

文章编号:1007-2780(2022)08-1095-09

负性液晶材料光电参数对聚合物稳定液晶器件 响应特性的影响

王凯宇^{1,2}, 白龙飞^{1,2}, 谢丽娟^{1,2}, 高冬宁^{1,2}, 闫旭东^{1,2}, 余辉^{1,2}, 袁冬^{1,2*}

(1. 华南师范大学 国家绿色光电子国际联合研究中心, 华南师范大学-荷兰埃因霍温理工大学响应型材料与器件集成国际联合实验室, 广东 广州, 510006;
2. 华南师范大学 华南先进光电子研究院, 彩色动态电子纸显示技术研究所, 广东省光信息材料与技术重点实验室, 广东 广州, 510006)

摘要:当前聚合物稳定液晶器件的光电响应特性尚未完全满足智能窗的实用需求。材料的自身特性是决定液晶器件性能的关键,因此本文重点研究了负性液晶材料的介电各向异性和双折射率两项核心参数对聚合物稳定液晶器件光电响应特性的影响趋势,并给出对应的最佳参数。本文采用实验和仿真相结合的研究方法,首先选用具有不同参数的负性液晶材料制备聚合物稳定液晶器件,研究分析介电各向异性对器件光电性能的影响。然后通过仿真模拟,研究负性液晶材料的双折射率对器件光电效应的影响。最后通过实验和仿真结果的综合分析得出最佳负性液晶参数。研究结果表明,介电各向异性越大,液晶分子越容易被电场驱动,液晶器件的光电性能也就越好。在固定聚合物稳定网络双折射率的情况下,当负性液晶的双折射参数为 $n_e=1.49$ 、 $n_o=1.593$ 时,可达到最优雾度。这一研究结果可为聚合物稳定液晶器件性能的优化及产业化发展提供理论指导。

关键词:聚合物稳定液晶器件;智能窗;负性液晶;光电特性

中图分类号:TN141.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2022-0124

收稿日期:2022-04-14;**修订日期:**2022-05-12.

基金项目:国家重点研发计划(No. 2020YFE0100200);广东省自然科学基金(No. 2020A151501715);广州市科技计划(No. 2019050001);“广东省特支计划”本土创新创业团队(No. 2019BT02C241);教育部“长江学者和创新团队发展计划”项目滚动支持(No. IRT_17R40);国家绿色光电子国际联合研究中心,教育部光信息国际合作联合实验室,广东省光信息材料与技术重点实验室项目(No. 2017B030301007);国家“111”计划(No. D16009)

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2020YFE0100200); Natural Science Foundation of Guangdong Province, (No. 2020A151501715); Science and Technology Program of Guangzhou (No. 2019050001); Program for Guangdong Innovative and Entrepreneurial Teams (No. 2019BT02C241); Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Teams in Universities (No. IRT_17R40); National Center for International Research on Green Optoelectronics, International Laboratory of Optical Information Technologie (LOIT), Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Information Materials and Technology (No. 2017B030301007); “111” Project of China (No. D16009)

*通信联系人, E-mail: yuandong@senu.edu.cn

Effect of photoelectric parameters of negative liquid crystal on photoelectric characteristics of polymer stabilized liquid crystal devices

WANG Kai-yu^{1,2}, BAI Long-fei^{1,2}, XIE Li-juan^{1,2}, GAO Dong-ning^{1,2},
YAN Xu-dong^{1,2}, YU Hui^{1,2}, YUAN Dong^{1,2*}

(1. SCNU-TUE Joint Lab of Device Integrated Responsive Materials (DIRM), National Center for International Research on Green Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou 510006, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Information Materials and Technology, Institute of Electronic Paper Displays, South China Academy of Advanced Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The photoelectric response characteristics of polymer-stabilized liquid crystal (PSLC) devices have not yet fully met the practical needs of smart windows. The characteristics of the liquid crystal material itself are fundamental to determine the photoelectric properties of the liquid crystal device. Therefore, in this paper, the influences of dielectric anisotropy and birefringence of negative liquid crystal materials on the photoelectric response characteristics of PSLC devices are studied, and the corresponding optimal parameters are given. This work adopts the research method of combining experiment and simulation. Firstly, the negative liquid crystal materials with different parameters are selected to prepare PSLC devices, and the effect of dielectric anisotropy on photoelectric properties of the devices are studied and analyzed. Then, the effect of birefringence of negative liquid crystal material on photoelectric effect of PSLC is studied by simulation. Finally, the optimal negative liquid crystal parameters are obtained through comprehensive analysis of experimental and simulation results. The results show that the photoelectric performance of PSLC device is better when the dielectric anisotropy is larger, this is because the liquid crystal molecules can be driven more easily by the electric field. In the case of fixed polymer stabilized network birefringence, when the birefringence of the negative liquid crystal is $n_e=1.49$, $n_o=1.593$, the optimal haze is obtained. These results can provide theoretical guidance for the performance optimization and industrialization of PSLC devices.

