

新型低驱动电压电子纸显示单元的研究

吴建刚, 岳瑞峰, 曾雪锋, 刘理天

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 研制了一种基于介质上电润湿 (electrowetting on dielectric EWOD) 的新型低驱动电压电子纸反射式显示单元器件. 本文分析了器件的工作原理以及性能影响因素, 并提出用优化的氮化硅与碳氟聚合物复合介质层来改善器件的驱动电压. 实验证实, 器件在 15V 低电压驱动下成功实现了 / 开启 0、/ 关闭 0 功能, 其 / 开启 0、/ 关闭 0 响应时间小于 1/30s

关键词: 反射式显示; 介质上电润湿; 微流体; 微电子机械系统

中图分类号: TH 706 TN 27 **文献标识码:** A **文章编号:** 037222112 (2006) 0220198203

Study on New Low Voltage Display Pixel for Electronic Paper

WU Jian2gang YUE Rui2feng ZENG Xue2feng LIU Li2tian

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A new low voltage reflective display pixel for electronic paper based on electrowetting on dielectric (EWOD) is proposed. The principle of the display pixel and the influences on the performances were analyzed, and the applied voltage was reduced by using the multiple dielectric layers of a Si_3N_4 film and a fluorocarbon polymer film. The on-switching and off-switching of display pixel were successfully realized by applying the low voltage of 15V, and the response times were less than 1/30 s.

Key words reflective display; electrowetting on dielectric; microfluidics; MEMS

1 引言

电子纸 (Electronic Papers) 是一种超薄、超轻的显示屏, 它具有电控显示信息的能力. 在文字辨认上, 类似甚至优于常规的 LCD, 可以与报纸相比拟, 因此它能应用在电子广告看板、超薄电子书上. 1998 年, M II 提出了基于粒子电泳运动的电子纸^[1], 但由于受电泳粒子速度的限制, 其响应速度不快. 最近, 人们发现了介质上电润湿 (Electrowetting on Dielectric EWOD) 现象^[2~4], 它通过在介质层下面的微电极上施加电势, 来控制液体和固体表面之间的润湿特性. 在已知的电控表面张力驱动器中, EWOD 由于表面电化学反应不活泼、功耗低等特点, 目前被认为是最具有发展前途的结构之一. 2003 年, Philips 公司首先提出了基于介质上电润湿的电子纸显示器件^[5], 它具有高反射率、高对比度、低功耗的特点, 并可望达到视频响应速度. 然而, Philips 公司提出的显示单元器件驱动电压仍较高 (> 20V), 为了进一步降低驱动电压, 本文提出了一种新型的低驱动电压反射式显示单元器件, 并给出了初步的实

验结果.

2 器件结构与工作原理

本显示器件的大小为 $500 @ 500 \mu\text{m}^2$, 其基本结构如图 1(a) 所示: 以带有电极的高反射率基底、疏水性复合介质层、亲水性围堰, 围堰内有色油滴和去离子水, 以及带有氧化铟锡 (ITO) 透明上电极的玻璃上盖板组成. 该器件主要通过施加电势, 来快速调节有色油滴覆盖高反射率基底面积大小. 当可见光入射到单元基底上时, 由于有色油滴覆盖高反射率基底面积的不同, 即暴露的高反射率基底面积的不同, 使基底反射光的强度和频段产生差异, 从而造成人的视觉反差. 图 1 中, 白色向下箭头表示入射可见光; 白色向上箭头表示强度略弱的反射可见光, 灰色向上箭头表示强度略弱且光谱集中在油滴颜色光谱段附近的反射光. 我们将油滴收缩过程, 并给人变 / 亮 0 的视觉效果定义为显示器件的 / 开启 0 过程; 反之, 将油滴恢复到初始状态的过程, 并给人变 / 暗 0 的视觉效果定义为显示器件的 / 关闭 0 过程.

