

微胶囊电泳显示与 TFT-LCD 之比较分析

李文波^{1,2}, 徐征^{1*}, 张卓², 王刚²,
邵喜斌², 刘宏宇², 李云飞²

(1. 北京交通大学 光电子技术研究所 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044;

2. 京东方科技集团股份有限公司 技术研发中心, 北京 100015)

摘要: 对微胶囊电泳显示与 TFT-LCD 显示进行了对比研究, 讨论并分析了它们在显示原理、电路的驱动方式和灰阶实现、像素设计以及显示性能等多方面的不同特性, 并对微胶囊电泳显示的应用前景做了简要介绍和预测。

关键词: 微胶囊电泳显示; TFT-LCD 显示; 比较分析

中图分类号: TN27 文献标识码: A

Comparative Analysis of Microencapsulated Electrophoretic Display and Traditional TFT-LCD Display

LI Wen-bo^{1,2}, XU Zheng^{1*}, ZHANG Zhuo²,
WANG Gang², SHAO Xi-bin², LIU Hong-yu², LI Yun-fei²

(1. Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Institute of Optoelectronic Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. BOE Technology Group Co. Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: This paper focused on the comparative analysis of microencapsulated electrophoretic display and TFT-LCD display. The different features such as the display principle, the circuit driving mode and gray-scale implementation, pixel design and display performance were investigated and analyzed in detail. Then, the recent development and prospects of current electronic paper based on electrophoresis display for its potential application are briefly introduced and predicted.

Key words: microencapsulated electrophoretic display; TFT-LCD display; comparative analysis

1 引言

电子纸是一种介于软拷贝和硬拷贝之间、兼具显示器和纸两者优点的新媒体概念。与 TFT-LCD 相比, 电子纸具有柔性显示、携带轻便、可擦写、功耗低等优点, 显示效果与纸张接近, 在标签

牌、广告牌、手表手机、报刊书籍以及目前较热门的电子书等显示领域均有广泛应用^[1-3]。

世界上现有的电子纸技术有电泳显示、双色旋转球、胆甾型液晶、电润湿技术和电致变色技术等^[4-6], 目前技术比较成熟、已实现量产的是胆甾型液晶显示技术和电泳显示技术^[7-10]。胆甾型液

收稿日期: 2010-03-18; 修订日期: 2010-04-19

基金项目: 国家“863”计划资助项目(No. 2008AA03A334); 中国博士后科学基金资助项目(No. 20090460265); 国家自然科学基金(No. 10974013, No. 10774013); 教育部博士点基金(No. 20090009110027); 国家“973”项目(No. 2010CB327704)

作者简介: 李文波(1981—), 男, 湖北仙桃人, 博士, 工程师, 主要从事液晶显示及电子纸用阵列基板设计。

* 通讯联系人, E-mail: zhengxu@bjtu.edu.cn

晶电子纸的研究机构主要有美国 Kent 大学、日本的富士通以及台湾工学院等;在电泳显示方面,主要是基于微胶囊技术的 E-ink 公司和基于微杯技术的 SiPix 公司,目前已能够实现彩色显示^[11]。不过近期随着 PVI 公司收购 E-Ink 公司,友达集团完成对 SiPix 的控股,使电子纸市场的格局变得微妙而有趣^[12-13]。与 TFT-LCD 相比,微胶囊电泳显示不需背光源,可实现零场双稳态柔性显示,但因响应速度慢而无法实现动态显示成其致命弱点。即便如此,电泳显示节能、可柔性显示等特点使其有效地填补了 LCD 等主流显示的市场盲区,是当前研究的热点之一。

有源电泳型电子纸显示可应用于电子阅读器,与 TFT-LCD 显示相同的是,也需用到 TFT 阵列基板来提高显示性能,但设计思路不大相同。本文针对有源电泳显示和 TFT-LCD 显示的不同特点,对它们的显示原理、电路的驱动方式和灰阶实现、像素设计、显示性能等方面进行了对比分析。

