

液晶材料电学特性随温度变化研究

吴楠, 黄一洋, 张娇, 范亚凝, 房朴洋, 孔祥明, 蔡明雷, 赵桐州, 杨长勇, 叶文江

引用本文:

吴楠, 黄一洋, 张娇, 等. 液晶材料电学特性随温度变化研究[J]. 液晶与显示, 2021, 36(12): 1605–1613.

WU Nan, HUANG Yi-yang, ZHANG Jiao, et al. Electrical properties of liquid crystal materials with temperature[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(12): 1605–1613.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0218>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

外加电压频率对液晶介电各向异性的影响

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

液晶与显示. 2018, 33(3): 175–181 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183303.0175>

含氟三环NCS液晶材料的介电性能研究

Dielectric properties of fluorine-containing tricyclic NCS liquid crystal materials

液晶与显示. 2018, 33(7): 561–567 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183307.0561>

侧位含氟苯乙炔类液晶化合物的微波介电性能

Microwave dielectric properties of fluorine substituted phenylacetylene liquid crystal compounds

液晶与显示. 2021, 36(7): 913–920 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0025>

含氟三联苯类异硫氰酸酯类液晶合成与微波性能研究

Synthesis and microwave properties of fluorinated terphenyl isothiocyanate liquid crystals

液晶与显示. 2021, 36(9): 1214–1224 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0146>

亚微米级向列相球形液滴中分裂核结构稳定性的探究

Stability of split-core configuration confined in nematic liquid crystal droplets under submicron scale

液晶与显示. 2021, 36(3): 343–354 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0246>

文章编号:1007-2780(2021)12-1605-08

液晶材料电学特性随温度变化研究

吴楠¹, 黄一洋¹, 张 娇¹, 范亚凝¹, 房朴洋², 孔祥明¹蔡明雷^{3,4}, 赵桐州^{3,4}, 杨长勇^{3,4}, 叶文江^{1*}

(1. 河北工业大学 理学院, 天津 300401;

2. 河北工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300401;

3. 河北冀雅电子有限公司, 河北 石家庄 050071;

4. 河北省平板显示器工程技术研究中心, 河北 石家庄 050071)

摘要: 温度变化会对液晶材料的电学特性产生影响。为了深入探究低温下液晶材料的电学特性, 首先, 液晶盒厚度和取向层厚度分别由紫外可见分光光度计和表面轮廓仪测量得到; 然后, 利用精密热台以及基于热电制冷工作原理自制的制冷装置控制液晶盒的温度, 使用校准后的精密 LCR 表分别测得低温和常温下液晶盒电容-电压($C-U$)特性曲线, 由液晶盒电容模型得到液晶层 $C-U$ 特性曲线, 基于该曲线与双盒模型, 得到了温度对 4 种液晶介电各向异性、弹性常数的影响。实验结果表明: 随着温度的升高, 正性液晶材料的介电各向异性从 10.0 增大至 21.0, 弹性常数 k_{11} 从 17.0 pN 减小至 7.0 pN, k_{33} 从 31.0 pN 减小至 16.0 pN; 负性液晶材料的介电各向异性从 -8.5 增大至 -3.0, k_{11} 从 21.0 pN 减小至 11.0 pN, k_{33} 从 31.0 pN 减小至 13.0 pN。即随着温度的升高, 正性液晶材料的介电各向异性和弹性常数 k_{11} 、 k_{33} 均不断减小; 负性液晶材料的介电各向异性不断增大, k_{11} 、 k_{33} 呈现减小趋势。该结论对探究低温下提升液晶显示性能的方法有着重要意义。

关键词: 介电各向异性; 弹性常数; 热电制冷; 液晶盒电容模型; 双盒模型

中图分类号: O753⁺.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2021-0218

Electrical properties of liquid crystal materials with temperature

WU Nan¹, HUANG Yi-yang¹, ZHANG Jiao¹, FAN Ya-ning¹, FANG Pu-yang²,KONG Xiang-ming¹, CAI Ming-lei^{3,4}, ZHAO Tong-zhou^{3,4}, YANG Chang-yong^{3,4}, YE Wen-jiang^{1*}

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

2. School of Materials, Science and Engineering, Hebei University of Technology,
Tianjin 300401, China;

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

4. Hebei Provincial Research Center of FPD Engineering Technology,
Shijiazhuang 050071, China)

Abstract: The change of temperature can affect the electrical properties of liquid crystal (LC)

收稿日期: 2021-08-13; **修订日期:** 2021-09-04.