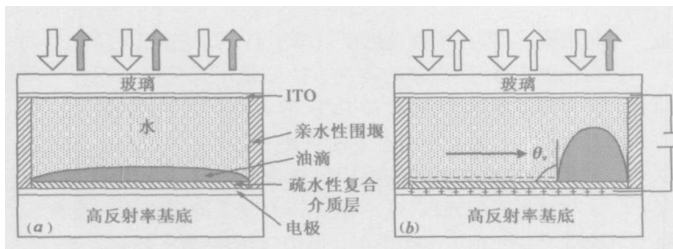


图 1 显示单元工作原理示意图. (a)未加驱动电压时,有色油滴平铺在疏水性介质层表面;

(b)外加驱动电压时,有色油滴被鼓起
基于介质上电润湿的显示原理关键在于可控的油/水界面.在初始未加电势状态下,一个带有颜色的油滴将自动平铺在水与疏水介质层之间,这是因为微米尺度下表面张力满足:

$$C_{i,w} + C_{w,o} < C_{i,o}$$

其中 C 为表面张力,下标 w, o 和 i 分别代表水、油以及疏水性介质层.而在围堰拐角处,满足:

$$C_{i,w} + C_{i,o} < C_{w,o}$$

其中 C 为界面张力,下标 w, o 和 i 分别代表水、油以及围堰.所以,在围堰拐角处,水直接与围堰接触,这样就形成了如图 1(a)所示的油/水界面.当可见光入射到显示单元上时,由于有色油滴平铺在整个显示单元内,可见光的部分光谱被油滴吸收,反射光谱主要集中在油滴颜色光谱段附近,此时整个显示单元表现为 / 关闭 0 状态,见图 1(a) 反射光示意图.

当在上、下电极之间施加电势后,原来的平衡被打破.由于外加电势的引入,在液体表面产生表面电荷,根据 Lippmann 公式^[6],液体表面电荷将引起固体/液体表面张力的修正,

$$dC_{i,w} = -Rdv$$

其中 R 为表面电荷面密度, v 是外加的电势.根据高斯定理,电极/介质层液滴形成平板电容表面电荷为,

$$R = E_0 E \frac{v}{t}$$

其中 E_0, E 分别是真空和介质层材料的介电常数, t 是介质层材料的厚度.因此,由于外加电场的引入,引起液体表面张力的变化为,

$$C_{i,w} = -\Delta C_{i,w} = -\Delta Q_{i,w} = -\Delta(Rdv) = 0.5 E_0 E \frac{v^2}{t}$$

其中 $C_{i,w}$ 为外加电场引入产生的 / 电润湿力 0 项.随着外加电势的增大,当满足下式

$$C_{i,o} + C_{w,o} > C_{i,w} - C_{w,o}$$

此时油滴不能完全铺满整个显示单元,水将排开部分油滴,与疏水性介质材料直接接触,从而形成如图 1(b)所示的水、油以及疏水介质材料三相界面.由 Lippmann Young 方程^[7]可得,

$C_{i,w} = C_{i,o} - C_{w,o} \cos(\theta) + C_{w,w}$
其中 θ 为水滴的三相接触角, $C_{i,w}, C_{i,o}$ 以及 $C_{w,w}$ 为常数.因此随着电势进一步增大,为了保持系统能量平衡,水滴的三相接触角将变小,油滴被鼓起,水滴与疏水介质层接触面积变大.当可见光入射到显示单元上时,由于油滴与疏

水介质层的接触面积减少,可见光被没有油滴覆盖的高反射基底反射,此时整个显示单元表现为 / 开启 0 状态,见图 1(b)反射光示意图.

显示单元的 / 开启 0 速度主要由电和毛细管作用力的合力决定,若外加电势越大,单元 / 开启 0 速度就越快;而显示单元的 / 关闭 0 速度仅由毛细管作用力决定,当显示单元尺寸越小,毛细管作用力越显著,外加电势撤去后恢复到初始状态的速度越快.因此,在足够外加电势的作用下,小尺度显示单元的光特性可以快速、连续、可重复地在 / 开启 0、/ 关闭 0 状态之间调节.

显示单元反射率和对比度跟油滴的收缩率有关.当油滴收缩率越大,显示单元内水覆盖疏水层面积越大,即暴露的高反射率基底面积越大,从而显示单元器件的反射率和对比度就越高.而影响油滴收缩率的主要因素为油滴的厚度和外加电势的大小.当油滴越厚,水排开油滴所需的驱动力越大,因此所需电势就越大,并且由于大油滴自身粘度以及重力的影响,使油滴收缩饱和和发生越早.所以,油滴厚度在满足油滴光特性厚度(典型 15Lm)的要求下应尽量薄,从而可以得到较低的驱动电压和较大的油滴收缩率.

