

文章编号:1007-2780(2019)02-0169-08

反射显示技术的研究进展

卜倩倩*, 王 丹, 邱 云, 孙 晓, 胡伟频, 姜明宵, 魏从从, 王 纯

(北京京东方显示技术有限公司, 北京 100176)

摘要:反射显示具有超低功耗、高照度条件下易读性好、易于实现柔性、价格低廉等特点,广泛应用于各显示领域,包括电子纸、电子指示牌、电子货架标签、可穿戴显示等。特别是户外环境下使用的显示器件,对低功耗、高照度条件下易读性等有着显著的需求,因而反射类显示得到了快速的发展。为了更好地进行反射类显示的技术开发与推广,本文系统分析了 3 种主流的反射类显示技术,详细地阐述了 3 种主流反射类显示核心技术、显示原理与方案,并从显示从业者的角度对反射类显示技术的开发现状及发展进行了思考。

关 键 词:反射显示;液晶显示;电润湿显示;电泳显示

中图分类号:TN141.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193402.0169

Progress of reflective display technology

BU Qian-qian*, WANG Dan, QIU Yun, SUN Xiao, HU Wei-pin,

JIANG Ming-xiao, WEI Cong-cong, WANG Chun

(Beijing BOE Display Technology CO., LTD, Beijing 100176, China)

Abstract: With the characteristics of low power consumption, readability in the sun, flexible, cheap, reflective display has been widely used in many areas, including e-paper, electronic directional sign-board, electronic shelf label, wearable display, and so on, especially the displays used in the outdoor environment urgently demand the properties of low power consumption and readability in the sun. Thus, the reflective displays get rapid development. In order to develop and promote the reflective display better, three types of the mainstream reflective displays were investigated systematically, including the core technology of reflective display, the principle and the scheme, and the development present situation. The development trend were proposed from the angle of the practitioners of display.

Key words: reflective display; liquid crystal display; electrowetting display; electrophoretic display

1 引 言

近些年来,随着科技的不断进步与发展,液晶显示、有机电致发光显示、激光显示、反射类显示等显示技术日趋成熟,与人工智能、大数据技术相

结合,目前显示技术正朝着多样化、智能化的方向发展。

液晶透射显示是目前使用最为广泛的显示,结合 ADS 液晶驱动方式,低温多晶硅薄膜晶体管等先进技术,可以实现成本低廉,色彩丰富的显示方式。但其需要背光照明,因而较厚,且不易弯

收稿日期:2018-09-17;修订日期:2018-12-17.

* 通信联系人, E-mail: buqianqian@boe.com.cn

曲。同时由于显示过程中需要持续开启背光,功耗相对较大。激光显示被称为下一代显示技术,色域广,饱和度高,颜色表现力极佳。但由于需要通过投影的方式实现显示,因而其亮度和对比度低,目前还未得到大规模的应用。有机发光二极管显示不需要背光,可以实现超薄显示。同时还有高色域,高对比度,快速响应等优点,在显示行业得到了广泛的关注,但其亮度低,寿命低,成本高等缺点限制了其广泛的应用与推广。

反射显示具有可实现超低功耗,阳光下易读性好,价格低廉,质量轻优点,被广泛应用于电子纸,电子指示牌,货架标签等显示领域。在过去 20 年中,由于材料和工艺的改善,反射类显示已经取得了快速进展,本文将从结构,工作原理,研究进展等方面对目前主要的反射液晶显示、电润湿显示及电泳显示 3 种技术进行介绍。

2 反射式液晶显示

透射式液晶显示已被广泛应用于高分辨率电视,电脑显示器,笔记本电脑,平板电脑及手机。其基本原理是将液晶置于两片导电玻璃基板之间,在上下玻璃基板的电极作用下,液晶分子发生扭曲变形,改变通过液晶盒光束的偏振状态,从而实现背光光源光束的开关控制。若在两片玻璃间增加彩色滤光膜,则可实现彩色图像显示。透射式液晶显示的一个主要的缺点显示运行状态下一直需要背光源,因而,其功耗相对较高。此外,由于太阳直照下面板的表面反射比显示图像更亮,因而,透射式液晶显示在很强的环境光下易读性较差。通过对显示结构进行重新设计,增加反射器,去除背光单元,即可实现反射式液晶显示。由于其利用环境光进行显示^[1-2],因而,与透射液晶相比,反射液晶具有功耗低、重量轻、户外可读性好等优点。

