

咪唑类离子液体的亲疏水性对电润湿器件性能的影响

窦盈莹^{1,2}, 邓勇^{3,4*}, 蒋洪伟^{1,2}, 唐彪^{1,2}, 水玲玲^{1,2},
李发宏^{1,2,4}, Jan GROENEWOLD^{1,2}, Alex HENZEN^{1,2}, 周国富^{1,2,3,4*}

(1. 广东省光信息材料与技术重点实验室//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, 广州 510006;
2. 华南师范大学国家绿色光电子国际联合研究中心, 广州 510006; 3. 深圳市国华光电科技有限公司, 深圳 518110;
4. 深圳市国华光电研究院, 深圳 518110)

摘要: 研究了离子液体(ILs)应用于电润湿显示器件的导电液体性能。选取极性较大的乙基咪唑作为离子液体的阳离子, 改变阴离子的亲疏水性, 对比研究了几种离子液体的温度窗口、黏度等物理性质, 并重点研究了离子液体的亲疏水性对电润湿特性、油墨萃取、器件响应等方面的影响。同时, 在1-乙基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐离子液体的阳离子上添加羟基基团, 得到亲水性更强的离子液体。结果表明: 亲水性强的离子液体在介电材料含氟聚合物表面的初始接触角比较大, 对油墨中染料的萃取程度比疏水性离子液体弱, 证明了电润湿器件更适合选取亲水性强的离子液体作为导电液体。最后, 以1-乙基-3-甲基咪唑二腈胺盐离子液体作为导电液体制备的电润湿器件得到了较好的电学和光学响应性能。

关键词: 离子液体; 电润湿; 导电液体; 油墨萃取; 光电响应

中图分类号: O361.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-5463(2018)03-0029-07

Influence of the Hydrophilic Property of Imidazole Ionic Liquids on Electro-Fluidic Display

DOU Yingying^{1,2}, DENG Yong^{3,4*}, JIANG Hongwei^{1,2}, TANG Biao^{1,2},
SHUI Lingling^{1,2}, LI Fahong^{1,2,4}, Jan GROENEWOLD^{1,2}, Alex HENZEN^{1,2}, ZHOU Guofu^{1,2,3,4*}

(1. 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; 2. National Center for International Research on Green Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou 510006, China; 3. Shenzhen Guohua Optoelectronics Tech. Co. Ltd., Shenzhen 518110, China; 4. Academy of Shenzhen Guohua Optoelectronics, Shenzhen 518110, China)

Abstract: Some ionic liquids (ILs) were used to be the conductive liquids of electro-fluidic displays (EFDs). The cationic ion of the ionic liquids is 1-Ethyl-3-methylimidazolium, while the anionic ions have varied hydrophilic properties. Also -OH group is added to the cationic ion of [EMIM][BF₄] to increase the hydrophilic property of ILs molecule further. The physical properties are compared, including the temperature window and viscosity. More importantly, the influence of hydrophilic property of ILs on electrowetting curve, dye extracting, and aperture voltage of EFD were discussed in this study. The results indicate that the contact angle on fluoropolymer without voltage of hydrophilic ILs is higher than the contact angle of hydrophobic ILs. On the other hand, the dye extraction ability of hydrophilic ILs is lower than hydrophobic ILs. As a consequence, hydrophilic ILs is more suitable to be conductive liquid of EFD. Furthermore, the switching results of EFD with one hydrophilic IL ([EMIM][DCA]) as conductive liquid show good optoelectronic response properties.

收稿日期: 2018-01-03 《华南师范大学学报(自然科学版)》网址: <http://journal.senu.edu.cn/n>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0401501); 国家自然科学基金项目(U1601651, 61771204); 教育部“长江学者和创新团队发展计划”项目(IRT_17R40); 广东省引进创新科研团队计划项目(2011D039); 广东省科技计划项目(2016B090906004, 2017A010103002); 深圳市科创委股权投资项目(GQYCZZ20150721150406); 广东省光信息材料与技术重点实验室项目(2017B030301007); 广州市类纸显示材料与器件重点实验室项目(201705030007); 教育部光信息国际合作联合实验室项目; 国家高等学校学科创新引智计划111引智基地项目

* 通讯作者: 邓勇, 高级工程师, Email: yong.deng@guohua-oet.com; 周国富, 教授, Email: guofu.zhou@m.senu.edu.cn.