外加电势是油滴收缩的驱动源,本文提出的用复合介质层代替单层介质层的结构,可大大降低驱动电压.由 / 电润湿力 0 表达式可知,降低疏水介质层厚度是降低驱动电压的最直接方法.但由于疏水介质薄膜的击穿场强较小,随着介质薄膜厚度的降低,容易

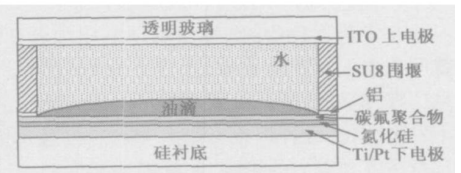


图 2 器件结构示意图

发生电击穿.因此,本器件采用低压化学气相淀积 (LPCVD) 方法淀积的 1500! 高击穿场强 Si_3N_4 (击穿场强约为 9 MV/cm) 和用感应耦合等离子体化学气相淀积 (ICP-CVD) 方法淀积的 500! 类 Tefbn 碳氟聚合物 (击穿场强约为 2MV/cm) 的复合层代替常规 sol-gel 方法制备的 1Lm 厚昂贵的 Tefbn AF1600^[5] (击穿场强约为 2MV/cm) 作为疏水性介质层(见图 2),在降低复合介质层厚度的同时保证介质层不发生电击穿,从而实现降低显示单元驱动电压的目的,并且同时大大降低了器件的成本.

3 器件制备及实验讨论

该器件以硅为衬底材料,先在硅上溅射 200/1800! 的 Ti/Pt 作为下电极,并将 Ti/Pt 层作为高反射率基底;然后由 LPCVD 方法淀积 1500! Si_3N_4 及 ICP-CVD 方法淀积 500! 碳氟聚合物作为疏水性介质层;最后溅射铝并用厚 SU8 胶光刻图形化形成围堰.

实验中选用了低粘度的甲基硅油,型号为 YIKE22012 1Q 并用油溶性染料着色.在实验开始前,在显示区域中滴入硅油,它将自动平铺在碳氟聚合物层表面.然后在油层

上滴入去离子水,并加上带有ITO上电极的玻璃作为上盖板;最后在上下电极上施加驱动电压。

图3说明外加电压下油滴的收缩过程。初始情况下,油滴平铺在疏水性介质层表面,油滴的初始直径约为500 μm ,油水界面在显微镜下形成光斑,见图3(a)当外加15V驱动电压后,在电和毛细管合力作用下,水滴三相接触角变小,油滴被鼓起。图3(b)描述了油滴收缩情况,油滴的收缩时间小于1/30s即器件的/开启0响应时间小于1/30s油滴覆盖疏水表面的面积约为原来的30%。但由于本器件Ti/Pt界面反射率不高,使器件水覆盖疏水层区反射率不是很高。因此我们仅从收缩率的角度来讨论显示单元的工作情况。Philips提出的显示单元在20V驱动电压下油滴收缩到为原来的30%。而本器件在15V驱动电压下就使油滴收缩到原来的30%,可见驱动电压得到了明显的改善。

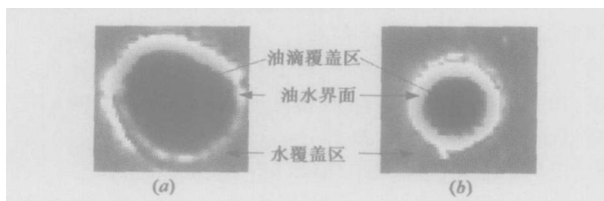


图3 外加电压下显示单元内油滴的收缩过程。(a)未加电压情况下油水界面;(b)外加15V电压后1/30s时刻油滴的收缩状态

在实验过程中,当外加驱动电压加到3V~5V左右,就明显产生油滴的收缩。随着外加电压的增大,油滴收缩越厉害。但外加电压加到30V左右时,油滴的收缩率几乎不发生变化。这种现象可能由于水滴接触角饱和或者油滴自身粘度和重力的影响,使收缩达到饱和。