根据光调制机理,反射式 LCD 可以分为 3 类:吸收型、散射型及相位延迟型。其中前两种未改变入射光的相位,仅通过吸收,散射等物理作用实现显示,而相位延迟型则是通过改变入射光的相位实现显示过程。

2.1 吸收型反射 LCD

为了实现吸收效应,需将质量分数 2%~5% 的二色性染料掺杂于液晶主体中。随着电场的施

加,主体液晶协同染料分子发生偏转。当入射光的偏振平行于主体分子轴,二色性染料分子会发生很强的吸收;相反,若入射光的偏振垂直于主体分子轴,则二色性染料分子的吸收会很弱。平行和垂直的吸收系数的比值称为二色性比率,这一数值会极大地影响显示的对比度。此种显示方式首先被 Heilmeyer 和 Zanoni^[3] 在 TN 型中提出。此种显示不需要偏光片,但其对应的主要技术挑战是对比度问题^[4-7]。一个典型的染料反射型 LCD 的对比度是 5 : 1,反射率为 40%~50%。另外,由于其在可见光区域的强吸收问题,其长期稳定性是另外一个需要关注的问题。下面将以向列型为例,介绍吸收性反射 LCD 的工作原理。

图 1 是 TN 吸收型反射 LCD 原理图。使用一个 1/4 波片,一个反射器,向列相 LC/染料混合物。其中反射器可以为贴附膜层,亦可为工艺制作膜层,具体使用可根据具体结构而定。图中的上部分和下部分分别表示电压关断和电压打开的状态。

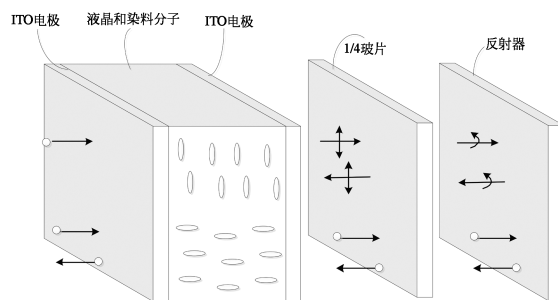


图 1 吸收型反射 LCD 原理图

Fig. 1 Schematic diagram of absorption type reflective LCD

当电压关断时,入射光经液晶/染料层,由非偏振态变为线性偏振光;之后线性偏振光通过内部 1/4 波片,其偏振状态变为右旋圆偏振光。从反射器反射后,由于 π 相位的改变,其偏振态变为左旋;之后左旋偏振片再次通过 1/4 波片,由于其偏振方向与液晶取向方向平行,光被掺杂的染料分子吸收,实现暗态。

当电压打开时,液晶连同染料分子被重新调整垂直于基板,在此状态下,光通过时几乎不被吸收,因而其偏振状态不发生改变。当非偏振的环境光经过液晶/染料层,1/4 波片后,连续无偏振状态的变化,从反射器反射后,仍然是非偏振光,最后从透射液晶片取出光,形成没有衰减的亮态。

2.2 散射型反射 LCD

聚合物扩散液晶,聚合物稳定胆甾结构及液晶凝胶均展现了优异的光散射特性,被广泛应用于显示光学器件^[8-10]。本文以液晶凝胶为例对散射型反射 LCD 进行介绍。图 2 是液晶凝胶散射型反射 LCD 原理。液晶凝胶反射 LCD 由液晶凝胶、一个 $1/4$ 波片、一个反射器组成。液晶盒被向列液晶和单体混合物填充,在紫外诱导聚合后,形成聚合物网络,液晶分子则被限制在聚合物网络中。