基金项目: 河北省自然科学基金(No.A2019202235); 河北省高等教育教学改革研究与实践项目(No.2017GJJG018); 河北工业大学教育教学改革研究项目(No.201802003); 中国高等教育学会专项课题(No.21LK YB05)

Supported by Natural Science Foundation of Hebei Province (No.A2019202235); Research and Practice Project of Hebei Provincial Higher Education and Teaching Reform (No. 2017GJJG018); Research Projects of Undergraduate Education and Teaching Reform in Hebei University of Technology (No. 201802003); Special Project of China Association of Higher Education (No.21LK YB05)

* 通信联系人, E-mail: wenjiang_ye@hebut.edu.cn

materials. In order to further explore the electrical properties of LC materials at low temperature, firstly, the thicknesses of the LC cells and the polyimide (PI) alignment layers were measured by UV spectrophotometer and surface profiler respectively. Then, a precision hot stage and a self-made refrigeration device based on the working principle of thermoelectric refrigeration were used to control the temperature of the LC cell, and the precision LCR meter which was calibrated was applied to measure the capacitance-voltage ($C-U$) curve of LC cell at low and normal temperatures. The $C-U$ curve of LC layer could be obtained by using the capacitance model of LC cell, and based on this curve and dual-cell model, the effects of temperature on dielectric anisotropy and elastic constant of four kinds of LCs were obtained. The experimental results show that the dielectric anisotropy of the LC with positive dielectric anisotropy increases from 10.0 to 20.0, and the elastic constant k_{11} decreases from 17.0 pN to 7.0 pN, and k_{33} decreases from 31.0 pN to 15.0 pN. The dielectric anisotropy of the LC with negative dielectric anisotropy increases from -8.5 to -3.0 , decreases from 21.0 pN to 11.0 pN for k_{11} , and from 31.0 pN to 12.0 pN for k_{33} . The dielectric anisotropy and elastic constant k_{11} and k_{33} of the LC with positive dielectric anisotropy decrease with the increase of the temperature, and increase and decrease respectively with increasing temperature for the LC with negative dielectric anisotropy. This conclusion is of great significance for exploring the methods to improve the performance of liquid crystal display at low temperature.

Key words: dielectric anisotropy; elastic constant; thermoelectric refrigeration; capacitance model of LC cell; dual-cell model

1 引言

液晶因为其自身独特的优点,近年来已经广泛应用于显示和非显示领域^[1-3]。但是,液晶性质极其容易受到温度的影响。在高温下,液晶分子取向有序度会大幅降低;在低温下,液晶甚至会转变成晶体。这也直接导致了利用液晶实现显示的器件在低温下不能正常工作。目前用于解决低温液晶显示问题的方法主要有以下几种:提高液晶显示器的驱动电压^[4],运用低温加固技术、外置加热技术以及利用内置氧化铟锡(ITO)导电膜进行加热^[5-6]。但上述几种方法每种都有其局限性,不能有效解决低温下液晶显示器的显示问题。所以,研究低温下液晶材料特性,对比分析其变化规律,改善低温液晶性质是解决低温液晶显示问题的最主要手段。液晶材料介电各向异性 and 弹性常数等参数影响电场作用下液晶分子的取向^[7-9],导致液晶器件显示性能的变化。因此,本文在液晶材料自身及外界影响因素确定的条件下,深入探究了液晶介电各向异性及弹性常数随温度变化的规律。

由于液晶盒的独特结构,可以将液晶盒看

作一个电容器,上下基板取向层以及中间夹着的液晶层电容串联在一起构成了液晶盒的电容,此即液晶盒电容模型^[10-12],由该模型可以计算得到液晶层的电容。利用上述模型,并结合双盒模型^[13],得到正性及负性液晶材料在 $-10\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内阈值电压、介电各向异性以及弹性常数的变化。通过实验发现,液晶材料的介电各向异性随温度的变化呈线性关系,且随着温度升高,正性液晶的介电各向异性不断减小,而负性液晶的介电各向异性不断增大。同时,正、负性液晶的弹性常数 k_{11} 与 k_{33} 随着温度的升高而降低。

2 制冷装置

2.1 制冷装置主要部件

如图 1 所示,制冷装置分别由测量系统、控制系统、制冷系统和散热系统 4 部分组成^[14]。测量系统主要由测量腔室和吊架组成。测量腔室由铝合金制成,具有高热传递效能,有效保证热传递,同时具有易加工,不易锈蚀等优点,其外壁包裹有绝热层,从而减少了热传递。吊架位于测量腔室内部,与测量腔室上盖连接,用于悬吊待测液晶盒。

吊架为聚乳酸或 ABS 塑料经 3D 打印方式制造而成,可以在尽可能紧凑合理的空间实现吊架的功能。紧凑的空间可以在相同制冷功率情况下更快达到目标温度,使制冷装置的制冷效率更高。

控制系统主要包括温度控制器和温度传感器。温度控制器基于预置温度算法和接收到的至少两个温度取值确定测量腔室的温度,从而保证了测量温度的精确度。同时人工可调温度,方便测量确定温度下的液晶的特性。控温精度可达 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,无超调、欠调,有利于测量时液晶盒电容保持稳定,使测量结果误差更小。温度传感器采用具有高灵敏特性的铂电阻,具有偏差极小、性能稳定的优点。温度传感器主要负责检测测量腔室内部的温度并传给温度控制器。二者相互配合,使控制工作进行得更加有序高效。

制冷系统主要部件为半导体制冷片,是一种呈片状结构的双层制冷片,冷端和热端均设置有导热硅脂层,主要作用是对测量腔室进行降温。该系统制冷时不需添加其他辅助制冷材料,不产生任何污染源,产生噪音小、使用寿命长,通过控制输入电流可精准控制腔室内部温度。