2 显示原理

常白 TN 型 TFT-LCD 的结构为两片玻璃基板中间夹有液晶层,在其中一片玻璃基板(后基板)上制备 TFT(薄膜晶体管),用于驱动液晶的旋转,控制每个像素的显示;另一块基板(前基板)上制备 CF(彩色滤光层),用于形成每个像素的色彩^[14]。其显示原理如图 1 所示,主要是通过施加电场来改变液晶分子的净力矩和其本身弹性的平衡关系^[15],从而改变液晶分子的排列方式,使光在液晶层中的相位延迟不同来改变透过率,再配以两片正交偏振片来实现像素的明暗显示。

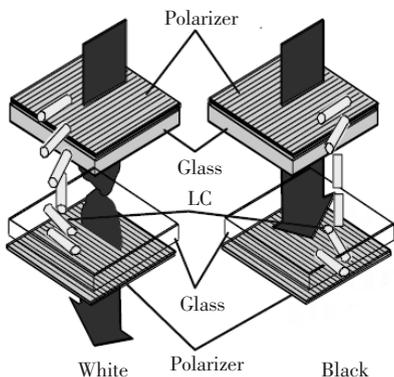


图 1 TN 型 TFT-LCD 器件显示原理

Fig. 1 Schematic diagram of traditional TFT-LCD display

电泳显示主要靠不同颜色的带异性电荷粒子在电场作用下的上下运动实现黑白显示,其所用的商用电子纸产品绝大多数来自 E-Ink 公司,采用的是微胶囊电泳显示技术。其显示原理如图 2 所示,在几十微米大小的微球中包裹有带正电的黑色粒子和带负电的白色粒子,粒子大小为 1~100 nm。工作时,对微胶囊上下表面施加正电场,带负电的白色粒子向上表面移动,带正电的黑色粒子向下表面移动,则在微胶囊的上表面呈现出白色光学状态;反之,则呈现出黑色光学状态^[6]。因此,微胶囊电泳显示是通过控制两个极板间的极性,驱动不同反射率的带电粒子泳动,从而实现黑白及灰度显示。

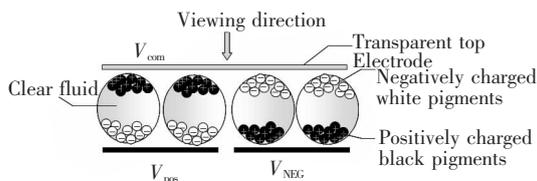


图 2 微胶囊电泳型电子纸显示原理

Fig. 2 Schematic diagram of microencapsulated electrophoretic display

3 驱动方式及灰阶实现

TFT-LCD 需要对液晶进行极性反转,即在不同的时间,需以方向相反、大小相等的电场施加在液晶上。液晶的驱动仅与电压大小有关,电压正负不影响液晶分子的排列和透过率,但必须以极性反转的方式来驱动^[15]。常见的 TFT-LCD 像素阵列的极性反转方式有帧反转、列反转、行反转以及点反转 4 种,如图 3 所示。其中点反转的功耗最大,但其画面闪烁最不易发生,显示效果最好。因此,目前商用的 TFT-LCD 显示器多为点反转驱动方式。

和液晶显示器件不同的是,微胶囊电泳显示器件中电子墨水对电压的极性是非常敏感的,电压的正负直接影响黑白粒子的明暗显示和灰阶表现^[16-17]。另外,电子墨水的驱动电压值较大,需提供几个固定电压值来实现其黑白显示,因而电泳显示的电压驱动需专用的电子纸驱动芯片和控制电路^[17]。