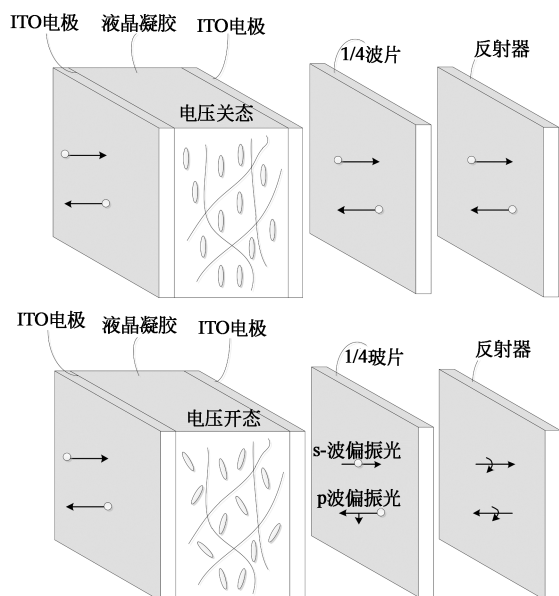


图2 散射型反射 LCD 原理图

Fig.2 Schematic diagram of scattering type reflective LCD

当电压关断时,液晶分子均一对齐,液晶凝胶呈高透状,可以保证光穿过。非偏振的可见光通过液晶盒后,仍保持非偏振态,即得到一个相当的亮态。

当电压打开时,液晶分子改变对准状态,沿着聚合物链形成微域。若域的大小与入射光波长相当,非偏振环境光变成线性的 s-波偏振光,通过 $1/4$ 波片后,被反射器反射,再次经过 $1/4$ 波片,变为 p-波偏振光。由于液晶凝胶的散射, p-波会再被散射,因此,会形成一个散射的半透明状态。

散射反射型 LCD 只需要一个偏光片,因此其亮度非常高。但有两个主要的缺点:第一,光散射通常会导致一个半透明状态,而不是一个纯黑态,

因此,图像对比度低。第二,由于聚合物网络约束,驱动电压通常需要大于 20 V,超出了目前常规 LCD 应用所开发的薄膜晶体管的能力。这些缺点限制了散射型半透半反 LCD 的广泛应用。

2.3 相位延迟型反射 LCD

相位延迟型反射 LCD 的工作原理,是基于电压诱导液晶取向,如 TN 液晶盒,属于偏振旋转效应。与吸收,散射型反射 LCD 相比,相位延迟型反射 LCD 具有更高的对比度,更低的驱动电压,且与目前的大规模工艺生产技术具有更好的兼容性^[11-12]。

图 3 是一种相位延迟型反射 LCD 原理图。一个 90° 的 TN 液晶盒,夹在两个交叉的偏光片中间,一个反射器设置于底部偏光片上。

当电压关断时,从底部基板到上部基板的液晶呈现一个均匀的扭曲。非偏振环境光入射到 TN 液晶层,其入射偏振光旋转 90° ,再经过底部偏光片,到达反射器,一部分偏振光被反射,然后再次通过底部偏光片。线性偏振光经过扭曲的液晶分子,其偏振轴被旋转 90° ,之后,平行于顶部偏振片的透射轴射出,产生一个亮态。

当电压开启时,液晶分子垂直于基板取向,垂直取向的液晶分子不会调制入射光的偏振态。而两个偏振片正交互相补偿。因此,顶部偏振片产生的线性偏振光通过激活的液晶层,不改变其偏振状态,结果,被底部偏振片吸收,未有光线被反射到观察者的视角,显示为黑态。

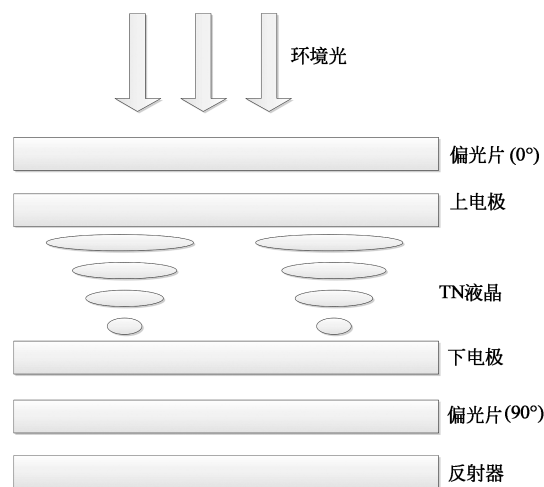


图3 相位延迟型反射 LCD 原理图

Fig.3 Schematic diagram of phase delay type reflective LCD

3 电润湿显示

最早将电润湿技术应用于显示可以追溯到十九世纪 80 年代早期, Beni 和 Hackwood (Bell Labs) 利用电润湿原理, 提出了一种折射率匹配的液体在多孔结构中进出的结构, 形成类似于聚合物分散液晶的显示。孔里没有液体, 显示为光态, 而当孔内有液体时, 则呈现透明态^[13-14]。在过去 20 年中, 由于材料和工艺的改善, 在电润湿显示特性方面已经取得了快速进展。在过去十年中, 电润湿实现了大量的应用。包括像素化的光学过滤器, 纤维光学, 自适应镜头, 芯片实验室, 帘膜式淋涂等。

