



压电印刷OLED优化及其应用

赵杰, 陈楠泓, 陈俊龙, 李牧云, 钟锦耀, 杨跃鑫, 符晓, 姚日晖, 宁洪龙, 彭俊彪

引用本文:

赵杰, 陈楠泓, 陈俊龙, 等. 压电印刷OLED优化及其应用[J]. 液晶与显示, 2021, 36(10): 1377–1387.

ZHAO Jie, CHEN Nan-hong, CHEN Jun-long, et al. Optimization and application of piezoelectric printing OLED[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(10): 1377–1387.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0179>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

喷墨打印钙钛矿光电器件的研究进展

Research progress of inkjet printed perovskite optoelectronic devices

液晶与显示. 2021, 36(1): 158–175 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0262>

原子层沉积方法制备低温多层Al₂O₃/TiO₂复合封装薄膜的研究

Low-temperature multi-layer Al₂O₃/TiO₂ composite encapsulation thin film by atomic layer deposition

液晶与显示. 2016, 31(6): 532–539 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163106.0532>

面板过孔设计对聚酰亚胺液扩散的影响

Effect of panel via hole design on diffusion of polyimide solution

液晶与显示. 2020, 35(4): 321–327 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203504.0321>

基于印刷双层电极的氧化物薄膜晶体管

Oxide thin-film transistors based on printed double-layer electrodes

液晶与显示. 2021, 36(9): 1239–1246 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0116>

显示技术比较及新进展

New developments and comparisons in display technology

液晶与显示. 2018, 33(1): 74–84 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183301.0074>

文章编号:1007-2780(2021)10-1377-11

压电印刷 OLED 优化及其应用

赵 杰, 陈楠泓, 陈俊龙, 李牧云, 钟锦耀, 杨跃鑫,

符 晓, 姚日晖*, 宁洪龙, 彭俊彪

(华南理工大学 发光材料与器件国家重点实验室,

高分子光电材料与器件研究所, 广东 广州 510641)

摘要:有机电致发光显示器(OLED)因具备低功耗、自发光、高柔性、色彩丰富和响应速度快等优势,被认为是未来显示的发展方向。随着压电喷墨打印的无接触、液滴精准定位和大面积快速印制等技术的引入,使得大尺寸 OLED 的量产应用成为可能。印刷喷射过程中的液滴均匀性对高质量 OLED 功能层的形成起着至关重要的作用,为此,本文综述了压电印刷 OLED 性能优化方法,主要从脉冲波形的优化、控制系统的自修复和油墨的流变特性调控来进一步提升液滴喷射性能,并进一步列举了压电印刷 OLED 在显示与照明领域中的应用。

关键词:压电喷墨;印刷 OLED;脉冲波形;液滴喷射;流变

中图分类号:TN383+.1; TH879 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2021-0179

Optimization and application of piezoelectric printing OLED

ZHAO Jie, CHEN Nan-hong, CHEN Jun-long, LI Mu-yun, ZHONG Jin-yao,

YANG Yue-xin, FU Xiao, YAO Ri-hui*, NING Hong-long, PENG Jun-biao

(State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices,

Institute of Polymer Optoelectronic Materials and Devices,

South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Organic electroluminescent display (OLED) is considered to be the development direction of

收稿日期:2021-07-06; **修订日期:**2021-07-31.

基金项目:广东省重点领域研发计划(No.2020B010183002);国家自然科学基金(No. 62074059, No.22090024);广东省基础与应用基础研究重大项目(No.2019B030302007);中央高校基本科研业务费专项资金(No.2020ZYGXZR060);华南理工大学百步梯攀登计划研究项目(No.j2tw2021020001);2021 年广东大学生科技创新培育专项资金“攀登计划”专项资金(No.pdjh2021b0036);季华实验室自主立项项目(No.X190221TF191)

Supported by Key Research and Development Program of Guangdong Province (2020B010183002); National Natural Science Foundation of China (No.62074059, No.22090024); Basic and Applied Basic Research Project of Guangdong Province (No.2019B030302007); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2020ZYGXZR060); Research Project of Hundred Step Ladder Climbing Program of South China University of Technology (No.J2TW2021020001); Science and Technology Innovation and Cultivation Fund for Guangdong University Students in 2021 (No. PDJH2021B0036); Project Independently Established by Ji Hua Laboratory (No.X190221TF191)