散热系统主要由散热器构成。热量通过散热器排出,使半导体制冷片安全、高效工作。

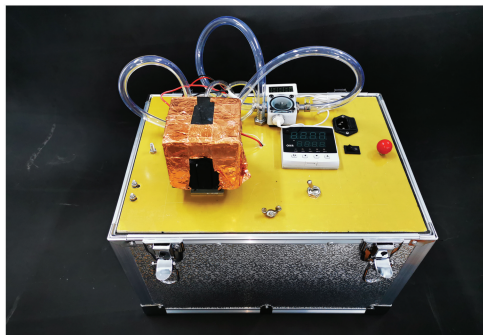


图 1 制冷装置实物图

Fig.1 Physical diagram of refrigeration equipment

2.2 半导体制冷片工作原理

半导体制冷片是利用 Peltier 效应^[15-16]工作的元件,如图 2 所示。该元件由 N 型和 P 型半导体材料构成,N 型半导体存在负性温差电势,P 型半导体存在正性温差电势。两种半导体上端相连为冷端,发生吸热反应,电子流动方向为 P 型半导体指向 N 型半导体;下接头为热端,发生放热反应,电子流动方向相反,从 N 型半导体指向 P

型半导体。利用热交换器等热传导方法可以排出热量,而不会使热端内部温度过高。然后将冷端放入工作环境中,通过冷端不断地吸收热量对腔室进行降温。

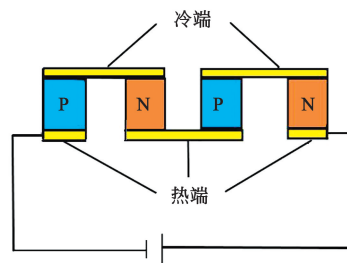


图 2 半导体制冷片工作原理

Fig.2 Working principle diagram of semiconductor chilling plate

3 实 验

3.1 实验材料

河北冀雅电子有限公司提供本实验所用到的正性液晶 1M0951000-000、LXD11100-000,负性液晶 1MA15459-000、JYS93700-020-035 以及平行盒(PAN)、垂直盒(VAN)。液晶空盒的厚度由紫外可见分光光度计(METASH UV-9000S)进行测定,经过测量,PAN 盒厚度为 $3.959\text{ }\mu\text{m}$,VAN 盒厚度为 $4.019\text{ }\mu\text{m}$ 。PAN 盒与 VAN 盒取向层(PI 层)的相对介电常数均为 3.1,并且由表面轮廓仪(Contor GK-T)测得 PI 层的厚度,其中 PAN 盒 PI 层厚度为 53.8 nm ,VAN 盒 PI 层厚度为 22.3 nm 。

3.2 阈值电压-温度曲线

液晶材料阈值电压 U_{th} 的数值通过液晶层的电容-电压($C-U$)特性曲线确定。 $C-U$ 特性曲线的测量由精密热台(LTS 350)和如图 1 所示的热电制冷装置分别控制液晶盒温度为 $55, 45, 35, 25, 0, -5, -10\text{ }^{\circ}\text{C}$,使用精密 LCR 表(Agilent E4980A)实现。

测量前先对精密 LCR 表进行断路校准,然后进行短路校准。校准完成后利用夹持装置夹住液晶盒并与精密 LCR 表连在一起,为了避免外加电压频率的改变对液晶材料的电学特性产生影响,实验测量过程中保持外加 1 kHz 电压频率不变,对液晶盒施加 $0\sim 20\text{ V}$ 的电压,测量得到液晶盒的 $C-U$ 特性曲线^[17],结果如图 3 所示。

利用液晶盒电容模型可以求得液晶层的 $C-U$ 特性曲线,对所得曲线进行归一化处理,找到斜率最大点,通过该点的直线与横轴交点对应的电压值即为该温度下液晶材料 U_{th} 的数值。改变温度,

重复上述操作,可以得到液晶材料阈值电压的温度依赖特性,如图 4 所示。

由图 4 分析可知:

(1)不同液晶材料的阈值电压随温度变化的

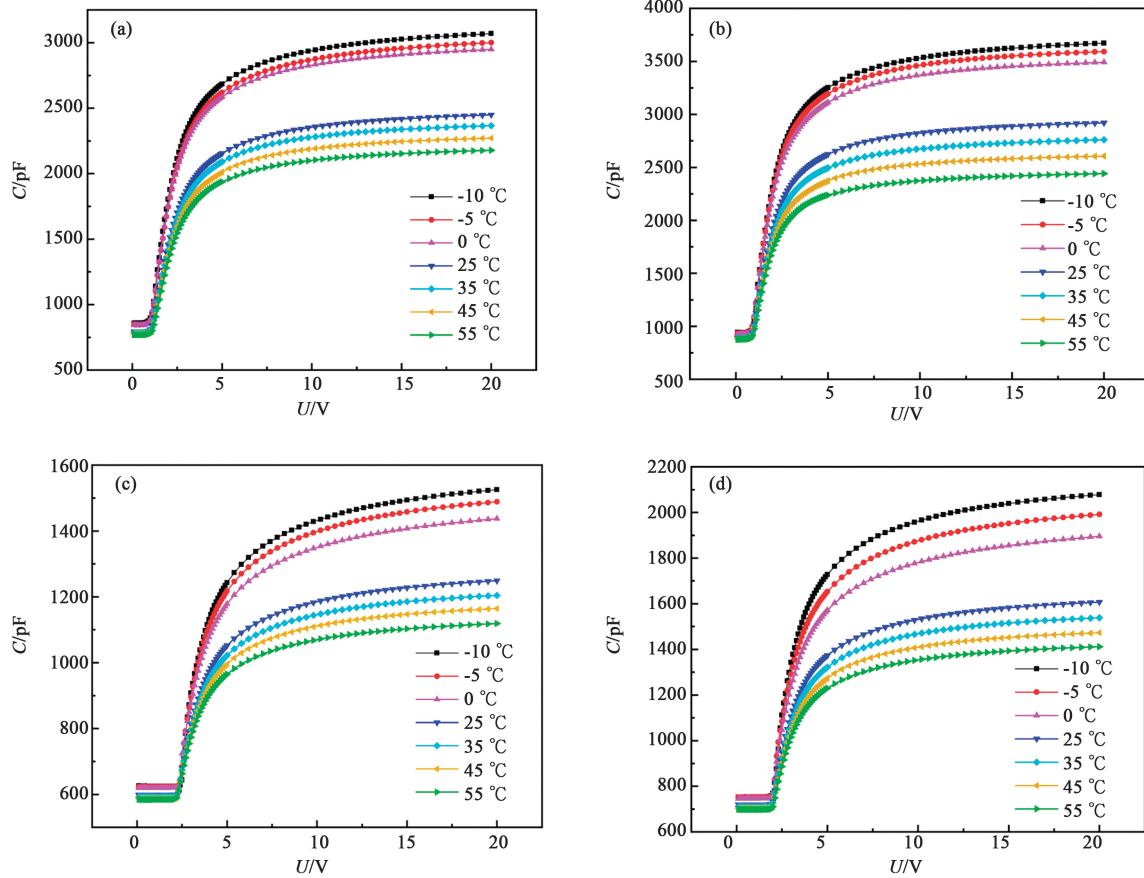


图 3 不同液晶材料液晶盒 $C-U$ 特性曲线。(a) 1M0951000-000; (b) LXD11100-000; (c) 1MA15459-000; (d) JY593700-020-035。

Fig.3 $C-U$ curves of liquid crystal cell with different liquid crystal materials. (a) 1M0951000-000; (b) LXD11100-000; (c) 1MA15459-000; (d) JY593700-020-035.

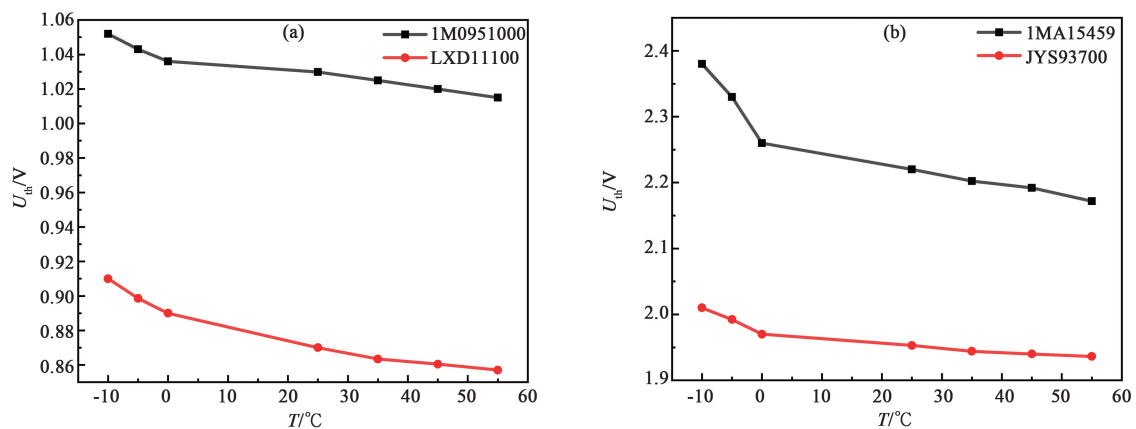


图 4 $U_{th}-T$ 曲线。(a) 正性液晶; (b) 负性液晶。

Fig.4 $U_{th}-T$ curves of liquid crystal with (a) positive and (b) negative dielectric anisotropy

范围并不相同,并且随着温度的升高,正、负性液晶的阈值电压均呈现下降趋势。

(2)对于正、负性液晶材料,低温下阈值电压降低的速度要大于常温下阈值电压降低的速度。

阈值电压作为液晶能够被驱动的最低电压,在显示中起到十分重要的作用。随着温度的变化,液晶材料的阈值电压会发生变化,这也使得驱动电压发生改变,导致液晶显示的功耗增大,对液晶显示器的显示产生一定的影响。