电润湿效应用于显示, 主要有两种不同的方式: (1) 在一个固定的位置, 加电使得液滴收缩或扩张, 称为非双稳态电润湿显示^[15-18]; (2) 加电趋势液滴从一个位置移动到另一个位置, 称为双稳态电润湿显示^[19-21]。

3.1 非双稳态电润湿显示

图 4 是非双稳态电润湿显示原理图。图 4 (a) 展示的是光学叠加示意图, 由透明电极、疏水介电层、彩色油墨层和水组成。在显示结构中, 这些膜层像三明治结构一样组合在玻璃和聚合物基板之间。液体填充完成后, 彩色油墨自然地在水和疏水介质层之间形成连续的薄膜, 如图 4 所示。显示应用的最典型的像素尺寸大约为 $200\ \mu\text{m}$ 。表面张力是万有引力的 1 000 倍以上, 因此, 油墨层在所有方向都是稳定的状态。当有电压施加到疏水介质层, 系统通过将水滴移动至与绝缘层接触来降低能量, 因此, 变化了油墨的位置, 曝光了底层反射面。静电力与表面张力的平衡决定了油墨能被移动多远。通过这种方式, 堆叠结构的

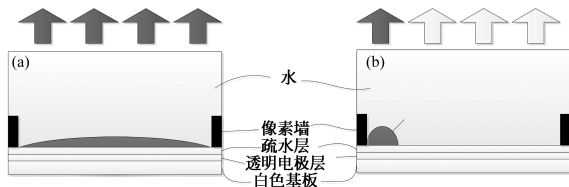


图 4 非双稳态电润湿显示原理图。(a) 液滴伸展状态; (b) 液滴收缩状态。

Fig.4 Schematic diagram of the non-bistable electrowetting display. (a) Droplet in extension state; (b) Droplet in shrink state.

学特性, 可以在色彩和透明状态之间被持续调整。电润湿光开关用来形成透射、反射和透射显示, 其中反射显示最为常用。

电润湿彩色显示结构有多种, 在这些中, 以下两种结构为主流结构, 分别为单层结构和 3 层结构。

图 5(a) 为彩色非双稳态电润湿单层结构图, 在此结构中, 使用黑色油墨作为吸收开关, 提供了一种更简单, 更低成本的屏幕显示。这种方法最大的好处是工艺流程与 LCD 类似, 因此, 制作成本更低。同时由于没有使用偏光片, 光效更高。另外一方面, 与 LCD 对比, 电润湿显示有一个天然的非限制的视角, 而 LCD 结构则需要使用各种方法改善视角, 会导致亮度的进一步降低。

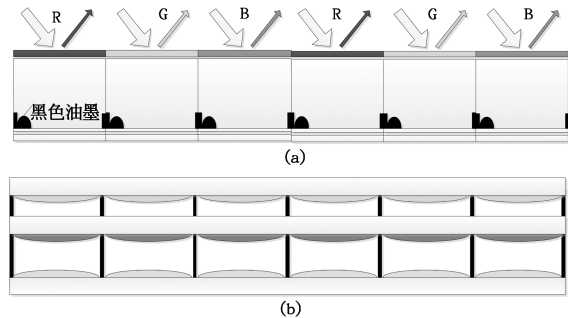


图 5 彩色非双稳态电润湿显示结构图。(a) 单层彩色膜; (b) 三层彩色膜。

Fig.5 Structure diagram of the chromatic nonbistable electrowetting display. (a) Single layer color film; (b) Three layers color film.