图4说明了撤去外加电压后油滴的恢复过程。图4(a)为驱动电压为15V时,油滴覆盖疏水介质层表面;当撤去外加驱动电压后,油滴受毛细管作用力,恢复到初始状态。图4(b)为外加电压撤去后1/30s时刻油水界面,因此器件/关闭0响应时间小于1/30s

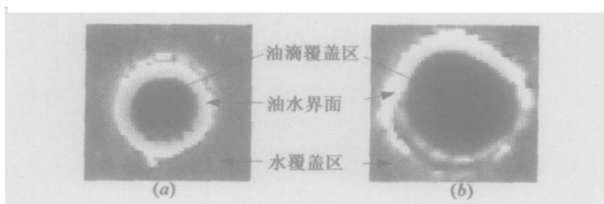


图4 撤去电压后显示单元内油滴的恢复过程。(a)施加电压情况下油水界面;(b)撤去电压后1/30s时刻油滴恢复到初始状态

在实验过程中,选择不同粘度的油对/开启0、/关闭0速度有很大的影响,油滴粘度越大,器件的/开启0、/关闭0响应时间越长。另外,显示单元尺寸、器件表面粗糙度以及疏水材料特性都将对器件/开启0、/关闭0速度起着重要作用。

实验中有两个现象需要说明:(1)Ti/Pt界面反射率不

是很高,使器件水覆盖区反射率不高,从而造成显示器件的对比度下降。最简单的改进方法就是用高反射率铝作为电极兼高反射基底,来弥补Ti/Pt界面反射率不高的缺陷;(2)有时未加电时初始状态下油滴并不完全平铺满疏水介质层表面。造成这种现象的原因可能由于实验选择的油滴与疏水材料不匹配,或者硅油粘度较大以及薄膜表面粗糙度较大等。目前,相关工作正在开展中,详细结果将陆续报道。

4 结论

本文提出了一种新型基于碳氟聚合物与氮化硅复合介质上电润湿的电子纸显示单元,该结构改善了器件的驱动电压。在15V低驱动电压下,成功实现了显示单元的/开启0、/关闭0特性,其/开启0、/关闭0响应时间小于1/30s通过理论和实验分析,提出选择低粘度油、制备低表面粗糙度、选择和制备高性能疏水材料以及降低器件单元尺寸等各种优化器件特性的方案。

参考文献:

- [1] B Cmiskey, J D Albert, H Yoshizawa, J Jacobson. An electrophoretic ink for all-printed reflective electronic displays [J]. Nature 1998, 394: 253-255.
- [2] Michael G Pollock, Richard B Fair, Alexander D Shenderov. Electrowetting-based actuation of liquid droplets for microfluidic applications [J]. Applied Physics Letters 2000, 77(11): 1725-1726.
- [3] M G Pollock, A D Shenderov, R B Fair. Electrowetting-based actuation of droplets for integrated microfluidics [J]. Lab on a Chip 2002, 2: 96-101.
- [4] Sung Kwon Cho, Hyejin Moon, Changjin Kim. Creating transporting cutting and merging liquid droplets by electrowetting-based actuation for digital microfluidic circuits [J]. Journal of Microelectromechanical Systems 2003, 12(1): 70-80.
- [5] Robert A Hayes, B J Feenstra. Video-speed electronic paper based on electrowetting [J]. Nature 2003, 425: 383-385.
- [6] M G Lippmann. Relations entre les phenomenes electriques et capillaires [J]. Ann Chim Phys 1875, 5(11): 494-549.
- [7] H J J Verheijen, M W J Prins. Reversible electrowetting and trapping of charge model and experiments [J]. Langmuir 1999, 15: 6616-6620.

作者简介:

吴建刚 男,1978年生于江苏,清华大学微电子所博士研究生,目前从事微流体光学及微流控技术的研究。E-mail: wjg02@mails.tsinghua.edu.cn

岳瑞峰 男,1965年出生,副教授,硕士生导师,目前从事智能传感器、微电子机械系统技术、微流控芯片和生物化学微系统的研究。