3.3 介电各向异性-温度曲线

液晶材料在不同温度下的介电各向异性由前述测得的液晶层电容值得到。根据得到的液晶层

不同温度下的 PAN 盒与 VAN 盒电容-电压($C-U$)特性曲线,综合运用双盒模型计算得到液晶材料的平行介电常数 $\epsilon_{//}$ 、垂直介电常数 $\epsilon_{\perp}$ 和介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 。

为了确保盒内液晶分子均匀排列,需要对 PAN 和 VAN 盒玻璃基板表面聚酰亚胺(PI)取向层进行摩擦处理,使得其预倾角分别为 1° 和 89° 。考虑到预倾角对测量电容的影响, $\epsilon_{//}$ 和 $\epsilon_{\perp}$ 可根据公式(1)和(2)联立计算给出^[18],其中 ϵ_0 为真空介电常数、 S 为电极面积、 C_{PAN} 和 C_{VAN} 分别是 PAN 盒和 VAN 盒中的液晶层电容, L_{PAN} 和 L_{VAN} 分别是 PAN 盒和 VAN 盒中的液晶层厚度。

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

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

正性和负性液晶材料的 $\epsilon_{//}$ 、 $\epsilon_{\perp}$ 及 $\Delta\epsilon$ 随温度的变化分别如图 5、图 6 和图 7 所示。

由图分析可知:

(1)温度在 $-10 \sim 55^{\circ}\text{C}$ 范围内变化时,对于正性液晶, $\epsilon_{//}$ 与 $\epsilon_{\perp}$ 整体变化趋势相同,即随着温度升高 $\epsilon_{//}$ 和 $\epsilon_{\perp}$ 均减小,同时在低温和常温时减小的速率明显不同。

(2)随着温度的升高,正性液晶介电各向异性

均在减小;而对于负性液晶,随着温度升高,其介电各向异性的绝对值不断减小。

(3)随着温度的升高,正性液晶介电各向异性皆为正值,而负性液晶介电各向异性为负值。并且在同一温度变化范围内,正性液晶介电各向异性变化为 $10.0 \sim 21.0$,而负性液晶的介电各向异性的绝对值变化为 $3.0 \sim 8.5$ 。可见,不同的液晶材料,其介电各向异性受温度的影响程度不同。

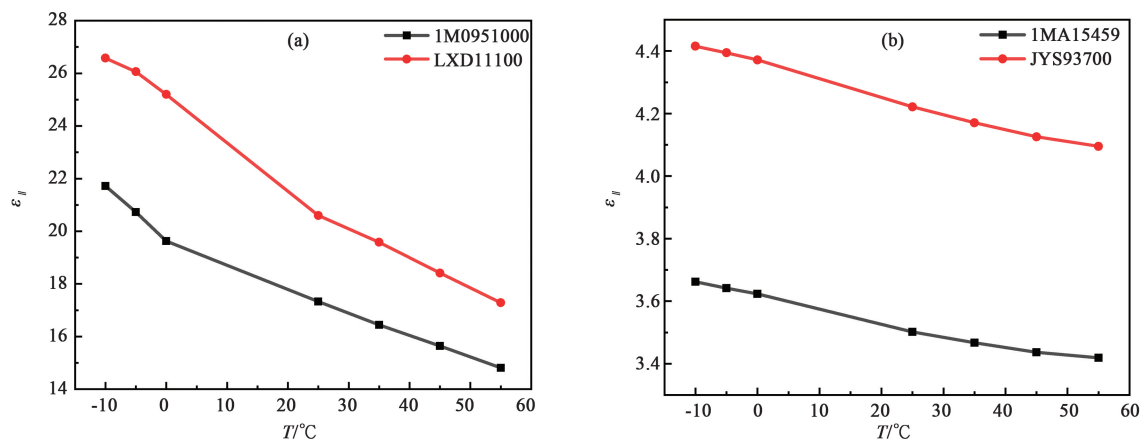
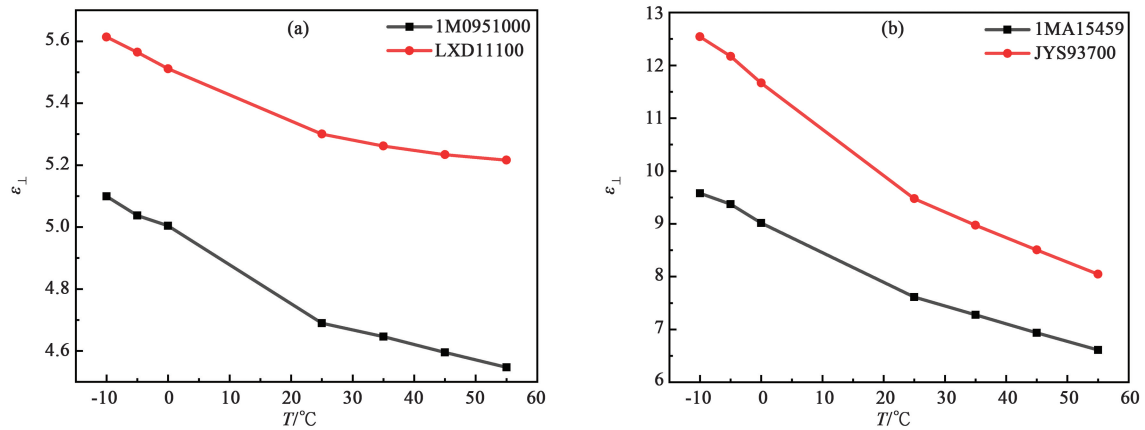
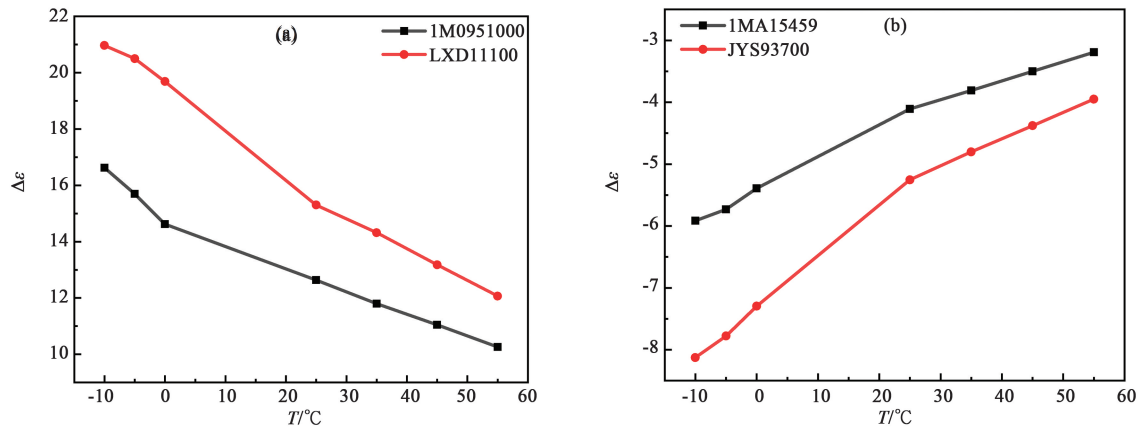