另外一个重要结构是 3 层单色膜叠加放置, 单层膜显示的所有工序均可应用到 3 层膜显示中, 具体结构见图 5(b)。通过调整每层的驱动电压, 经基板混色, 即可实现所需的颜色。这种方法意味着在显示的所有区域, 均可产生全彩色, 理论上可以实现 100% 的色彩转换。在 3 层结构中, 需要 3 个主动矩阵驱动模型, 这也是决定优异的显示光学表现的最重要的因素。精确对位, 保证开口率, 是实现这种显示最关键的技术。另外这种技术允许实现广色域与高反射率的联合, 进而实现全纸质化显示。

非稳态电润湿显示可以使用各种类型的基板, 从涂覆有 ITO 的玻璃基板, 柔性显示用聚合物基板。在基板上, 涂覆上亚微米厚度的非晶氟化聚合物膜层或堆叠的阻挡层和氟化聚合物层。

阻隔层用于在大批量生产过程中处理氟化聚合物缺陷。氟化聚合物的强疏水特性保证了在关态下油墨的蔓延。像素结构中的光刻墙的高度在油墨在像素内的自主装过程中扮演着关键的角色,其高度由标准的光刻技术决定,需工艺保证其表面均一性,以确保均一的电-光响应。极性溶剂作为连续相,在显示中充当 common 电极的作用。

可以看出,电润湿显示的制作工艺,几乎全部可以使用 LCD 现有工艺。唯一的例外是其填充工艺与 LCD 不同。这就意味着使用现有的 LCD 显示工艺,只需要很低投入即可产出电润湿显示,为电润湿显示实现商业化提供了更大的可能。

3.2 双稳态电润湿显示

将水或水状液滴放置于图案化的电极之上。如果施加电压到临近电极,由于临近电极与当前电极距离很近,液滴通过润湿第二个电极区域可以得到一些表面能量。因此,液体被吸到第二个电极之上。如果电压关掉,液滴保持位置不变。因此,从上面观察,即可看到一个位置液滴可见,而另外一个不可见。由于不需要更多的能量,甚至电场或电荷,即可实现液滴可见和隐藏的状态,因此,我们称这种显示方法为无功耗显示。

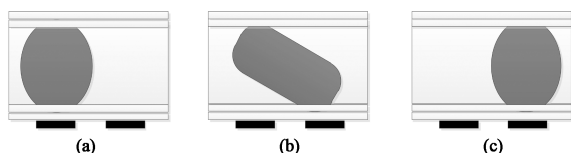


图6 双稳态电润湿显示原理图。(a)电压切断,液滴保持在左边电极;(b)施加电压,液滴移动;(c)电压切断,液滴保持在右边电极。

Fig.6 Schematic diagram of the bistable electrowetting display. (a) Turn off the voltage, the droplet is kept on the left electrode; (b) Turn on the voltage, the droplet moves from the left electrode to the right electrode; (c) Turn off the voltage, the droplet is kept on the right electrode.

双稳态电润湿显示 2D 结构如图 6 所示,(a)状态下,电压切断,液滴保持在左边电极;(b)为施加电压后的中间态,液滴移动;(c)为液滴移动至右边电极,此时切断电压,液滴保持不动。这种结构容易实现,在批量生产时,可提供极低的边际成本。但这种方法的一个最大的缺点是会降低像

素开口率。为了解决这一个问题,进行了结构改善,改善的典型结构如图 7 所示^[20]。液滴被存储在可见层的下面,两个腔室被一个中间阻隔层分开,中间层具有必要的开口和控制电极。这个设计的开口率达 85% 之高。通过选择合适的开口,我们可以在大约 20~40 V 的开关电压下,经过 300 ms 的开关时间,实现 2mm 的双稳态像素。除了 U 型几何构造, S 和 L 型也较为常用,特别是 L 型将提供一个非常具有吸引力的规格的组合,因为它将结合了 2D 设计的透反射能力和 3D 设计的高开口率。这种结构需要通过处理复杂的结构来实现平衡,目前为止仍处于实验室原型阶段,随着生产经验的增加,预计这种方式将会得到发展。

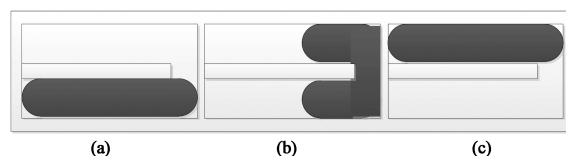


图7 改进的双稳态电润湿显示原理图。(a)电压切断,液滴保持在底端;(b)施加电压,液滴移动;(c)电压切断,液滴保持在顶端。

Fig.7 Schematic diagram of the improved bistable electrowetting display. (a) Turn off the voltage, the droplet is kept on the bottom; (b) Turn on the voltage, the droplet moves from the bottom to the top; (c) Turn off the voltage, the droplet is kept on the top.