Key words: ionic liquid; electro-fluidic display; conductive liquid; dye extraction; optoelectronic response

电润湿(Electrowetting)基于介电材料表面润湿性随电场的变化,又被称为介电材料的电润湿(Electrowetting-on-dielectric, EWOD)因此,电润湿被广泛应用于控制流体的运动,并在微流控^[1-2]、电润湿显示^[3-6]、光学透镜^[7-8]等方面表现出了非常大的潜力.1994年,Robert Hayes教授将介电层的厚度降低之后,驱动电压也随之大幅降低^[3],从而促进了电润湿的应用.电润湿的原理^[4-6]是通过电场来调控介电层表面的润湿性,表现为液滴在介电层表面的接触角随电压的变化满足 Young-Lippmann 方程^[5]:

$$\cos \theta = \cos \theta_0 + CU^2/2\sigma, \quad (1)$$

其中 θ 是液滴在介电层表面与电压相关的接触角; θ_0 是液滴在介电层表面的初始接触角,即没有加电压时的接触角; σ 是液滴与外相的界面张力,当液滴为导电液体时,外相多为空气或者油相; C 是液滴与电极之间单位面积的电容; U 是施加的电压.

疏水性的介电材料在施加电压时表面变为亲水性,从而引起液滴在介电材料表面的接触角下降,即发生液滴在介电层表面的运动.电润湿器件利用这个原理控制器件的明暗变化^[3,9-10].具体表现为:电润湿器件在未施加电压时,油墨完全覆盖在疏水性的介电层表面,整个像素表现为暗色.施加电压之后,介电层表面变为亲水性,疏水性的油墨受到排斥,最终运动到像素的边角,透明的亲水性导电液体铺展在介电层表面,实现亮色.

目前,电润湿器件多使用水或者盐溶液作为导电液体^[3-4,11],由于水溶液体系有比较高的表面张力,非常容易吸附小的杂质离子,且水分子小易穿透多种介电层材料,易对电极造成腐蚀从而带来器件的寿命问题^[12-13],因此非水导电流体的研究越来越受到关注^[14-16].CHEVALLIOT 等^[12]试验了 16 种非水导电液体,包括各种酮类、醇类、酰胺类的有机溶剂,通过分析电润湿响应和器件漏电流等方面的实验结果,得到了 6 种效果较好的非水导电液体.另一方面,室温离子液体(RTIL)因具有无明显蒸汽压(不挥发)、不燃性、高的热稳定性、宽的温度窗口等独特的物理化学性质^[17],而被认为是一类新的电润湿导电液体体系^[15-16].通过固定阴离子改变阳离子^[18]或者固定阳离子改变阴离子^[19-20]的方法,可以得到离子液体的阳离子、阴离子对其电润湿性能的影响. CAR-

RERA 等^[20]在离子液体主体离子的基础上研究基底、水含量、溶解盐等对离子液体电润湿性能的影响.但是,目前的研究一般都聚焦在基础理论部分,离子液体在器件的实际应用尚未得到具体的研究.本文固定离子液体的阳离子,改变阴离子的亲疏水性,从而研究亲疏水性对电润湿性能、油墨萃取、电润湿器件的电学和光学响应性能等方面的影响.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

主要试剂有 1-乙基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐(纯度为 99%, [EMIM][BF₄], 简称 E-BF₄, 默尼化工, 上海)、1-乙基-3-甲基咪唑二腈胺盐(纯度为 99%, [EMIM][DCA], 简称 E-DCA, 默尼化工, 上海)、1-乙基-3-甲基咪唑双(三氟甲烷磺酰)亚胺盐(纯度为 99%, [EMIM][NTf₂], 简称 E-NTf₂, 默尼化工, 上海)、1-羟乙基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐(纯度为 99%, [HEMIM][BF₄], 简称 HE-BF₄, 默尼化工, 上海)、含氟聚合物(AF1600X, 杜邦, 美国)等.以上试剂在使用前不纯化直接使用.