Key words: polymer stabilized liquid crystal; smart windows; negative liquid crystals; photoelectric effect

1 引言

进入 21 世纪以来,低碳与环保日益成为时代的主题。随着社会的发展,国家和社会对于可优化的低能耗和可持续性器件的需求逐步增大。在我国能源消耗当中建筑物能耗损失更是占比 20% 之多,而光学玻璃作为居民建筑的重要组成部分,对其进行相应的优化处理,可以增强对自然光 30% 以上的利用率^[1]。随着研究的不断深入,以液晶材料作为夹层的新型智能窗备受研究人员青睐。用液晶窗户代替传统的玻璃窗户或大面积的玻璃幕墙,不仅可以达到采暖、节能的

目的,还能实现“人窗互动”,使得站在窗前的人们可以获得天气变化、交通情况以及其他个人所需的信息^[2]。

当前液晶智能调光玻璃主要有聚合物分散液晶(Polymer Dispersed Liquid Crystal, PDLC)智能窗^[3-4]、聚合物稳定液晶(Polymer Stabilized Liquid Crystal, PSLC)智能窗^[5]以及有手性掺杂剂的胆甾型液晶(Polymer Stabilized Cholesteric Liquid Crystals, PSCLC)智能窗^[6]等。在这几类液晶智能窗中,PDLC 器件初始状态为不透明状态,刺激响应后变为透明状态,但是在实际应用当中,智能玻璃大多数时间需要处于透明状态。

PSLC 器件虽然可以通过调节手性掺杂剂的比例来调整初始状态下的透明度,但是其响应时间较长,而且驱动电压过高,并不能很好地满足节能环保的初衷。而由 PSLC 器件制成的智能窗恰好能够解决上述的两个问题,同时由于其阈值电压较低、响应时间短、对比度高和视角较宽等特点,使得它也可以广泛应用于可切换的窗口、显示器、空间光调制器、全息图形成的光调制器和温度传感器等其他设备^[7-8]。对于 PSLC 而言,根据其液晶取向可以分为两类:基于平行取向的正性液晶和基于垂直取向的负性液晶。虽然两者的制备工艺相近,但是据报道,基于负性液晶的 PSLC 器件在通电情况下模糊度要高于基于正性液晶的 PSLC 器件 10% 以上^[9]。因此,本文聚焦于垂直取向的负性液晶的聚合物稳定液晶器件的优化方法。

虽然目前 PSLC 器件已经被广泛研究,但是对于当前智能窗而言,仍需要将雾度控制在 85% 以上,驱动电压控制在 24 V 以下,科研人员需要改善优化驱动及光透过率等光电参数。目前已经被报道的优化方法主要包括以下几种:(1)研究新的聚合物单体材料和光聚合方法^[10-11],提高液晶材料的介电各向异性和双折射率,降低驱动电压。(2)掺杂纳米金属材料^[12-13]改变液晶的物理性质,同时驱动电压下降约 30%。(3)设计各种新型电极结构^[14],实现对于液晶性质的最大化利用。但是相较而言,提升 PSLC 器件光电性能最根本的方法还是基于负性液晶材料的光电参数的优化。

因此,本文通过实验得到液晶材料不同介电各向异性对器件光电性能的影响,再利用仿真模拟调整寻常光折射率和非寻常光折射率,得到负性液晶材料参数对 PSLC 器件光电特性的影响趋势,从而指导 PSLC 器件的设计和优化。

2 材料与实验设计

2.1 材料

PSLC 器件制备所需材料如下:负性液晶(Negative liquid crystal, NLC)(江苏和成显示股份有限公司)、可光聚合的液晶单体 RM82(默克公司)和光引发剂 IR651(江苏和成显示股份有限公司),RM82 和 IR651 的结构式如图 1 所示。将上述材料按表 1 中的质量分数进行配比。