* 通信联系人, E-mail: yaorihui@scut.edu.cn

future display due to its advantages of low power consumption, self-luminescence, high flexibility, rich colors and fast response speed. With the introduction of technologies such as piezoelectric inkjet printing, such as non-contact, precise positioning of droplets, and large-area fast printing, mass production applications of large-size OLEDs have become possible. The uniformity of droplets in the printing and jetting process plays a vital role in the formation of high-quality OLED functional layers. For this reason, this paper reviews the performance optimization methods of piezoelectric printing OLED, mainly from the optimization of pulse waveform, self-healing control system and rheological characteristics of the ink to further improve the droplet injection performance, and further cited the application of piezoelectric printing OLED in the display and lighting fields.

Key words: piezoelectric inkjet; printing OLED; pulse waveform; droplet injection; rheological

1 引言

目前,小尺寸有机电致发光显示器(OLED)基本采用真空蒸镀方法沉积小分子功能材料,通过多种加热方法(电子束轰击加热、激光加热等),将功能材料蒸发至分子或原子级别,最终附着于基板上形成高质量薄膜^[1]。在真空镀膜过程中,绝大多数的 OLED 显示器件都需要用到精细化金属掩膜版(FMM),用以实现全彩显示屏的制备。但是受限于大尺寸 FMM 生产成本、产能限制、金属形变特性和像素对位精度难以把控等问题,目前的 FMM 技术只能应用于小尺寸移动端显示屏的量产工艺中。一些厂商为了克服以上缺陷,曾提出“白光 OLED+彩色滤光片”的互补制程工艺^[2],但此种工艺与传统 LCD 技术相比不具备成本优势,而与全彩 OLED 相比又不具备器件性能优势(对比度、亮度、色域宽度等)。随着溶液化湿法制备工艺的快速发展,目前在大尺寸面板制造领域,主要采用旋涂、有版印刷和喷墨印刷等技术来实现。其中,喷墨打印因具备超高的材料利用率、无接触化特征、高精度的液滴形态可控性、低成本和快速高效等优势,使得喷墨打印逐渐成为大尺寸 OLED 生产工艺中理想的制备技术之一。

喷墨打印按照油墨喷射方式的不同可以分为按需式喷墨和连续式喷墨,按需喷墨因具备按需滴注和频率可控的优点而被广泛应用于印刷 OLED 中。目前的按需喷墨技术主要包括热膨胀式和压电式,为了在印刷 OLED 制程中尽可能保证有机材料的物化稳定性,避免油墨因受温度影响而发生改性,主流的印刷工艺基本采用压

电式^[3-7]。

目前在大批量快速印制有机发光层(EML)和空穴传输层(HTL)时,通过外加激励脉冲电压的精准时序控制,并结合上千个喷嘴的多喷头阵列化排布,可以实现大面积基板的区域化快速印刷。但在实际的膜层制备过程中,因压电元件老化、颗粒物堵塞喷嘴、喷头制造工艺误差、流道内的气泡积蓄和设备抖动等问题而导致液滴喷射的不均匀,极易使前后印刷像素坑内的油墨实际填充量有差异^[8],最终导致沉积的功能层薄膜厚度和密度不一,出现面板点亮后的亮度不均匀和“Mura”现象^[9]。因此,必须进一步提升印刷 OLED 制程中的液滴喷射均匀性。

2 压电印刷 OLED 优化

经过国内外研究人员的不懈努力和多年的技术沉淀,目前压电印刷 OLED 工艺稳定性虽取得了较大的进步,但是仍存在一些影响液滴均匀喷射机制方面的难题,没有完全掌握,导致喷射液滴均匀性、液滴生产速度和定位精度等方面受限,并最终导致印刷 OLED 功能层不均匀和性能低下。例如喷头腔室内的气泡和油墨残余振动导致的低频喷射特性改变、高速喷射下的卫星滴和彗尾现象、喷头材料压电特性的不稳定导致的聚合物有机油墨喷射困难问题等^[10-12]。为了获得良好的液滴喷射性能,并提供尺寸更小、定位精度更高的液滴,目前的研究主要从脉冲波形的优化、控制系统的自修复和油墨的流变特性调控 3 个方面来实现。