主要仪器有流变仪(MARSIII, 哈克, 德国)、恒温水箱(SC150 及 A10, 哈克, 德国)、电导率仪(CD510 台式电导率仪, 安莱立思, 上海)、表界面张力仪(OCA15, Dataphysics, 德国)、高压电源(GWINSTEK PSW 800-1.44, 中国)、紫外可见/近红外分光光度计(Lambda 950, PerkinElmer, 英国)、光谱仪(S3000-VS, 赛曼科技, 中国)、光学显微镜(SMZ168, Motic, 中国).

1.2 实验方法

采用流变仪测量 4 种离子液体的黏度,测试温度通过恒温水箱控制,温度由低到高测量.电导率仪测量 18 °C 下离子液体的电导率.表界面张力仪测量离子液体的表面张力.

测量离子液体在介电材料含氟聚合物 AF1600X 表面的接触角,电压由高压电源提供并控制.液体量固定为 5 μ L.接触角的测量在改变电压条件下进行,首先以 5 V 的变化梯度从 0 V 增加电压并测量接触角,然后将正负极交换,重新从 0 V 开始增加电压并测量.前进角和后退角在含氟聚合物表面加入液体和去除液体时测得.

将离子液体与蓝色油墨混合,静置、拍照,并取出下层的离子液体,采用紫外可见/近红外分光光度计测量吸光度,以表征离子液体对油墨中蓝色染料的萃取程度。

将离子液体通过相变填充的方法^[21]填充到电润湿器件中,电润湿器件的制备采用成熟的涂膜、改性和光刻等工艺^[22],其中含氟聚合物 AF1600X 的厚度约为 800 nm,像素墙的高度约为 6 μm。

对以离子液体为导电流体的电润湿器件进行电学和光学表征,采用光谱仪测试其透过率-电压曲线,表征像素开关的过程,同时采用光学显微镜观察像素开关时的光学性能。

2 结果与讨论

2.1 离子液体的物理性质

电润湿器件的非极性相多为长链烷烃或硅油等成分,具有较强的疏水性,因此,溶解在非极性相中的染料也需要具有一定的疏水性,才可以在其中具有较高的溶解度。众所周知,离子液体是一种很好的溶剂,而电润湿器件中为保证器件的可靠性,极性导电流体和非极性相必须是不互溶的,因此为了降低离子液体对油墨(非极性相)中染料分子的萃取,将咪唑阳离子侧链的碳原子数降低,选取 1-乙基-3-甲基咪唑为阳离子,阴离子选取亲水性较高的四氟硼酸离子、

二腈胺离子以及疏水性较高的双(三氟甲烷磺酰)亚胺离子,分别得到 1-乙基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐(图 1A)、1-乙基-3-甲基咪唑二腈胺盐(图 1B)和 1-乙基-3-甲基咪唑双(三氟甲烷磺酰)亚胺盐(图 1C)。进一步,在 1-乙基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐的乙基侧链连接 1 个羟基基团,以进一步提高离子液体的亲水性,得到 1-羟乙基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐(图 1D)。

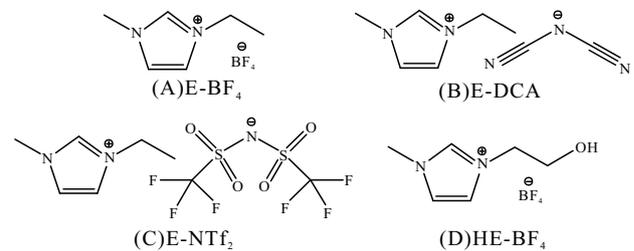


图 1 离子液体的结构式

Figure 1 Chemical structures of ionic liquids

电润湿器件的导电流体需要具有较高的导电性,才可以实现电荷在其中的传递,进而实现器件的开关响应,因此首先测试得到 4 种离子液体的电导率(表 1),4 种离子液体的电导率均大于 1 mS/cm,具有非常好的导电性,满足电润湿器件的需求^[11]。离子液体在室温下以离子状态存在,这是其具有较高电导率的原因,也是本文考虑使用离子液体做电润湿器件导电流体的重要原因。