灰阶代表了显示画面由最暗到最亮之间不同亮度的层次级别,层级越多,所能够呈现的画面效果也就越细腻,在显示器件中是一个很重要的显

示性能衡量指标。灰阶的实现方式有多种,主要有面积(亚像素数目)灰度调制、脉宽调制、像素发光时间分级调制、像素发光强度分级调制等^[15, 18]。

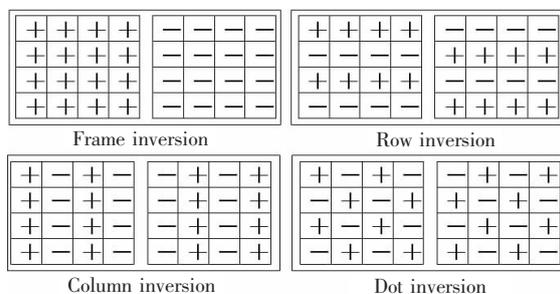


图 3 TFT-LCD 显示的极性反转方式

Fig. 3 Polarity inversion modes of TFT-LCD display

TFT-LCD 的灰阶实现主要是靠对液晶施加的电压控制来设定。图 4 所示为液晶的施加电压和光透过率的关系曲线。从图 4 可以看出,所要显示的灰阶越多,对像素的透过率(亮度)控制精度就越高,对液晶电压信号的控制就要越精确^[19]。因此,TFT-LCD 显示是以像素透光强度分级进行调制,只要精确控制写入像素的电压,即可控制像素液晶的透过率来实现所需的灰阶。

微胶囊电泳显示的灰阶实现方式与 TFT-LCD 显示是截然不同的,其灰度的变化主要是由显色粒子的相对位移决定的,而显色粒子运动的位移由数据信号线的电压脉宽(即给粒子施加电压的时间长短)来加以调制^[16, 20-21]。如图 5 所示,不同的灰阶显示可利用相应的电压脉宽调制加以实现,并且达到一个所需灰阶后,无需电源即可保持原有画面,只有当需要画面更新、灰阶发生改变时,才需额外的电压脉冲进行驱动。因此,电

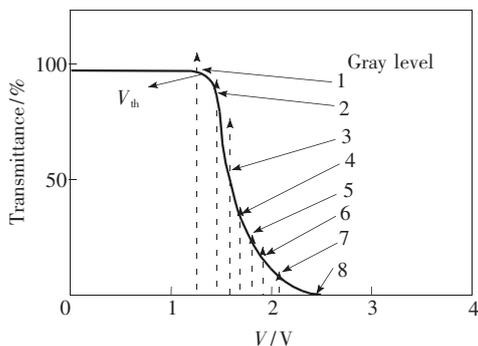


图 4 TN 型 TFT-LCD 典型的 V-T 的关系曲线

Fig. 4 V-T curves of traditional TN TFT-LCD display

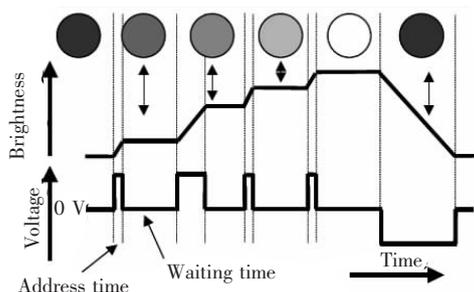


图 5 微胶囊电泳显示灰阶实现原理图

Fig. 5 Grayscale in microencapsulated electrophoretic display

泳显示主要是利用电压脉宽调制来控制显色粒子的相对位移,从而有效控制显色粒子的明暗程度,实现灰阶显示。

4 像素设计

像素设计是一种整合多元知识的技术,除了 TFT 设计自身领域外,也需同时涉及显示介质的光学设计、外围电路驱动设计以及模组设计等众多知识领域。因此,TFT 产品设计要考虑的因素很多,需根据产品设计的实际情况,并结合其显示原理、显示介质的性能参数(特别是驱动电压和响应时间)、目标产品的设计规格以及 TFT 的产线和制程等做出合适的设计方案。