图 5 $\epsilon_{//}$ - T 曲线。(a) 正性液晶; (b) 负性液晶。

Fig.5 $\epsilon_{//}$ - T curves of liquid crystal with (a) positive and (b) negative dielectric anisotropy

图 6 $\epsilon_{\perp}$ - T 曲线。(a) 正性液晶；(b) 负性液晶。Fig.6 $\epsilon_{\perp}$ - T curves of liquid crystal with (a) positive and (b) negative dielectric anisotropy图 7 $\Delta\epsilon$ - T 曲线。(a) 正性液晶；(b) 负性液晶。Fig.7 $\Delta\epsilon$ - T curves of liquid crystal with (a) positive and (b) negative dielectric anisotropy

3.4 弹性常数-温度曲线

液晶材料受到外界电场作用时,其分子取向会发生改变,从而导致液晶可能发生展曲、扭曲或弯曲弹性形变。对于正性液晶,其展曲弹性常数 k_{11} 可由公式(3)计算得到:

$$k_{11} = \epsilon_0 \Delta\epsilon \left(\frac{U_{th}}{\pi} \right)^2. \quad (3)$$

对于负性液晶材料,其弯曲弹性常数 k_{33} 由公式(4)计算得到:

$$k_{33} = \epsilon_0 \Delta\epsilon \left(\frac{U_{th}}{\pi} \right)^2. \quad (4)$$

可以看出液晶材料的弹性常数与阈值电压 U_{th} 和介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 相关,即随着温度的变化弹性常数也会产生变化,因此探究液晶弹性常数随温度的变化也十分有意义。

正性液晶的弯曲弹性常数 k_{33} 数值由数值拟

合方法得到,利用 Visual Fortran 软件,通过不断调整 k_{33} 的输入数值,得到不同的液晶层 C - U 理论模拟特性曲线,通过对比实验测得的 PAN 盒的归一化液晶层 C - U 特性曲线,最佳拟合时的 k_{33} 即为实验所求数值。而对于负性液晶的展曲弹性常数 k_{11} ,利用 Visual Fortran 软件,通过不断调整 k_{11} 的输入数值,得到不同的液晶层 C - U 理论模拟特性曲线,通过对比实验测得的 VAN 盒的归一化液晶层 C - U 特性曲线,最佳拟合时的 k_{11} 即为实验所求数值。

将测得的液晶材料不同温度的阈值电压以及介电各向异性数值代入公式(3)和(4),可以得到正性液晶展曲弹性常数-温度特性(k_{11} - T)曲线以及负性液晶 k_{33} - T 曲线,再利用 Visual Fortran 软件,通过不断改变输入数值进行拟合,从而得到正性液晶的 k_{33} 以及负性液晶的 k_{11} ,正负性液晶

的弹性常数 k_{11} 和 k_{33} 的数值随温度的变化如图 8 和图 9 所示。

由图分析可知:

(1) 对于正、负性液晶的 k_{11} , 在 $-10 \sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 均呈现下降趋势, 并且在同一温度变化范围内, 正性液晶的变化范围为 $7.0 \sim 17.0\text{ pN}$, 而负

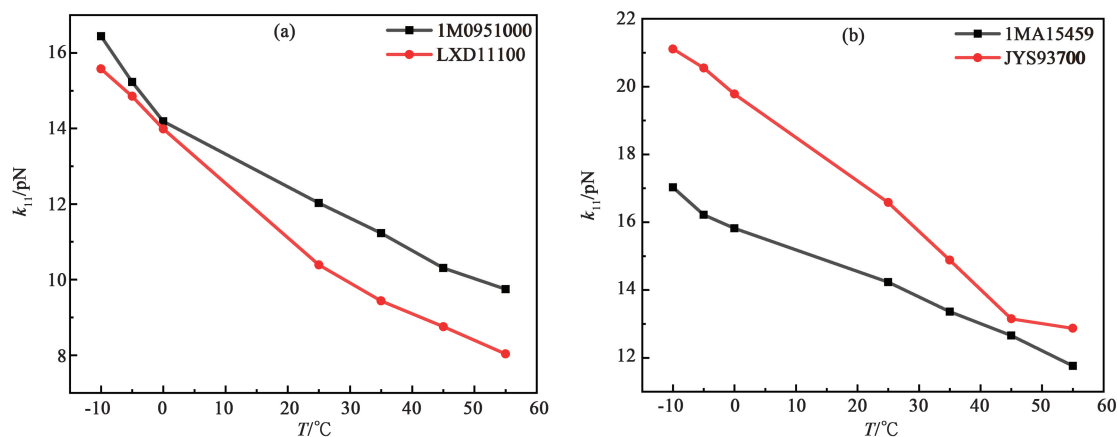


图 8 k_{11} - T 曲线。(a) 正性液晶; (b) 负性液晶。

Fig.8 k_{11} - T curves of liquid crystal with (a) positive and (b) negative dielectric anisotropy

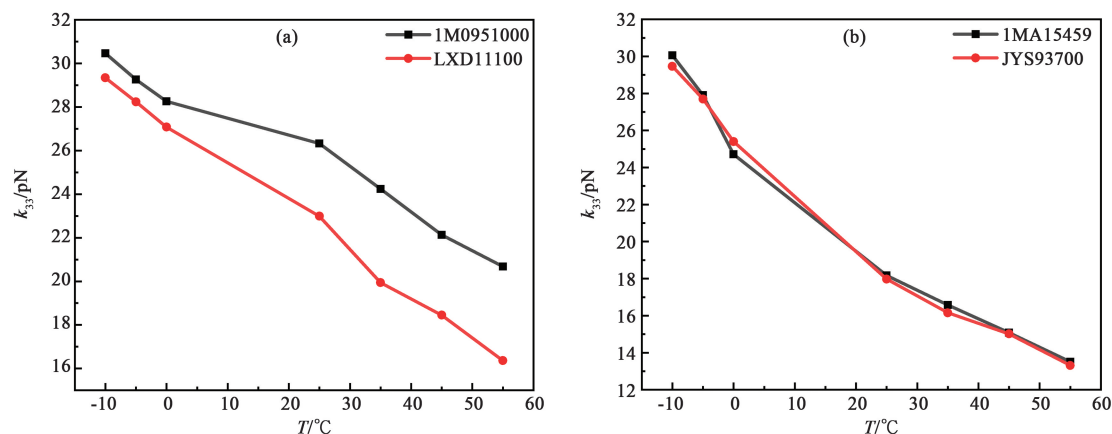


图 9 k_{33} - T 曲线。(a) 正性液晶; (b) 负性液晶。

Fig.9 k_{33} - T curves of liquid crystal with (a) positive and (b) negative dielectric anisotropy

性液晶的变化范围在 $11.0 \sim 21.0\text{ pN}$, 可见不同性质的液晶材料其 k_{11} 的变化范围会有一定的差距。

(2) 对于 4 种液晶材料的 k_{33} , 在 $-10 \sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 总体同样呈下降趋势。在同一温度变化范围内正性液晶 k_{33} 的变化范围在 $16.0 \sim 31.0\text{ pN}$, 负性液晶 k_{33} 变化范围在 $13.0 \sim 31.0\text{ pN}$, 可见同一种液晶的 k_{11} 和 k_{33} 随温度变化的范围会有较大的差距。

随着温度的降低, 液晶材料的弹性常数不断上升, 也使得外场作用下液晶分子受到的弹性形变引起的力矩增大, 导致液晶分子在外场下更难被驱动, 从而对显示产生一定的影响。

4 结 论

本文通过实验精确测量了正性和负性共 4 种液晶材料 (1M0951000-000、LXD11100-000、1MA15459-000、JYS93700-020-035) 的电学参数, 探究了温度变化对液晶介电各向异性和弹性常数的影响, 实验结果表明: 随着温度的升高, 正性液晶的 U_{th} 分别从 1.06 V 减小至 1.01 V , 0.91 V 减小至 0.85 V , 介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 从 10.0 增大至 21.0 , 且为正值, 弹性常数 k_{11} 从 17.0 pN 减小至 7.0 pN , k_{33} 从 31.0 pN 减小至 16.0 pN ; 而负性液晶的 U_{th} 随温度