表 1 离子液体的物理性质

Table 1 Physical properties of ionic liquids

离子液体	电导率/(mS·cm ⁻¹)	熔点 ^a /℃	分解温度 ^a /℃	表面张力/(mN·m ⁻¹)	黏度/(mPa·s)
[EMIM][BF ₄]	17.4	11	412	55	28.3
[EMIM][DCA]	34.5	-21	104	47	16.9
[EMIM][NTf ₂]	9.1	-15	280	36	38.7
[HEMIM][BF ₄]	4.5	-111	380	61	59.9

注:^a 离子液体的熔点和沸点数据来自于离子液体物性网站: <http://www.ionicliquid.org/product/>。

电润湿器件主要被应用于户外显示,需要较宽的应用温度范围,也就要求导电流体材料具有较宽的温度窗口。4 种离子液体的分解温度均大于 100 ℃,满足显示器件在高温下的使用需求。但是离子液体 [EMIM][BF₄] 的熔点为 11 ℃,不适合在 11 ℃ 及更低温度下使用,而另外 3 种离子液体的熔点 ≤ -15 ℃,可以在低温下使用。

电润湿器件的微结构是微米级的像素结构,一定程度上符合微流控体系的特点。除了电场力,表面

张力对于流体的运动也存在重要的影响,因此,在测得的表面张力数据(表 1)中,[EMIM][NTf₂] 的表面张力最小(36 mN/m); [EMIM][DCA] 的表面张力次之(47 mN/m); 表面张力较大的是 [EMIM][BF₄] 和 [HEMIM][BF₄], 分别为 55、61 mN/m。当像素打开时,电场力需要克服表面张力,因此表面张力的增大可能会引起打开像素所需电压的增大,故表面张力较小的 [EMIM][NTf₂] 和 [EMIM][DCA] 更优。

对于电润湿器件的流体而言,黏度越低,流体的

黏滞力越小,流体流动越快,电润湿器件光电响应速度越快,因此电润湿导电流体的黏度应在一定范围之内。由图2和表1可知,4种离子液体的黏度随温度升高而降低、随温度的降低而增大。在室温条件下, [EMIM][DCA]的黏度最低(16.9 mPa·s),即使在0℃时其黏度也小于50 mPa·s;在室温条件下, [EMIM][BF₄]与[EMIM][NTf₂]的黏度居中,分别为28.3、38.7 mPa·s,在0℃条件下两者的黏度小于100 mPa·s;而[HEMIM][BF₄]的黏度最高(室温下为59.9 mPa·s),在0℃条件下其黏度高于200 mPa·s。因此,在低温下使用时需要注意黏度的影响。

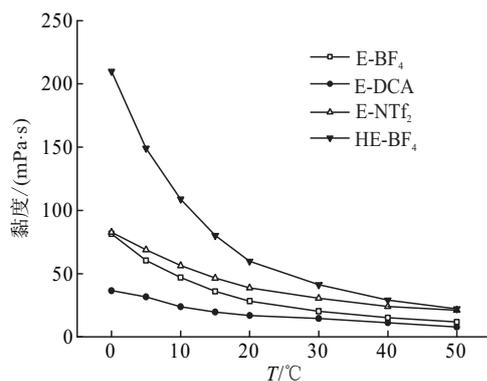


图2 离子液体黏度随温度的变化曲线

Figure 2 Viscosity of ionic liquids with temperature

2.2 亲疏水性对离子液体电润湿特性的影响

电润湿特性是电润湿器件中离子液体导电液体最重要的表征参数。对于电润湿器件而言,施加电压,电润湿器件的含氟聚合物(疏水绝缘层)表面疏水性减弱而亲水性增强,导致导电液体在其表面的接触角