4.1 显示介质

TN 型 TFT-LCD 所用显示介质为液晶(LC),而电泳显示中为电子墨水微胶囊(E-ink),两者的物理参数对比如表 1 所示。

表 1 电子墨水微胶囊与液晶的基本物理参数对比

Table 1 Physical parameters comparing between E-ink and LC

Items	E-ink	LC
ρ	$10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$	$10^{12} \sim 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$
ϵ	3~4	3~11
Thickness	40~50 μm	4 μm
Driving voltage	15 V	5 V
Response time	500~1 000 ms	5~30 ms

从表中可知,电子墨水材料的电阻率 ρ 比液晶要小 2~3 个数量级,其介电常数 ϵ 比液晶略小且为定值;而液晶的介电常数会随外施电压的变

化而变化,从而导致液晶电容也随之变化。另外,电子墨水微胶囊的厚度比 TFT-LCD 显示中液晶层要厚 10 倍,其驱动电压也比液晶高 3 倍以上,响应速度较慢,电泳显示切换一次画面需近 1 s,因而较难实现动态视频显示。

4.2 像素

一个显示画面是由像素组合而成,每个像素的大小和形状是完全一样的,相同尺寸画面包含的像素越多,所呈现的画面会越精致。

在 TFT-LCD 中是将每个像素在空间上分割成 3 个亚像素,各显示红、绿、蓝三原色。由于像素尺寸小、画面变化频率大,人眼察觉不到像素三原色显示位置的略小差别,因而可使每个像素显示出所需的各种颜色。

而目前的大多数电泳显示器件为黑白显示,其色彩是由带电粒子的自身颜色加以显示,颜色相对单一,也无需彩色滤光片和亚像素设计,但对需实现彩色显示的电泳显示器来说就另当别论了。

4.3 TFT 设计

一般来说,TFT 设计首先需进行 TFT 沟道宽长比、存储电容(C_s)大小的优化,以满足像素充电特性、电压保持特性以及跳变电压设计要求;其次需设计合适的数据线、栅极线以及公电极线的线宽以同时满足信号延迟和像素开口率的要求。做出像素的初始设计和布局后,需进行像素等效电路计算,利用电路模拟软件对设计的像素阵列做充电特性、电荷保持特性以及信号延迟进行模拟验证以满足产品设计要求。

TFT-LCD 显示一般为透射式,需要背光源提供亮度,因此在像素设计中经常要考虑 TFT、 C_s 的面积大小、数据线的宽度等对像素开口率(一个像素单元面积上有效显示面积所占的比例)的影响。另外,液晶电容会随外加电压的变化而改变,导致跳变电压 ΔV_p (TFT 由开到关时,栅极线电压变化对像素电极产生的电容耦合效应)会随灰阶不同而不同。因此,以“ C_s on common”方式的像素设计,用共电极电压补偿方法仍无法完全抵消栅极线的电容耦合效应。目前最有效的补偿是以“ C_s on gate”方式设计、采用栅极线的三阶驱动法加以实现。

电泳显示为反射式,上述因素对其像素开口率影响不大,可以采用较大的 C_s 设计。另外,电子墨水的介电常数为定值,不受外施电压影响,因

而只需采用“ C_s on common”方式设计,以共电极电压补偿方法即可完全抵消栅极线的电容耦合效应。但是,电泳显示所用微胶囊电子墨水的驱动电压较高、响应速度较慢,对 TFT 的设计也相应提出了更高要求。因此,电泳显示用有源 TFT 基板的像素设计在某些方面需要重新考量。

(1) 共栅极双栅结构设计

与 TFT-LCD 显示相比,电泳显示所需驱动电压较高,会带来较大的关态漏电流,导致极板间电压无法维持。因此,可用共栅极双栅结构增加 TFT 的关态电阻来有效减少 TFT 的关态漏电流^[22-23]。

(2) 较大的 C_s 设计

电泳显示需用较大的 C_s ,原因有两点:

①因为漏电导致像素产生电压降,故需用较大的 C_s 增强像素的电位保持能力。而漏电的路径主要来自上述 TFT 关闭时的较大漏电流和已不可忽略的像素电容本身的漏电流。一般而言,像素电容上的电压会以指数的方式下降,如公式 1 所示^[15]。

$$V_{\text{pixel}} = V_{\text{pixel}}(0) \exp[-t/T_{\text{con}}] \quad (1)$$

其中, $V_{\text{pixel}}(0)$ 为像素的初始电压, t 为保持时间, $T_{\text{con}} = R_{\text{pixel}} C_{\text{pixel}}$ 为像素电容的时间常数。

相比之下,电子墨水的电阻率比液晶小几个数量级,介电常数也较小,因此其时间常数 T_{con} 只有 3 ms 左右(液晶电容的时间常数约为 6 s),漏电非常严重,因此必须采用较大 C_s 来保持像素的电压。

②减小像素的跳变电压 ΔV_p 。对于“ C_s on common”方式的 TFT 设计而言,其 ΔV_p 与 TFT 的寄生电容 C_{gs} 、 C_s 满足如下关系^[24-25]:

$$\Delta V_p = (C_{\text{gs}} \times V_{\text{ghl}}) / (C_s + C_{\text{gs}} + C_{\text{pix}}) \quad (2)$$

其中, V_{ghl} 为栅线关闭前后的电压差。因电子墨水微胶囊较厚,介电常数较小,其电容 C_{pix} 相对液晶电容而言会小很多;另外,TFT 采用的是共栅极双栅结构,必然会增加 TFT 自身的寄生电容;再者,电泳显示的栅极线关闭前后的电压差 V_{ghl} 也会明显增大,上述因素如公式(2)所示均会增加像素的 ΔV_p ,故必须采用更大的 C_s 来有效减小 ΔV_p 。

由于电泳显示为反射式, C_s 的大小对像素的开口率影响不大,故在满足像素充电要求的条件下,采用较大的 C_s 设计来减小像素的 ΔV_p 并保

持其电位不失为一条非常有效的途径。

5 显示性能

与 TFT-LCD 显示相比,微胶囊电泳器件在显示性能方面还有许多需要改善的地方,主要表现在以下 4 个方面:

(1)在色彩表现方面,微胶囊电泳显示一般为黑白显示,其彩色显示功能虽已实现,但目前还未达到实用化水平;

(2)在分辨率表现方面,其显示分辨率的高低与微胶囊的材料品质有较大关系,因此也相对较难实现高分辨率显示;

(3)在灰阶表现方面,微胶囊电泳显示一般为 4 灰阶或 8 灰阶,比 TFT-LCD 常用显示的 256 灰阶相比低很多;

(4)在动态显示方面,电子墨水的响应时间慢,画面更新一次至稳定的时间长(约 1~3 s),因而动态的视频显示较难实现,也限制了其在更多领域的应用。

但目前电泳显示之所以成为产品研发的焦点和热点,也有其独特之处:一是电泳显示是不同于液晶显示的一种全新的显示方式,其关键材料 E-ink 膜已可量产,显示性能可达一般信息显示要求;二是电泳显示无需背光源,可实现零场双稳态显示,也不用偏振片和 PI 取向剂,可节省材料、简化工艺、降低能耗并减少成本^[21]。

因此,电泳显示主要优势在于其功耗低、工艺相对简单,但其显示性能与已很成熟的液晶显示相比还有很大的差距,需对电子纸材料进一步研发和改进。

6 电泳显示技术的现状及发展趋势

随着微胶囊电泳显示市场的火热,“电子纸”已逐成其代名词并广泛应用于电子书阅读器之中。目前包括生产液晶面板的友达和奇美、生产电子纸的元太科技以及台达电公司均已抢先一步,在电子书阅读器供应链中取得了一席之地并掌握了电子纸的关键技术^[26]。元太科技在并购