升高分别从 2.40 V 减小至 2.15 V, 2.05 V 减小至 1.90 V, $\Delta\epsilon$ 随温度的升高从 -8.5 增大至 -3.0, 且为负值, k_{11} 从 21.0 pN 减小至 11.0 pN, k_{33} 从 31.0 pN 减小至 13.0 pN。由此可见, 温度的变化导致液

晶阈值电压等电学参量发生变化, 而这样的变化会影响液晶显示器的驱动电压, 最终会对显示产生影响。因此本文给出的结论, 对进一步提升液晶显示器低温显示性能具有一定指导意义。

参 考 文 献:

- [1] KIM T, LEE J H, YOON T H, *et al.* Reflective dual-mode liquid crystal display possessing low power consumption and high contrast ratio under ambient light [J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15522-15529.
- [2] 林述锋, 沈田子. 氧化石墨烯液晶的光电特性与显示应用[J]. 液晶与显示, 2020, 35(7): 733-740.
LIN S F, SHEN T Z. Electrical-optical properties of graphene oxide liquid crystal and its applications [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 733-740. (in Chinese)
- [3] PRAKASH J, CHANDRAN A, BIRADAR A M. Scientific developments of liquid crystal-based optical memory [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2017, 80(1): 016601.
- [4] MRUKIEWICZ M, KOWIORSKI K, PERKOWSKI P, *et al.* Threshold voltage decrease in a thermotropic nematic liquid crystal doped with graphene oxide flakes [J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2019, 10: 71-78.
- [5] YOUSEFI M, ROZATI S M, NAJAFI N. Investigation of the effect of temperature on the structural, optical, electrical, and self-cleaning properties of ITO thin films [J]. *Applied Physics A*, 2020, 126(7): 523.
- [6] YANG S, WANG S R, LIAO H, *et al.* Improving the performance of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin film solar cell by engineering the ITO film thickness [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2020, 589: 412196.
- [7] LI J, CHE Z Y, MO L C, *et al.* 5,6-Difluorobenzofuran: a new core for the design of liquid crystal compound with large dielectric anisotropy and broad nematic range [J]. *Liquid Crystals*, 2021, 48(2): 273-280.
- [8] FOUZAI M, GUESMI A, BEN HAMADI N, *et al.* Fluoro-substitution in hydrogen bonding liquid crystal benzoic acid: dielectric, electro-optic and optical properties and inducing polar nematic phase [J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(5): 777-784.
- [9] LI J, YANG X Z, WAN D Y, *et al.* Increasing the negative dielectric anisotropy of liquid crystals by fluorination of the terminal ethyl chain [J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(14/15): 2268-2275.
- [10] ONNAGAWA H, MIYASHITA K. Electric field dependence of the capacitance of a twisted nematic liquid crystal cell [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1975, 14(7): 1061-1062.
- [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] 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): 5.
- [13] DAI Y Y, GAO L, CHANG Y K, *et al.* Dielectric and elastic properties of fluorine-containing tricyclic isothiocyanate liquid crystal [J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(6): 930-940.
- [14] GAO N, JING S, KONG X M, *et al.* Low-temperature properties of nematic liquid crystal materials for display [J]. *Liquid Crystals*, 2021, doi: 10.1080/02678292.2021.1892222.
- [15] 杨振, 朱璇, 柯亚娇, 等. Peltier 效应: 从线性到非线性[J]. 物理学报, 2021, 70(10): 108402.
YANG Z, ZHU C, KE Y J, *et al.* Peltier effect: from linear to nonlinear [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(10): 108402. (in Chinese)
- [16] 王子昂, 黄富瑜, 邹昌帆, 等. 基于帕尔贴效应的双波段自适应标定板设计[J]. 光子学报, 2019, 48(9): 0912002.
WANG Z A, HUANG F Y, ZOU C F, *et al.* Design of dual-band adaptive calibration checkerboard based on Peltier effect [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(9): 0912002. (in Chinese)
- [17] 戴亚雨, 高林, 庞泽, 等. 外加电压频率对液晶介电各向异性的影响[J]. 液晶与显示, 2018, 33(3): 175-181.
DAI Y Y, GAO L, PANG Z, *et al.* Influence of the frequency of external applied voltage on the dielectric anisotropy of liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(3): 175-181. (in Chinese)

- [18] 高林,戴亚雨,常雨珂,等.含氟三环 NCS 液晶材料的介电性能研究[J].液晶与显示,2018,33(7):561-567.

GAO L, DAI Y Y, CHANG Y K, *et al*. Dielectric properties of fluorine-containing tricyclic NCS liquid crystal materials [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(7): 561-567. (in Chinese)

作者简介:



吴楠(2000—),男,天津人,大学本科,主要从事液晶物理及液晶器件物理方面的研究。E-mail:1654283089@qq.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