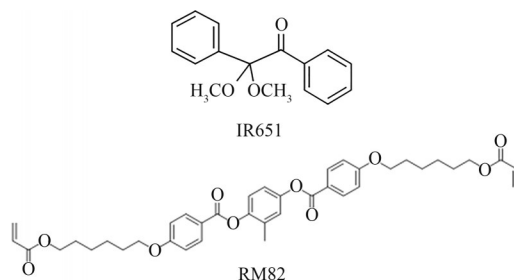


图 1 RM82 和 IR651 的结构式

Fig. 1 Chemical structures of RM82 and IR651

表 1 实验所需材料的比例(质量分数)

Tab. 1 Proportion of material required for the experiment (mass fraction)

材料	比例/%
NLC	96.5
RM82	3
IR651	0.5

为了探究不同负性液晶的光学各向异性(Δn)和介电各向异性($\Delta \epsilon$)对 PSLC 器件光电性能的影响,本文寻找到 4 种光学各向异性和电学各向异性不同的负性液晶(HNG30400-200、HNG60700-200、HNG708200-100、HNG741200-000)(江苏和成),具体液晶材料性质如表 2 所示。

表 2 实验所需负性液晶的物理特性

Tab. 2 Proportion of material required for the experiment

样品	负性液晶	双折射率 (Δn)	寻常光 折射率(n_o)	非寻常光 折射率(n_e)	介电各向 异性($\Delta \epsilon$)	垂直方向上 介电常数($\epsilon_{\perp}$)	平行方向上 介电常数($\epsilon_{\parallel}$)
S1	HNG30400-200	0.149	1.484	1.633	-8.3	12.9	4.6
S2	HNG60700-200	0.15	1.49	1.64	-5	9	4
S3	HNG708200-100	0.078	1.475	1.553	-2.3	5.3	3
S4	HNG741200-000	0.075	1.474	1.549	-8.9	13.8	4.9

其中 S1 和 S2、S3 和 S4 两者彼此之间双折射率相近,但介电各向异性相差甚远,S1 和 S4、S2 和 S3 彼此介电各向异性相近,但是双折射率不同,因此可以通过之后的光电效应来判断其中负性液晶的光电参数对于 PSLC 器件的影响。

将表 2 的材料按照表 1 的配比在室温下混合得到聚合物稳定液晶前驱体。

2.2 器件制备

在氧化锡锡玻璃(Indium Tin Oxides, ITO)基板上旋涂垂直取向聚酰亚胺材料(深圳市道尔顿电子材料有限公司 DL-4018, 固含量 5%, 230 °C, 90 min)并加热固化,完成垂直取向层的制备。将上述两块玻璃基板的 ITO 面相对,用均匀混有 5 μm 大小间隔子(深圳市纳微科技有限公司)的紫外固化剂(深圳三信鸿胶业有限公司)粘合在一起后用紫外光源固化,制备成液晶盒。

将上述 4 种混合液晶材料通过毛细作用在 60 °C 的热台上填充进液晶盒,待填充均匀后,使液晶盒自然冷却到室温状态。然后利用紫外光源进行液晶聚合物网络的光聚合,聚合时间为 300 s,光强为 27 W/cm²,完成 PSLC 器件的制作。

2.3 测试方法

为了分析聚合物稳定液晶器件的光电特性,利用图 2 的装置进行测量。如图 2 所示,白色光源正入射到 PSLC 器件上,透过 PSLC 器件的光信号由带积分球的光纤光谱仪(Ocean Optics HR2000+)测量并获得透射光谱。其中 PSLC 器件两端的电压由函数发生器(Agilent, 33220A)控制,测试响应时间则需使用光电二极管(FSD1010, Thorlabs),将传输到积分器中的光信号放大到计算机中,由 LabVIEW 程序采集以得到相应的响应时间。

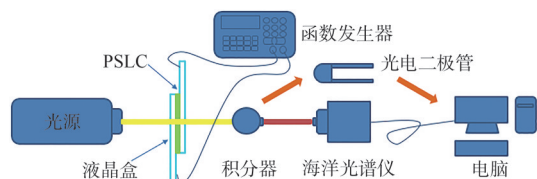


图 2 透射率和响应时间测量实验设置

Fig. 2 Experimental setup of transmittance and response time measurement

2.4 光学模拟

在本次模拟计算中,使用 Lumerical FDTD

Solutions 软件^[15-18]建立三维模型来模拟器件的光学特性。由于真实的器件是放置在空气中的,所以设置背景材料的折射率为空气折射率 1,环境温度为 300 K。光源选择平面波光源照射,波长范围为 400~700 nm。而关于聚合物稳定液晶器件的结构建模,则是基于之前研究工作中 PSLC 器件的微观结构^[19-20],分别采用二维沃诺伊图和三维沃诺伊图^[21]来表示器件中的液晶畴和聚合物网络结构。