具体的制作工艺如下^[22]:在玻璃基板上覆盖 ITO 薄膜,之后,ITO 通过激光进行图案化,通过蒸镀过程在其上进行介电层的涂覆,通过旋转涂覆,将特氟龙膜层涂覆其上。具体的微流控结构取决于所需液滴尺寸,对于微米尺寸的像素结构,可以使用光刻工艺制作膜层。液体层放置于电极结构上方,并使用胶进行点固定。制作两个样品后,在其中之一的上方放置中间层,中间层有空洞,以便液滴和中性液体传输。此中间层在顶部和底部均设置有电极,以处理单独的行或列。在真空条件下用中性液体填充样本以防止气泡形成。之后将有色液注入。最后,将另一个玻璃样品放置其上,并使用夹具固定器件。通过将整个装置粘合在一起,即可得到一个密封装置,以防止气体解吸溶剂。

最后,将标准的电子引脚放置在侧面,完成改善的双稳态电润湿显示器件的制作。

4 电泳显示

电泳显示(Electrophoretic Display, EPD)是一种通过设计流体中分散粒子移动实现显示的一种电动力学方法。电泳显示包含两个电极层,油墨被夹在两个电极层之间,油墨包含白色带电颗粒和黑色带电颗粒,白色和黑色颗粒带有相反的电荷,颗粒在静电力作用下移动。当白色颗粒聚集在顶部电极时,环境光被反射,可以看到一个白色的状态。相反,当黑色颗粒移动至顶部电极,则会观察到一个黑色的状态。常使用主动矩阵驱动技术驱动带电粒子,当施加电场时,颗粒被场应力移动,呈现给观察者的颜色会发生改变。同时,为了准确地显示灰度,消除散射和鬼影,需仔细优化驱动波形算法。

EPD 最重要的优势是其低功耗特性,由于其为双稳态,代表着一个系统具有两个稳定平衡状态。对于显示而言,双稳态意味着显示可以不需要消耗任何功耗地保持在一个静止画面。在 EPD 中,当外加电压移除,带电颗粒的位置仍然被保持。相反,在传统的 LCD 中,背光需要持续被点亮,同时驱动电路需要持续快速刷新。其次,EPD 使用的颜料与普通印刷油墨基本相同,以反映环境光线,因此,其具有与纸张相同的令人满意的对比度和观察角度,尤其是在明亮的阳光下。有源矩阵的快速发展直接提高了 EPD 的分辨率。EPD 的所有元素均可以被制作成柔性,实现可弯折甚至可卷曲显示。因此,EPD 被广泛应用于电子阅读器,可穿戴显示,电子指示牌等。但是,EPD 的响应时间较长,通常需要数百微秒,这在一定程度上限制了其在动画或视频显示中的应用。另外,由于很难精确控制电荷颗粒,EPD 的灰度与常规的 LCD 相比较差。因此,目前的 EPD 的研究领域,有大量关于增强色域的研究,以扩展其应用场景。

现在主流的电泳显示技术有两种,微胶囊电泳显示^[23-26]和微杯电泳^[27-30]显示。两种技术均有优缺点,本节将进行详细介绍。

4.1 微胶囊电泳显示

在 EPD 中,颗粒和电极直接接触会引起颗粒

团聚,而颗粒团聚和万有引力作用会引起横向漂移问题。为了解决这一难题,将悬浮在液体中的颗粒包裹在一个微小的胶囊中,微胶囊大小约为几十个微米,形成微胶囊 EPD。微胶囊 EPD 可以提高显示可靠性,同时,由于实现了微胶囊化的电泳材料在基体上的直接涂覆,因而具有潜在的灵活性。图 8 是微胶囊 EPD 的显示原理图。使用带有相反电荷的白色和黑色颜料,施加电压使带电的白色或黑色颜料到顶部电极,即实现白色或黑色显示。每个施加到胶囊上的电压被分成两部分,白色和黑色颗粒的混合可以实现不同的灰

