得到四种液晶材

料在不同频率下精确的  $\epsilon_{//}$  与  $\epsilon_{\perp}$  参数。正性液晶材料(E7 和 5CB)和负性液晶材料(81H82300-100 和 81H82200-100)的介电常数及介电各向异性随频率变化的曲线分别如图 7 和图 8 所示。

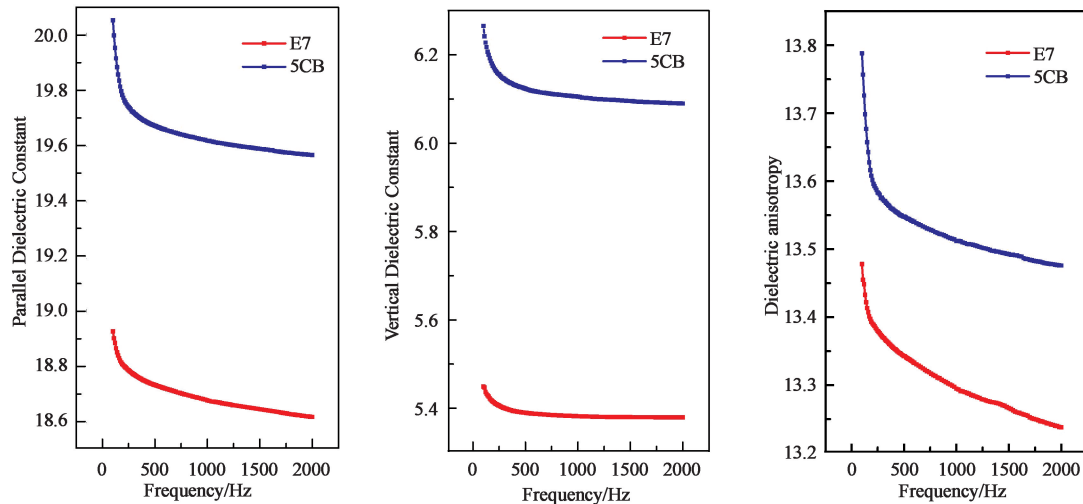


图 7 (a) 正性液晶  $\epsilon_{//}$ - $f$  曲线, (b) 正性液晶  $\epsilon_{\perp}$ - $f$  曲线, (c) 正性液晶  $\Delta\epsilon$ - $f$  曲线

Fig.7 (a)  $\epsilon_{//}$ - $f$  curve of positive liquid crystal, (b)  $\epsilon_{\perp}$ - $f$  curve of positive liquid crystal, (c)  $\Delta\epsilon$ - $f$  curve of positive liquid crystal

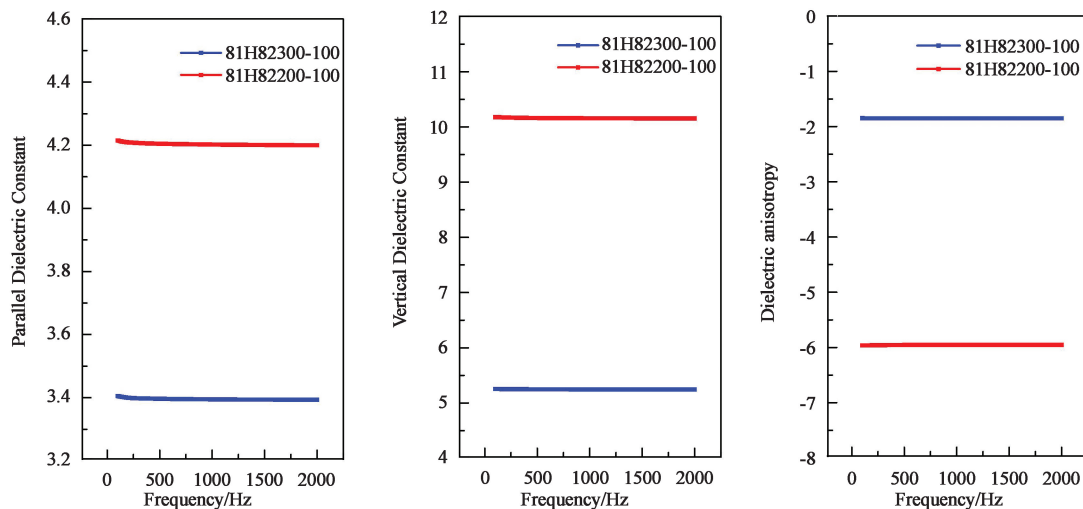


图 8 (a) 负性液晶  $\epsilon_{//}$ - $f$  曲线, (b) 负性液晶  $\epsilon_{\perp}$ - $f$  曲线, (c) 负性液晶  $\Delta\epsilon$ - $f$  曲线

Fig.8 (a)  $\epsilon_{//}$ - $f$  curve of negative liquid crystal, (b)  $\epsilon_{\perp}$ - $f$  curve of negative liquid crystal, (c)  $\Delta\epsilon$ - $f$  curve of negative liquid crystal

由图可知:

(1)外加电压频率在 100~2 000 Hz 范围内变化时,对于正性液晶,平行介电常数  $\epsilon_{//}$  与垂直介电常数  $\epsilon_{\perp}$  整体变化趋势相同。当频率低于 500 Hz 时,  $\epsilon_{//}$  和  $\epsilon_{\perp}$  减小的幅度都较大;当频率在 500 Hz 到 1 500 Hz 变化时,曲线的斜率变小,即  $\epsilon_{//}$  和  $\epsilon_{\perp}$  减小幅度变缓;频率大于 1 500 Hz 时,  $\epsilon_{//}$

和  $\epsilon_{\perp}$  随频率的增加基本保持不变。对于负性液晶,  $\epsilon_{//}$  和  $\epsilon_{\perp}$  随频率的变化基本保持不变。

(2)虽然液晶材料平行介电常数与垂直介电常数随频率变化的趋势大体相同,但是正性液晶的介电各向异性变化为 0.3~0.5,而负性液晶的介电各向异性变化约为 0.02,即不同液晶材料的介电各向异性在这个频段受影响的程度不一致。

(3)控制温度一定时,正性液晶材料的介电各向异性随外加频率的升高而减小,并逐渐趋于平缓;负性液晶材料的介电各向异性随着外加频率的升高基本保持不变。

## 4 结 论

本文通过实验精确测量并计算了四种液晶材料(E7、5CB、81H82300-100、81H82200-100)的平行和垂直介电常数,研究了外加电压频率对这些液晶材料介电各向异性的影响,实验结

果表明:液晶材料的介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 通常与外加电压频率大小相关,温度一定时,正性液晶材料的 $\Delta\epsilon$ 随着频率的升高而减小,且低频下(100~500 Hz)随着频率的增加,介电各向异性减小幅度较大,在中高频(500~1 500 Hz)时, $\Delta\epsilon$ 随频率升高减小幅度逐渐趋于平缓,在高频(1 500 Hz~2 000 Hz)时, $\Delta\epsilon$ 随频率升高减小幅度较小;而负性液晶材料的介电各向异性在实验频段(20~2 000 Hz)基本保持不变。本研究为进一步探索液晶材料的分子结构及组成对其介电性能的影响提供了实验指导。

## 参 考 文 献:

- [1] WU S T, YANG D K. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2014.
- [2] DUNMUR D A, DE LA FUENTE M R, PEREZ JUBINDO M A, *et al.* Dielectric studies of liquid crystals: the influence of molecular shape [J]. *Liquid Crystals*, 2010, 37(6-7): 723-736.
- [3] BELYAEV B A, DROKIN N A, SHABANOV V F, *et al.* Dielectric properties of liquid crystals of the cyano derivative compounds with different fragments in the molecular core [J]. *Physics of the Solid State*, 2004, 46(3): 574-578.
- [4] 高鸿锦.液晶化学[M].北京:清华大学出版社,2011.  
GAO H J. *Chemistry of Liquid Crystal* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011. (in Chinese)
- [5] 郝慧明,张平,张翰卿,等.温度对液晶盒电容的影响[J].液晶与显示,2016,31(8):755-759.  
HAO H M, ZHANG P, ZHANG H Q, *et al.* Influence of temperature on the capacitance of liquid crystal cell [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(8): 755-759. (in Chinese)
- [6] URBAN S, WÜRFLINGER A. *Influence of Pressure on the Dielectric Properties of Liquid Crystals* [M]//RZOSKA S J, ZHELEZNY V P. *Nonlinear Dielectric Phenomena in Complex Liquids*. Dordrecht: Springer, 2004: 211-220.
- [7] POPOVA E V, GAMZAEVA S A, KRIVOSHEY A I, *et al.* Dielectric properties of magnetic nanoparticles' suspension in a ferroelectric liquid crystal [J]. *Liquid Crystals*, 2015, 42(3): 334-343.
- [8] SALAMON P, ÉBER N, BUKA Á, *et al.* Dielectric properties of mixtures of a bent-core and a calamitic liquid crystal [J]. *Physical Review, E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2010, 81(3): 031711.
- [9] RIBEIRO DE ALMEIDA R R, ZHANG C, PARRI O, *et al.* Nanostructure and dielectric properties of a twist-bend nematic liquid crystal mixture [J]. *Liquid Crystals*, 2014, 41(11): 1661-1667.
- [10] LAI C W, TING T L, HSU W H. Dielectric constant measurement of polyimide and liquid crystal at low frequency [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 1679-1680.
- [11] JIAO M Z, GE Z B, SONG Q, *et al.* Alignment layer effects on thin liquid crystal cells [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(6): 061102.
- [12] WU S T, WU C S. Experimental confirmation of the Osipov-Terentjev theory on the viscosity of nematic liquid crystals [J]. *Physical Review A*, 1990, 42(4): 2219-2227.
- [13] 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 [J]. *Nanomaterials*, 2018, 8(1): 8010005.

**作者简介:**戴亚雨(1996—),男,江苏淮安人,主要从事液晶物理及液晶器件物理方面的研究。E-mail:15102225686@163.com

叶文江(1976—),男,河北正定人,博士,副教授,2011年于河北工业大学获得博士学位,主要从事液晶物理及液晶器件物理方面的研究。E-mail:wenjiang\_ye@hebut.edu.cn