3 结果与分析

3.1 介电各向异性对 PSLC 器件驱动特性的影响

4 种器件的电压响应特性测试结果如图 3 所示。图 3(a)为所用不同负性液晶的 PSLC 器件的 V-T 曲线。可以看出当液晶为 S1 时,阈值电压较低,且在高电压时透射率最低,器件最模糊。同样结合表 2 可以看出,对于前两种负性液晶,它们的双折射率几乎一样,但是液晶 S1 的介电各向异性较大,所以其阈值电压较低;后两种负性液晶的双折射率也几乎相同,负性液晶 S4 的介电各向异性较大,且两者相差较大,所以液晶 S4

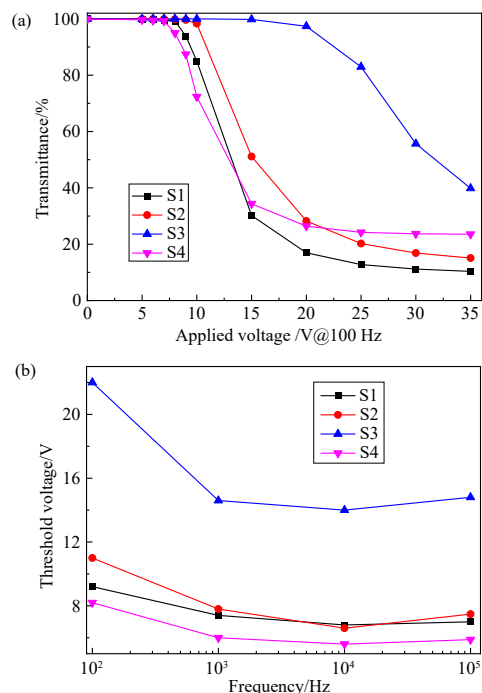


图 3 不同负性液晶的光电特性曲线。(a) V-T 曲线; (b) f-V 曲线。

Fig. 3 Photoelectric characteristic curves of different negative liquid crystals. (a) V-T curves; (b) f-V curves.

的阈值电压较低。从上述比较可以看出,介电各向异性越高,器件的阈值电压越低。这是由于液晶介电各向异性越高,液晶分子越是平行或者大致平行于其长轴的永久偶极矩,偶极子越能被电场所取向,也就是阈值电压越低。

图3(b)是不同负性液晶的PSLC器件的阈值电压随频率变化曲线。可以看出这4种不同负性液晶所组成的PSLC器件随频率变化的特性几乎是一致的。当频率从100 Hz逐渐增加到 10^5 Hz时,阈值电压呈现先降低后增高的趋势,其中在频率为 10^4 Hz时,阈值电压最低。这4种不同的PSLC器件有着相同的频率调制特性,因此我们可以得到液晶的介电常数并不会影响阈值电压与频率变化的结论,这是因为施加的电压频率并不会改变液晶分子长轴偶极矩本身,也不会改变液晶分子完全取向的电压大小。