降低,最终表现为接触角随施加电压的增大而逐渐降低,直到饱和电压,此时接触角达到最小值,不再降低。如图3和表2所示,4种离子液体均表现出了明显的电润湿特性,在含氟聚合物表面的接触角随电压的增大而降低,直到达到饱和。首先,对比4种离子液体的初始接触角(未施加电压状态)。其中的3种离子液体([EMIM][BF₄]、[EMIM][DCA]和[HEMIM][BF₄])在含氟聚合物表面的初始接触角均大于100°,具有比较好的亲水性,并且[HEMIM][BF₄]含-OH,亲水性提高,其初始接触角略微大于不含-OH的[EMIM][BF₄];而离子液体[EMIM][NTf₂]的初始接触角仅为82°(小于90°),即离子液体[EMIM][NTf₂]在含氟聚合物表面是润湿的,会导致关闭电源后离子液体[EMIM][NTf₂]仍然滞留在含氟聚合物表面而引起器件失效。

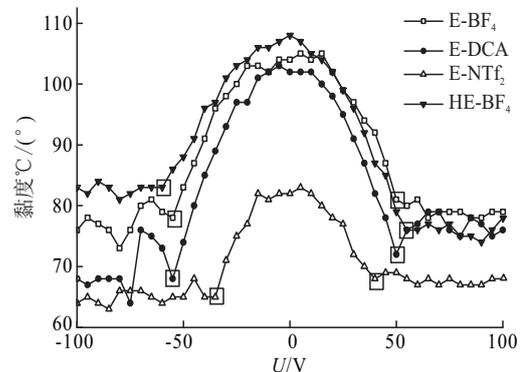


图3 离子液体在含氟聚合物表面的接触角随电压的变化

Figure 3 Contact angle on fluoropolymer surface of ionic liquids with varying voltages

表2 离子液体的饱和电压与饱和接触角

Table 2 Saturation voltage and contact angle of ionic liquids

离子液体	左饱和电压/V	右饱和电压/V	初始接触角/(°)	左接触角差/(°)	右接触角差/(°)
[EMIM][BF ₄]	-55	50	104	26	23
[EMIM][DCA]	-55	50	102	34	30
[EMIM][NTf ₂]	-35	40	82	17	14
[HEMIM][BF ₄]	-60	55	108	25	32

关于接触角饱和的问题,由表2可知,3种亲水性较强的离子液体([EMIM][BF₄]、[EMIM][DCA]和[HEMIM][BF₄])其饱和电压在50~60V,三者的差异不大,并且,这3种离子液体的左饱和电压(负向饱和电压)比右饱和电压(正向饱和电压)大5V,即阴离子比阳离子运动的饱和电压大5V,差异并不明显。并且,羟基的加入提高了亲水性,导致了饱

和电压的略微增大(5V),差异同样不明显。而疏水性离子液体[EMIM][NTf₂]的饱和电压仅35~40V,比亲水性离子液体的小20V左右,对器件响应不利。同时,还发现疏水性的[EMIM][NTf₂]其左饱和电压比右饱和电压小5V,即阴离子比阳离子运动的饱和电压小5V,与3种亲水性离子液体相反,可能是因为在[EMIM][NTf₂]中阴离子NTf₂的

分子比其他几种离子液体的大,不利于离子运动. 另一方面,饱和电压时与初始时的接触角之差 ($\Delta\theta$) 有同样的规律,即亲水性离子液体的 $\Delta\theta$ 比疏水性离子液体的大,其中, [EMIM][DCA] 的接触角差最大,即通过电场可调控的接触角范围更大,更适合电润湿器件的应用.

由 4 种离子液体的接触角随电压的变化曲线(图 3)可知,其在含氟聚合物表面的初始接触角、饱和电压、接触角差均满足:亲水性离子液体的这 3 项数值均大于疏水性离子液体的.因此,亲水性离子液体比疏水性离子液体更适合作为电润湿器件的导电流体.