掌握彩色墨水发展技术的美国 E-Ink 公司后,其电子纸在全球有逾九成的市场占有率,同时供货给亚马逊与索尼公司。其与美国 E-Ink 在 2009 年 10 月 28~30 日于太平洋横滨会展中心举行的“FPD International 2009”上,首次展出了分辨率高达 270 ppi 的电子纸,屏幕尺寸为 24.6 cm (9.68 in),像素数为 2 048×1 536,采用非晶硅 TFT 玻璃底板,黑白 16 灰阶显示^[27]。而台湾最大面板制造商友达在 2009 年 3 月以 3 000 万美元收购电子纸制造商 SiPix 公司后,正式切入电子纸市场,其电子卷标用电子纸已于 2009 年 8 月量产出货,15.2 cm (6 in)及 22.9 cm (9 in)电子书阅读器用的电子纸也将在第四季度量产出货。在 50.8 cm (20 in)以上的显示器用电子纸以及应用在外观包装的电子纸方面,友达明年也将加速量产^[26]。

在技术层面上,采用 RGBW(红绿蓝白)彩色滤光片技术可以实现电子纸的显示彩色化^[13]。利用剥离技术在聚酰亚胺底板上形成柔性 TFT,可彻底取代当前使用的玻璃基板^[28]。而 3G、WiMAX 以及太阳能电池等新技术在电子书阅读器上的“生根发芽”,也将拓展电子书阅读器的普及度,其市场也将持续升温,其屏幕也能整合触控功能,可做到手写、翻页、放大。因此,随着电子纸柔性化、彩色化、功能化的逐步实现,将会有更多原本使用液晶显示器的产品,转而使用电子纸这类低耗能显示器。

7 结 论

综上所述,与液晶显示相比,电泳显示的显示原理、驱动方式和灰阶实现、TFT 基板设计以及显示性能等方面均有很大的差异,其低功耗特性及更接近传统纸的可视性使电子纸成为专用电子书阅读器不可或缺的重要部件。因此,低成本、可柔性彩色显示、具触控屏幕功能并拥有开放的数字内容平台与图书数据库的电子书阅读器必将成为下一步电泳型显示器件发展的趋势。

参 考 文 献:

[1] Rogers J A. Toward paperlike displays[J]. *Science*, 2001, 291:1502-1503.

[2] Chen Y, Au J, Kazlas P, et al. Flexible active-matrix electronic ink display[J]. *Nature*, 2003, 423(8):136.