3.2 介电各向异性对PSLC器件响应时间的影响

为了使4种PSLC器件均达到最模糊状态,采用电压和频率为35 V、 10^4 Hz驱动,并用光电二极管得到器件响应时间,如图4所示。从结果

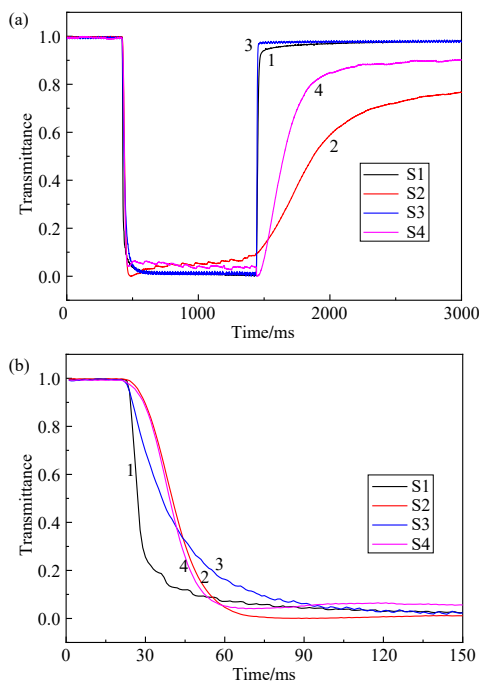


图4 4种不同负性液晶组成的PSLC器件的响应时间。

(a)响应时间;(b)下降沿时间。

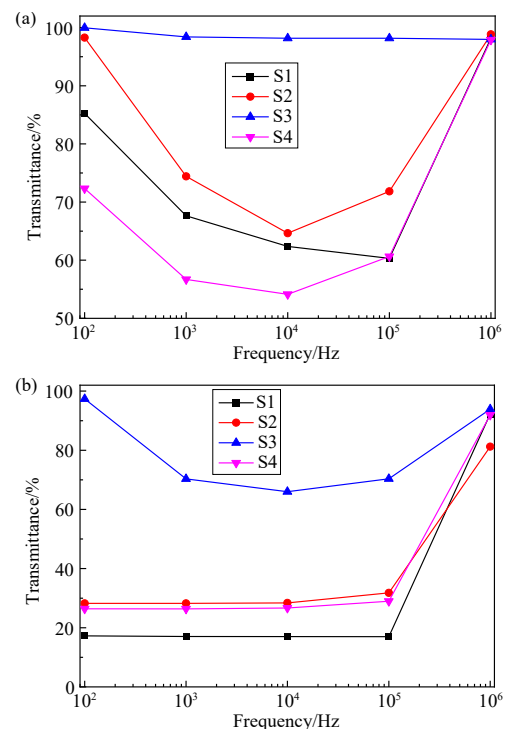
Fig. 4 Response time of four PSLC devices consisting of four different negative liquid crystals. (a) Response time; (b) Falling edge.

可以清楚地看到,S1所代表的器件的下降沿时间是最短的,S3所代表的器件的下降沿是最长的。而对于上升沿时间,则可以很清楚地看到S1和S3所代表的器件的上升沿时间是最短的,而S2和S4所代表的器件的上升沿时间是很长的。这是由于液晶介电各向异性越大,说明液晶分子越是平行或者大致平行其长轴的永久偶极矩,因此在同等条件刺激下,液晶分子更容易达到响应状态。当撤去响应后,液晶分子也能更快速回到初始状态,表现在宏观状态下,即液晶介电各向异性越大,响应时间也就越短。

3.3 介电各向异性对PSLC器件频率响应特性的影响

不同驱动频率下由不同负性液晶所组成的PSLC器件的透射率变化是不同的,如图5所示。图5(a~c)分别描述了在10,20,30 V下由不同负性液晶组成的PSLC器件的透射率与驱动电压、频率的曲线。

从图5(a)中可以看出,当施加电压为10 V, S1、S2和S4的PSLC器件的频率从100 Hz增加到 10^5 Hz时,器件的透射率呈现先降低后增高的趋势,在频率为 10^4 Hz时可以获得最低的透射率。当频率从 10^5 Hz增大到 10^6 Hz时,器件的透射率则逐步增大到最大。这是由于在未达到阈



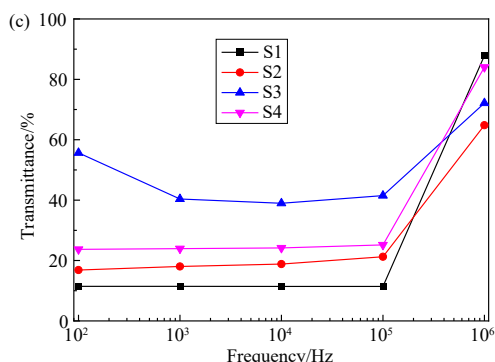


图5 不同电压下不同负性液晶的频率调制曲线。(a)10 V; (b)20 V;(c)30 V。

Fig. 5 Frequency modulation curves of different negative liquid crystals at different voltages. (a) 10 V; (b) 20 V; (c) 30 V.