电润湿器件的响应过程是流体在含氟聚合物表面的运动过程,因此,有必要讨论 4 种离子液体在含氟聚合物表面的前进角和后退角,非理想液体或理想固体之间存在前进角与后退角的差异,即前进角大于后退角,二者差值为接触角滞后量.由图 4 可知,3 种较为亲水的离子液体([EMIM][BF₄], [EMIM][DCA]和 [HEMIM][BF₄])的前进角在 105°~100°,后退角在 95°~105°;而疏水性离子液体 [EMIM][NTf₂]的前进角和后退角均小于 90°.4 种离子液体的接触角滞后量均在 5°~10°,即 4 种离子液体在含氟聚合物表面均存在接触角滞后现象.

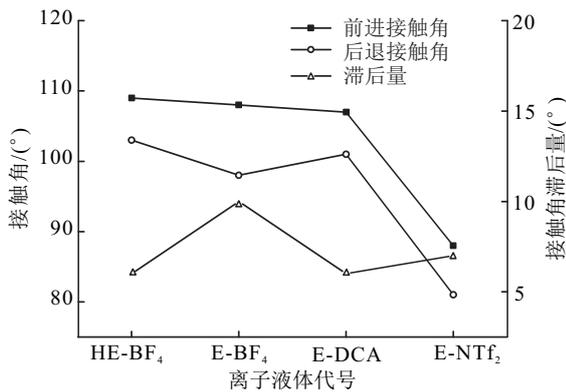


图 4 离子液体在含氟聚合物表面的前进角、后退角与接触角滞后量

Figure 4 Advancing and receding contact angles on fluoropolymer surface of ionic liquids and the contact angle hysteresis

2.3 离子液体对油墨的萃取

电润湿器件要求导电流体和油墨互不相溶,否则,由于导电流体的用量远比油墨的用量大,随着时间推移,导电流体会逐渐将油墨中的染料萃取出来,

导致器件对比度下降.因此,通过测量与油墨混合后离子液体的紫外可见吸收光谱,对比研究 4 种离子液体对蓝色油墨的萃取效果(图 5).阴离子为四氟硼酸盐的 2 种离子液体([EMIM][BF₄]和 [HEMIM][BF₄])的吸光度数值趋近于 0,插图 a、b 的下层液体即离子液体(离子液体的密度比油墨的大)此时仍然为无色透明,因此可以认为这 2 种离子液体对油墨的萃取非常小或者没有萃取.离子液体 [EMIM][DCA]对蓝色染料有轻微的萃取,插图 c 显示为浅蓝色,吸光度约为 0.5,可以作为导电流体用于电润湿器件,但是需要注意在较长时间使用后的萃取效果,如果在器件使用期限之内没有明显萃取则可以使用.而疏水性离子液体 [EMIM][NTf₂]对蓝色染料的萃取非常明显,插图 d 显示为较深的蓝色,吸光度数值大约为 4,萃取明显,不适合用于电润湿器件.

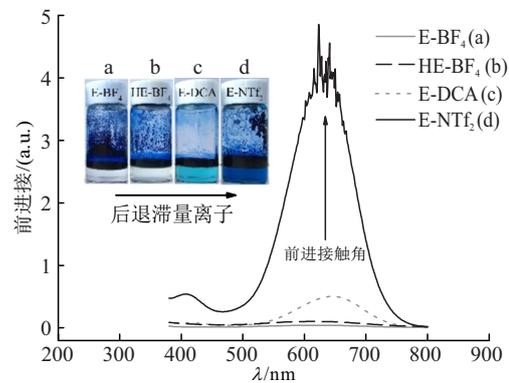


图 5 离子液体与蓝色油墨混合后的离子液体的吸光度
Figure 5 The absorbance of ionic liquids after mixed with blue oil

2.4 电润湿器件的电学、光学响应

综合 4 种离子液体的物理性质(温度窗口、表面张力和黏度)、电润湿效应(初始接触角、饱和电压和接触角差)以及对蓝色油墨的萃取效果,结果表明:亲水性离子液体 [EMIM][DCA]的温度窗口适宜、表面张力较低、黏度较低、电润湿效应明显(初始接触角较大、饱和电压较大、接触角差较大)、对蓝色油墨的萃取较小.因此,本文以离子液体 [EMIM][DCA]作为电润湿器件的导电流体进行器件封装和测试.随着电压增大,器件对光的透过率开始时并没有变化,表示像素仍处于关闭状态(图 6).在 17 V 时像素开始打开,器件对光的透过率突增.随着电压的继续增大,透过率继续增大,在 22 V