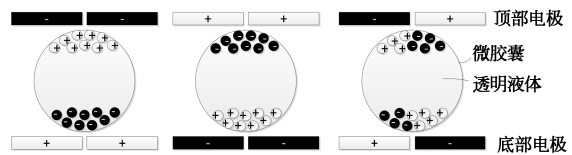


图 8 微胶囊电泳显示原理图。(a)上部电极为阴极,下部电极为阳极;(b)上部电极为阳极,下部电极为阴极;(c)阴阳电极交叉分布。

Fig.8 Schematic diagram of the microcapsules EPD. (a) Top electrode is the cathode and bottom electrode is the anode; (b) Top electrode is the anode and bottom electrode is the cathode; (c) Anode and cathode is arranged in order.

度等级。若在微胶囊上增加彩色滤光膜,通过彩色滤光膜的反射光即可实现彩色的微胶囊 EPD。

微胶囊电泳显示采用黑白双粒子,因而其光反射率较佳(35%~40%),更贴近真正的纸张,阅读体验佳。缺点是机械性能差,不够坚韧,因而无法承受重压。

4.2 微杯电泳显示

微杯电泳显示使用光刻或压印技术制作,直径 50~180 μm 不等,直径、高度、宽度根据具体的应用进行设计。微杯的一个优异特点是可以使用 Roll-To-Roll(R2R)工艺制作,很容易地将图案印到柔性基板上,使用 R2R 制程可实现大批量生产,生产成本较低;而微胶囊电泳显示由于不够坚固,无法以压印方式生产,只能使用喷墨方式,成本更高。此外,微杯 EPD 可以使用生色流体或 3 种颜料墨水系统制作,由于不需要使用彩色滤光片,因而,彩色微杯电泳显示的反射率相当高。

5 结 论

近些年来,反射类显示得到稳步发展。最主要的原因是发射和透射类显示的功耗极高,限制了其在户外环境中的使用;另外一个主要的原因是阳光下的易读性,即使功耗不是一个问题,常规

显示仍然不能保证在高照度条件下易读性。反射类显示,具有类纸类显示、视频显示、高亮高色域等功能,若能兼容常规液晶显示工厂的工艺制作,将有利于反射类显示的进一步推广与应用。未来的努力方向将集中于反射类显示的商业引入及扩大规模。同时,改善特性,引入革新的显示结构,开发长期的技术路线工作将会持续进行。

参 考 文 献:

- [1] KMETZ A R. A single-polarizer twisted nematic display [J]. *Proceedings of The SID*, 1980, 21(2): 63-65.
- [2] 凌志华. STN-LCD 技术的发展 [J]. *液晶与显示*, 2002, 17(4): 233-242.
LING Z H. Progress of STN-LCD technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2002, 17(4): 233-242. (in Chinese)
- [3] HEILMEIER G H, ZANONI L A. Guest-host interactions in nematic liquid crystals. A new electro-optic effect [J]. *Applied Physics Letters*, 1968, 13(3): 91-92.
- [4] HUANG K C, LEE Y H, LEE W. Reflective displays based on dye-doped bistable chiral-tilted homeotropic nematics [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2015, 617(1): 100-106.
- [5] HWANG G. The improvement of polymerization characteristics for reflective dye-doped polymer dispersed liquid crystal (PDLC) display [J]. *Advanced Science Letters*, 2012, 18(1): 225-229.
- [6] LIN Y H, YANG C M, LIN Y R, *et al.* Reflective type polarizer-free flexible displays using dye-doped nematic liquid crystal gels [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2008, 39(1): 1830-1832.
- [7] CHEN H S, CHIANG T H, WU C H, *et al.* A reflective polarizer-free display using dye-doped polymer-stabilized blue phase liquid crystals [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 1667-1670.
- [8] WEST J L. Polymer-dispersed liquid crystals [J]. *ACS Symposium Series*, 2014, 435: 475-495.
- [9] VARANYTSIA A, CHIEN L C. Bimesogen-enhanced flexoelectro-optic behavior of polymer stabilized cholesteric liquid crystal [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(1): 014502.
- [10] CHEN J W, KUO Y Y, WANG C R, *et al.* The formation of supramolecular liquid-crystal gels for enhancing the electro-optical properties of twisted nematic liquid crystals [J]. *Organic Electronics*, 2015, 27: 24-28.
- [11] TAO D, YAO L S, CHIGRINOV V, *et al.* Single cell gap single mode TN transfective liquid crystal display [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2010, 41(1): 1794-1795.
- [12] LI Y W, FAN-CHIANG K H, WANG C T, *et al.* Fast-response reflective TN mode with enhanced contrast and reflectance [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2010, 41(1): 1720-1723.
- [13] BENI G, CRAIGHEAD H G, HACKWOOD S. Refractive index switchable display cell; US, US4411495A [P]. 1983-10-25.
- [14] 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.
SUN Z W, XIE E Q, HAN W H, *et al.* Progress of electrowetting [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(3): 387-392. (in Chinese)
- [15] PARK D J, KWON S G, YANG J S, *et al.* Electrowetting display device and manufacturing method thereof [J]. 2016, 22(3): 401-405.
- [16] YI Z C, SHUI L L, WANG L, *et al.* A novel driver for active matrix electrowetting displays [J]. *Display*, 2015, 37: 86-93.
- [17] ROGHAI R I, MUSTERD M, VAN DEN ENDE D, *et al.* A numerical technique to simulate display pixels based on electrowetting [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2015, 19(2): 465-482.
- [18] LO K L, TSAI Y H, CHENG W Y, *et al.* Recent development of transparent electrowetting display [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2013, 44(1): 123-126.

- [19] CHARIPAR K M, CHARIPAR N A, BELLEMARE J V, *et al.* Electrowetting displays utilizing bistable, multi-color pixels via laser processing [J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(2): 175-182.
- [20] RAWERTJ, JEROSCH D, BLANKENBACH K, *et al.* Bistable D³ electrowetting display products and applications [J]. *SID Symposium Digest of Technical Paper*, 2010, 41(1): 199-202.
- [21] ZHAO Q, TANG B, BAI P F, *et al.* Dynamic simulation of bistable electrofluidic device based on a combined design of electrode and wettability patterning [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, 26(1): 27-35.
- [22] BLANKENBACH K, JENTSCH M, BITMAN A, *et al.* Recent improvements for applications of droplet-driven electrowetting displays [D³] [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2009, 40(1): 475-478.
- [23] SONG J S, KIM Y C. Evaluation of driving properties by cell-gap difference of single particle-microcapsule type electronic paper [J]. *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, 2015, 28(8): 518-523.
- [24] CHEN S H, WANG S R, BIAN S G, *et al.* Improved preparation technology of Urea formaldehyde microcapsules used in electrophoretic display [J]. *Advanced Materials Research*, 2009, 79-82: 381-384.
- [25] SONG J K, KANG H C, KIM K S, *et al.* Microcapsules by complex coacervation for electronic ink [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2007, 464(1): 263/[845]-269/[851].
- [26] 李国相, 孟舒献, 冯亚青. 彩色双粒子微胶囊电泳显示的研究进展[J]. 化工进展, 2015, 34(S1): 131-136.
- LI G X, MENG S X, FENG Y Q. Research Progress of color particles microcapsulated electrophoretic display [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, 34(S1): 131-136.
- [27] HUANG Y P, LIN F C, WU S I, *et al.* Mechanism and improvement of charged-particles transition in microcup electrophoretic displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2013, 9(8): 619-625.
- [28] LU Y H, TIEN C H. Colorimetric characterization of monochromatic microcup[®] electrophoretic display [J]. *SID Symposium Digest of Technical Paper*, 2011, 42(1): 1548-1551.
- [29] SPRAGUE R A. Active matrix displays for ereaders using microcup electrophoretics [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 365-368.
- [30] WU S I, LIN F C, HUANG Y P, *et al.* Electrokinetics of charged-particles in microcup electrophoretic displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 1559-1562.

作者简介:



卜倩倩(1986—),女,河南开封人,2012年于兰州大学获得硕士学位,主要从事显示及传感方面的研究工作。E-mail: buqianqian@boe.com.cn