值电压的电场中,液晶的电响应主要与液晶自身的取向弛豫速率有关,取向弛豫速率会随着频率的增加而更好地帮助液晶分子沿着电场方向取向。但是这一频率存在阈值条件,当超过或者远超过阈值频率后,液晶分子对电场的刺激来不及响应,从而在宏观角度,器件呈现初始的模糊态。而对于S3而言,随着频率的逐渐增大,器件的透射率几乎不发生变化,这是由于此时电压未达到其驱动电压。

当施加电压增加为20 V和30 V时,S1、S2和S4的PSLC器件透过率在频率从100 Hz增加到 10^5 Hz的变化可以忽略不计,超过 10^5 Hz之后,透过率大幅上升。而S3所代表的PSLC器件,当频率从100 Hz增加到1 000 Hz时,透过率会有小幅度的下降,这是由于液晶自身的取向弛豫速率与施加的电场有关,越趋近于阈值电压,取向弛豫速率对液晶取向的影响越小,因此当外加电场达到阈值电压后,会出现透率先不变后增大的现象。由此可知,对于这4种器件而言,阈值频率为 10^5 Hz,超过此阈值器件会呈现初始的模糊态。

3.4 折射率对PSLC器件光电效应的影响

由图3(a)可知,当4个PSLC器件同时处于35 V、100 Hz电场时,S1和S2与S4和S3相比要更加模糊,透过率更低。这是由于在双折射率上前两者要明显高于后两者,但是对于S1和S2两者而言,透过率也有明显的差别。由表2可知,这应该是由两者的寻常光折射率和非寻常光折射

率不同导致的。

但是对于双折射率相近,寻常光折射率和非寻常光折射率明显不同的材料并不多见。因此我们可以采用计算机仿真的方法,测试可得由负性液晶S1组成的PSLC器件液晶网络结构的光学参数为 $n_e=1.673$ 、 $n_o=1.57$ 、 $\Delta n=0.103$,而S1负性液晶的光学参数如表2所示,即 $n_e=1.633$ 、 $n_o=1.482$ 、 $\Delta n=0.149$ 。通过改变负性液晶的寻常光折射率、非寻常光折射率和双折射率参数计算工作状态下的器件雾度。每组折射率按等差数列方式递增,每组为5个计算数据。具体折射率设置参数如图6所示。实验的plan 1,在保持非寻常光折射率不变的条件下通过改变液晶的寻常光折射率来探究寻常光折射率对PSLC器件散射的影响。plan 2,在保持寻常光折射率不变的条件下,通过改变液晶的非寻常光折射率来探究非寻常光折射率对PSLC器件散射的影响。plan 3,改变负性液晶的双折射率使其与液晶网络结构双折射率相同,即 $\Delta n=0.103$,通过等差增加负性液晶的寻常光折射率和非寻常光折射率,来研究双折射率对PSLC器件散射的影响。

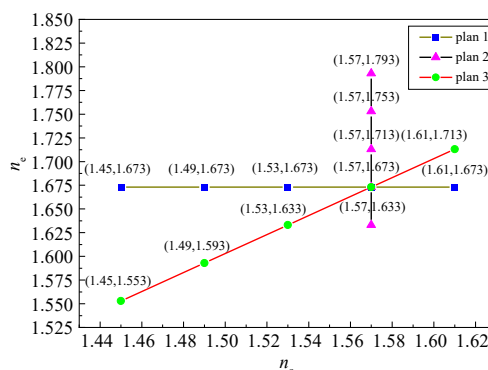


图6 3种折射率参数走势图

Fig. 6 Chart of three refractive index parameters

通过控制PSLC器件中负性液晶的非寻常光折射率、寻常光折射率与双折射率不变,改变相对应的器件的光学折射率,从而得到液晶器件工作状态下的雾度曲线图。在工作状态下,控制非寻常光折射率不变,随着寻常光折射率的增加,雾度先减小后逐渐增加,如图7中plan 1所示。这是由于寻常光折射率是指分子对于入射光线的阻碍能力,因此寻常光折射率越大,对于入射光线的阻碍能力就越强。但是不能一味地

增加寻常光折射率,因为随着寻常光折射率的增加,工作状态下雾度在增加,器件常态下的雾度也将增加,这是器件所不能接受的。

在工作状态下,控制寻常光折射率不变,随着非寻常光折射率的增加,雾度先增加后减小再增大,呈现波动状态,如图7中 plan 2 所示。这是由于非寻常光折射率是指液晶分子对于入射光线方向的改变能力,其指向矢方向与入射光线垂直,在常态下只调控入射光线的方向,不影响透过率的大小。但是在电场驱动作用下,液晶分子偏转,原本垂直于入射光线的非寻常光折射率在入射光线方向有着更大的分量,因此液晶的非寻常光折射率越大,在电场的驱动下器件越模糊。但是这一趋势同时也受到液晶畴和聚合物网络的折射率匹配率的影响,当液晶畴和聚合物网络的折射率越匹配,透过率也将越高,故器件的透过率呈现先增大再减小后增大的波动曲线。要控制液晶器件在工作状态下达到最模糊的效果,应该控制寻常光折射率和非寻常光折射率之间的大小关系。