- [3] Comiskey B, Albert J D, Yoshizawa H, *et al.* An electrophoretic ink for all-printed reflective electronic displays [J]. *Nature*, 1998, 394 (16): 253-255.
- [4] 耿卫东,刘会刚,商广辉. MEMS 显示技术[J]. *液晶与显示*, 2008, 23(2): 230-234.
- [5] 孙志文,谢二庆,韩卫华,等. 电润湿的研究进展[J]. *液晶与显示*, 2008, 23(3): 387-392.
- [6] 赵晓鹏,郭慧林,王建平. 电子墨水与电子纸[M]. 北京:化学工业出版社, 2005, 26-29.
- [7] Comiskey B, Albert J D, Jacobson J. Electrophoretic ink: A printable display material [C]//*SID'97 Digest*, San Francisco, USA; SID, 1997: 75-76.
- [8] Rogers J A, Bao Z N, Baldwin K, *et al.* Paper-like electronic displays; large-area rubber-stamped plastic sheets of electronics and microencapsulated electrophoretic inks [J]. *Proceedings of National Academy of Sciences*, 2001, 98 (9): 4835-4840.
- [9] Fang X J, Yang H, Wu G, *et al.* Preparation and characterization of low density polystyrene/TiO₂ core-shell particles for electronic paper application [J]. *Current Appl. Phys.*, 2009, (9): 755-759.
- [10] 中国电子纸网. 电泳、胆固醇液晶、OLED 三大显示技术媲美 [EB/OL]. [2009-05-15]. http://www.dzccn.com/Epaper_Tech/200905/E-paper_CholestericLiquidCrystals_OLED.html.
- [11] 日经 BP 社. 【FPDI】元太科技与 E Ink 首次公开 9.7 英寸彩色电子纸, 使用新型薄膜 [EB/OL]. [2009/10/29]. <http://china.nikkeibp.com.cn/news/taiw/48610-20091028.html>.
- [12] 杭州道远网络科技有限公司. 台湾元太科技并购 E-Ink 并取得电子纸显示器材料的关键技术及专利 [EB/OL]. [2009-06-11]. <http://www.8867.cn/detail/7192.html>.
- [13] 梁靛. 友达入股 SiPix 下半年量产电子纸 [EB/OL]. [2009-03-15]. http://www.cena.com.cn/Article/xiaofeidianzi/heidian/2009-03-05/20090305112228_16753.shtml.
- [14] 王大巍,王刚,李俊峰,等. 薄膜晶体管液晶显示器件的制造、测试与技术发展 [M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [15] 戴亚翔. TFT LCD 面板的驱动与设计 [M]. 北京:清华大学出版社, 2008: 3-15.
- [16] Johnson M T, Zhou G F, Zehner R, *et al.* High quality images on electronic paper displays [C]//*SID'05 Digest*, Boston, USA; SID, 2005: 1666-1669.
- [17] Zehner R W, Amundson K R, Gates H G. System integration of electronic paper displays [C]//*SID'06 Digest*, San Francisco, USA; SID, 2006: 1827-1829.
- [18] 黄子强. 液晶显示原理 [M]. 北京:国防工业出版社, 2006: 216-218.
- [19] 严利民,王浩,金晨,等. 平板显示器件的灰度显示优化结构 [J]. *液晶与显示*, 2008, 23(5): 567-571.
- [20] Kawai H, Miyasaka M, Miyazaki A, *et al.* A flexible 2-in QVGA LTPS-TFT electrophoretic display [C]//*SID'05 Digest*, Boston, USA; SID, 1638-1641.
- [21] Zhou G F, Johnson M T, Alex Henzen, *et al.* Perspectives and challenges of electrophoretic displays [C]//*IMID'05 Digest*, Secoul, Korea; IMID, 236-240.
- [22] 杨澍,荆海,付国柱,等. a-Si 双栅 TFT 对电泳显示器响应速度的改善 [J]. *液晶与显示*, 2007, 22(5): 565-571.
- [23] Henzen A, Pitt M, Yasui M, *et al.* Development of active matrix electronic ink displays for smart handheld applications [C]// *IDW'02 Digest*, Hiroshima, Japan; IMID, 2002: 227-230.
- [24] 李云飞,王永生,张晓龙,等. a-Si:H TFT OLED 驱动电路中存储电容对显示性能的影响 [J]. *液晶与显示*, 2008, 23 (5): 572-577.
- [25] 王刚. 高品质 a-Si:H TFT-LCD 阵列设计与工艺研究 [D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 1999.
- [26] 新浪科技. 电子纸市场升温台湾厂商加大整合力度 [EB/OL]. [2009-11-13]. <http://tech.sina.com.cn/it/2009-11-13/16573591218.shtml>.
- [27] 日经 BP 社. 【FPDI】PVI 和 E Ink 首次展出 270ppi 电子纸及 9.7 英寸柔性电子纸 [EB/OL]. [2009/11/02]. <http://china.nikkeibp.com.cn/news/flat/48643-20091030.html>.
- [28] 21IC 中国电子网. 电子纸取代液晶, 节能需求将是关键 [EB/OL]. [2009-09-16]. <http://www.21ic.com/news/opto/200909/47558.html>.