时达到最大透过率,此为像素随电压增大逐步打开的过程;之后透过率趋于稳定.随着电压的逐渐降低,含氟聚合物表面的疏水性慢慢恢复,油墨重新铺展在含氟聚合物表面,透过率降低,此为像素随电压降低逐步关闭的过程.图 6 中显示像素打开与关闭的透过率-电压曲线是不重合的,这是与导电液体在含氟聚合物表面的接触角滞后效应有关(图 4).图 6 的插图分别为 [EMIM][DCA] 的电润湿器件在未施加电压(0 V)和施加电压(30 V)时的像素开合结果,可以看到明显的光电响应,30 V 时的像素透过率约为 50%.

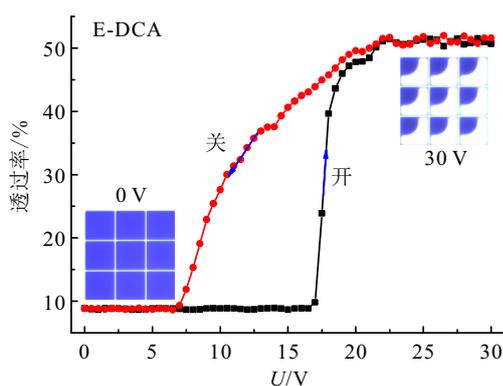


图 6 E-DCA 的透过率-电压曲线及显微镜照片

Figure 6 The transmissivity-voltage curve of E-DCA and optical microscope photograph

3 结论

本文对比了 4 种离子液体([EMIM][BF₄], [EMIM][DCA], [EMIM][NTf₂] 和 [HEMIM][BF₄]) 的物理性质,发现 4 种离子液体的电导率都比较大;离子液体 [EMIM][DCA]、[EMIM][NTf₂] 和 [HEMIM][BF₄] 的温度窗口较宽,可以在较宽的温度范围内使用; [EMIM][DCA] 和 [EMIM][NTf₂] 的表面张力较小, [EMIM][DCA] 的黏度最小,而 [HEMIM][BF₄] 的黏度最大.进而,对比了离子液体亲疏水性对电润湿效应的影响,电润湿曲线结果表明: 3 种离子液体([EMIM][BF₄], [EMIM][DCA] 和 [HEMIM][BF₄]) 亲水性较强,其初始接触角、饱和电压和接触角差比较大,而疏水性离子液体 [EMIM][NTf₂] 的这 3 组数值则较小,说明亲水性离子液体的电润湿特性更佳.同时发现,亲水性离子液体对蓝色油墨的萃取程度更低,而疏水性的

离子液体 [EMIM][NTf₂] 对染料有明显的萃取.因此,电润湿效应和油墨萃取两方面同时证明了亲水性离子液体比疏水性离子液体更适用于电润湿器件.再结合离子液体物理性质的实验结果,将亲水性较强的离子液体 [EMIM][DCA] 作为导电液体用于制备电润湿器件,得到的电润湿器件的光电响应效果明显.

参考文献:

- [1] PIT A M, DE RUITER R, KUMAR A, et al. High-throughput sorting of drops in microfluidic chips using electric capacitance [J]. *Biomicrofluidics*, 2015, 9(4): 044116/1-12.
- [2] GU H, MALLOGGI F, VANAPALLI S A, et al. Electrowetting-enhanced microfluidic device for drop generation [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(18): 183507/1-3.
- [3] HAYES R A, FEENSTRA B J. Video-speed electronic paper based on electrowetting [J]. *Nature*, 2003, 425: 383-385.
- [4] MUGELE F, BARET J C. Electrowetting: from basics to applications [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2005, 17(28): 705-774.
- [5] MUGELE F. Fundamental challenges in electrowetting: from equilibrium shapes to contact angle saturation and drop dynamics [J]. *Soft Matter*, 2009, 5(18): 3377-3384.
- [6] TANG B, GROENEWOLD J, ZHOU M, et al. Interfacial electrofluidics in confined systems [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26593/1-7.
- [7] HENDRIKS B H W, KUIPER S, AS M A J V, et al. Electrowetting-Based Variable-Focus Lens for Miniature Systems [J]. *Optical Review*, 2005, 12(3): 255-259.
- [8] SMITH N R, HOU L, ZHANG J, et al. Fabrication and demonstration of electrowetting liquid lens arrays [J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(11): 411-413.
- [9] 唐彪, 赵青, 周敏, 等. 印刷电润湿显示技术研究进展 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 48(1): 1-8.
TANG B, ZHAO Q, ZHOU M, et al. Research progress on printed electrofluidic display technology [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 48(1): 1-8.
- [10] 易子川, 曾磊, 周莹, 等. 电润湿电子纸多级灰阶研究与设计 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2017,

- 49(6): 17–23.
- YI Z C, ZENG L, ZHOU Y, et al. Research and design of multi level gray scale of electrowetting electronic paper [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)* 2017, 49(6): 17–23.
- [11] SHUI L, HAYES R A, JIN M, et al. Microfluidics for electronic paper-like displays [J]. *Lab on A Chip* 2014, 14(14): 2374–2384.
- [12] CHEVALLIOT S, HEIKENFELD J, CLAPP L, et al. Analysis of nonaqueous electrowetting fluids for displays [J]. *Journal of Display Technology* 2011, 7(12): 649–656.
- [13] RAJ B, DHINDSA M, SMITH N R, et al. Ion and liquid dependent dielectric failure in electrowetting systems [J]. *Langmuir* 2009, 25(20): 12387–12392.
- [14] CHATTERJEE D, HETAYOTHIN B, WHEELER A R, et al. Droplet-based microfluidics with nonaqueous solvents and solutions [J]. *Lab on A Chip* 2006, 6(2): 199–206.
- [15] MILLEFIORINI S, TKACZYK A H, SEDEV R, et al. Electrowetting of ionic liquids [J]. *Journal of the American Chemical Society* 2006, 128(9): 3098–3101.
- [16] RESTOLHO J, MATA J L, SARAMAGO B, Electrowetting of ionic liquids: contact angle saturation and irreversibility [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113(21): 9321–9327.
- [17] 盛倩, 薛建明. 室温离子液体在受限区域内的研究进展 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 47(2): 27–31.
- SHENG Q, XUE J M. The research progress of room temperature ionic liquids in confined geometries [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)* 2015, 47(2): 27–31.
- [18] PENSADO A S, GOMES M F C, LOPES J N C, et al. Effect of alkyl chain length and hydroxyl group functionalization on the surface properties of imidazolium ionic liquids [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics* 2011, 13(30): 13518–13526.
- [19] KRAUSE C, SANGORO J R, IACOB C, et al. Charge transport and dipolar relaxations in imidazolium-based ionic liquids [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2010, 114(1): 382–386.
- [20] CARRERA G V S M, AFONSO C A M, BRANCO L C. Interfacial properties, densities, and contact angles of task specific Ionic Liquids [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data* 2010, 55(2): 609–615.
- [21] 唐彪, 蒋洪伟, 郭媛媛, 等. 基于相变操控的电润湿显示油墨填充与封装工艺研究 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 48(1): 42–46.
- TANG B, JIANG H W, GUO Y Y, et al. A novel oil-filling and coupling method based on phase manipulation for electrofluidic displays [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 48(1): 42–46.
- [22] 何涛, 金名亮, 窦盈莹, 等. 一种电润湿显示彩色油墨的性能研究 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 48(2): 40–45.
- HE T, JIN M L, DOU Y Y, et al. Performance of a color printing ink for electrowetting display [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)* 2016, 48(2): 40–45.
- 【责任编辑: 谭春林 责任校对: 谭春林 英文审校: 程杰】