因此,plan 3 固定液晶双折射率与网络双折射系数相匹配,使二者双折射系数相同,即 $\Delta n=0.103$,然后等差增加寻常光折射率和非寻常光折射率,结果如图7中 plan 3 所示。在工作状态下,控制双折射率不变,随着寻常光折射率和非寻常光折射率的等差增加,器件雾度呈现先增大后减小再增大最后减小的波动状态,这主要是由于在液晶各项介电常数固定之后,液晶分子矢量在工作状态下偏转的角度是固定的,当液晶的寻常光折射率和非寻常光折射率等差增加时,由于偏转角度固定的原因,在工作状态下,偏转的液晶分子对于入射光线的散射作用受限于其双折射率与液晶聚合物网络折射率的失配程度,对于本文使用的液晶聚合物网络材料而言,当负性液晶的双折射参数为 $n_e=1.49$ 、 $n_o=1.593$ 时,器件可以达到最大的雾度值。同时值得注意的是,曲线在达到最大值之后,呈现先减小后增大的现

象,这是由于随着非寻常光折射率的增加,偏振交叉效果增强,器件散射效果增强,入射光线会在器件当中发生多重散射,这会影响器件的雾度。理论上偏振交叉越大,器件散射能力越强,但是总体而言,器件对于光线的阻碍能力还是基于对于入射光线直接的阻碍能力。

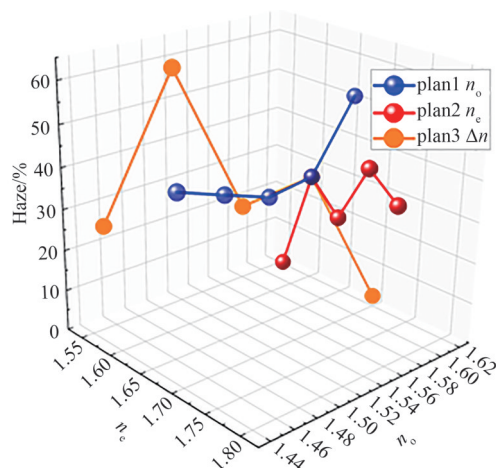


图7 负性液晶双折射率对PSLC器件雾度影响模拟仿真
Fig. 7 Simulation of the effect of negative liquid crystal birefringence on the haze of PS LC devices

4 结 论

本文研究了负性液晶中介电各向异性和双折射率对PSLC器件的光电效应的影响。从液晶材料本身性质入手,研究了双折射率和介电各向异性对PSLC器件光电响应特性的影响趋势,并得到介电各向异性越大,器件光电性能越好这一结论。通过模拟仿真控制负性液晶介电各向异性为 -8.3 时得到最优双折射率参数($n_e=1.49$, $n_o=1.593$)并在工作状态下达到最大雾度值。这一结果可以更好地指导聚合物稳定液晶器件的设计。同时通过实验与仿真相结合的手段,节约了实验材料,大幅减少了试验设计成本和生产成本,对PSLC器件后续的发展有指导意义。

参 考 文 献:

- [1] HIKMET R A M. Anisotropic gels in liquid crystal devices [J]. *Advanced Materials*, 1992, 4(10): 679-683.
- [2] 邹呈,高延子,于美娜,等. 液晶/高分子复合材料及其在反式电控调光膜中的应用研究进展[J]. *应用化学*, 2021, 38(10): 1213-1225.

- ZOU C, GAO Y Z, YU M N, *et al.* Recent advances in liquid crystal/polymer composites and their applications in reverse-mode electrically switchable light-transmittance controllable films [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1213-1225. (in Chinese)
- [3] DOANE J W, GOLEMME A, WEST J L, *et al.* Polymer dispersed liquid crystals for display application [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals Incorporating Nonlinear Optics*, 1988, 165(1): 511-532.
- [4] WHITE T J, NATARAJAN L V, TONDIGLIA V P, *et al.* Holographic polymer dispersed liquid crystals (HP-DLCs) containing triallyl isocyanurate monomer [J]. *Polymer*, 2007, 48(20): 5979-5987.
- [5] PANDE M, TRIPATHI P K, MISRA A K, *et al.* Dielectric and electro-optical properties of polymer-stabilized liquid crystal system [J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(3): 217.
- [6] RANJKESH A, YOON T H. Thermal and electrical wavelength tuning of Bragg reflection with ultraviolet light absorbers in polymer-stabilized cholesteric liquid crystals [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(45): 12377-12385.
- [7] PRESNYAKOV V V, ASATRYAN K E, GALSTIAN T V, *et al.* Polymer-stabilized liquid crystal for tunable microlens applications [J]. *Optics Express*, 2002, 10(17): 865-870.
- [8] 王丹, 彭海炎, 周兴平, 等. 全息高分子/液晶复合材料的研究进展[J]. *应用化学*, 2021, 38(10): 1268-1298.
WANG D, PENG H Y, ZHOU X P, *et al.* Research progress of holographic polymer/liquid crystal composites [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1268-1298. (in Chinese)
- [9] 于美娜. 反式液晶/聚合物分散薄膜的制备及光电性能研究[D]. 成都: 四川大学, 2007.
YUM N. Preparation and electro-optic characteristics of reverse-mode liquid crystal/polymer dispersion (LCPD) film [D]. Chengdu: Sichuan University, 2007. (in Chinese)
- [10] 王守廉, 唐秀之, 何杰, 等. 聚合物结构对聚合物网络稳定液晶薄膜电光性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2008, 24(1): 63-66.
WANG S L, TANG X Z, HE J, *et al.* The effect of polymer structures on the electro-optical properties of polymer network-stabilized liquid crystal films [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2008, 24(1): 63-66. (in Chinese)
- [11] 洪卫, 王立权, 林嘉平. 高分子多级微相结构与性能的研究进展[J]. *应用化学*, 2021, 38(10): 1310-1325.
HONG W, WANG L Q, LIN J P. Research progress of polymeric hierarchical microstructures and their properties [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1310-1325. (in Chinese)
- [12] INAM M, SINGH G, BIRADAR A M, *et al.* Effect of gold nano-particles on switch-on voltage and relaxation frequency of nematic liquid crystal cell [J]. *AIP Advances*, 2011, 1(4): 042162.
- [13] BULUY O, NEPIJKO S, RESHETNYAK V, *et al.* Magnetic sensitivity of a dispersion of aggregated ferromagnetic carbon nanotubes in liquid crystals [J]. *Soft Matter*, 2011, 7(2): 644-649.
- [14] 刘一帆. 基于浮置电极的高透过率蓝相液晶显示器件设计[J]. *液晶与显示*, 2017, 32(7): 512-517.
LIU Y F. High transmittance blue phase liquid crystal display with floating electrodes [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(7): 512-517. (in Chinese)
- [15] PENG S Y, ZHANG R Y, CHEN V H, *et al.* Three-dimensional single Gyroid photonic crystals with a mid-infrared bandgap [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(6): 1131-1137.
- [16] UMASHANKAR K, TAFLOVE A. A novel method to analyze electromagnetic scattering of complex objects [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1982, 24(4): 397-405.
- [17] 刘才明. 单轴晶体光轴任意取向时非寻常光的折射规律[J]. *光学技术*, 2002, 28(6): 559-560, 563.
LIU C M. Refraction regularity of extraordinary ray in uniaxial crystal with arbitrarily oriented optical axis [J]. *Optical Technique*, 2002, 28(6): 559-560, 563. (in Chinese)
- [18] TAFLOVE A, HAGNESS S C. *Computational Electrodynamics: The Finite-difference Time-domain Method* [M]. 3rd ed. Boston: Artech House, 2005.
- [19] DIERKING I, KOSBAR L L, AFZALI-ARDAKANI A, *et al.* Network morphology of polymer stabilized liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 71(17): 2454-2456.
- [20] DESHMUKH R R, JAIN A K. Effect of anti-parallel and twisted alignment techniques on various properties of poly-

mer stabilised liquid crystal (PSLC) films [J]. *Liquid Crystals*, 2016, 43(4): 436-447.

- [21] SHIVAPRASAD S, BALASUBRAMANIAM K, KRISHNAMURTHY C V. Voronoi based microstructure modelling for elastic wave propagation [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2016, 1706(1): 070013.

作者简介:



王凯宇(1998—),男,山西忻州人,硕士研究生,2019年于太原理工大学获得学士学位,主要从事聚合物稳定液晶器件方面的研究。E-mail: 2020023742@m.scnu.edu.cn



袁冬(1988—),女,山东菏泽人,博士,副研究员,2013年于华南理工大学获得博士学位,主要从事液晶材料与响应性器件的研究。E-mail: yuandong@scnu.edu.cn