2.1 脉冲波形的优化

通过调制脉冲波形达到最佳的液滴喷射效果

是目前压电印刷 OLED 功能层中较常用的优化方法,早期采用的驱动波形主要是单极性梯形波,也被称为标准脉冲,但是由于无法抑制的残余振动问题,逐渐衍生出了更为复杂的双极性脉冲波,例如锯齿型、正弦和双梯等,见图 1^[13]。为进一步获得最佳的脉冲波形,可以调节上升时间、驻留时间、下降时间、调谐时间、脉冲频率、正压幅值和回波幅值等,具体可以通过实验分析和数值模拟方法来实现。

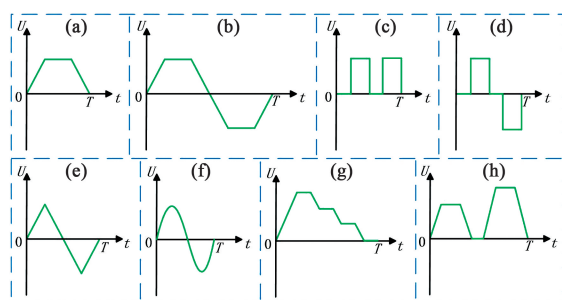


图 1 压电喷墨打印的典型脉冲波形。(a)单梯;(b)双梯;(c)单方波;(d)双方波;(e)锯齿波;(f)正弦波;(g)阶梯波;(h)M型波。

Fig.1 Typical pulse waveform of piezoelectric inkjet printing. (a) Single ladder; (b) Double ladder; (c) Single waveform; (d) Double waveform; (e) Sawtooth waveform; (f) Sine waveform; (g) Step waveform; (h) M-shaped waveform.

通过在实验中实时监测下落液滴的喷射速度、体积、均匀性和生成速率等参数,并反复修改驱动脉冲,比较分析修改前后的喷射差异,从而得出优化后的波形参数。2019 年,Amruth 等人利用优化后的电压波形获取了稳定喷射的液滴,见图 2,印刷了适合 OLED 的高质量薄膜^[14],并在同年印刷制备了电流效率为 $18 \text{ cd} \cdot \text{A}^{-1}$ 、亮度为 $6900 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 的绿色 OLED^[15]。2021 年,Cao 等人通过反复调节多喷嘴的驱动波形和喷射频率,将前后喷射的液滴体积偏差控制在了 5% 左右,并进一步制备了单色 OLED 器件^[16]。2017 年,Chang 等人对弯液面的伸缩过程进行了放大成像,并由喷头处的声压时域响应获取了脉冲最佳驻留时间^[17]。2020 年,Kang 等人对不同频率下的下落液滴进行了分析,证明液滴尾流场会降低后喷射液滴的下降阻力^[18]。2021 年,Jiao 等人对喷嘴处液滴的形成过程进行了观测,证明液滴

的速度和直径与电压幅值成正相关,过高的喷射频率会引起液滴聚集现象^[19]。

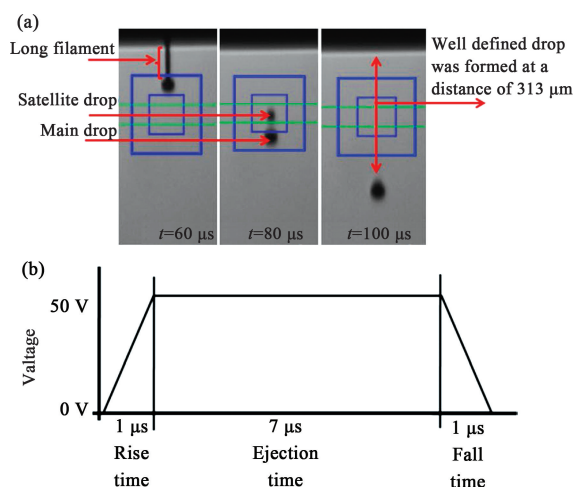


图 2 (a)不同时间段的液滴喷射图像;(b)压电驱动波形^[14]。

Fig.2 (a) Droplet jet images in different time periods; (b) Piezoelectric driving waveform^[14].

虽然可通过具体的实验分析来确保脉冲参数的准确性,但这需要高精度的测量设备和重复的机械对位校准,因此有必要提出一种高效率的波形优化方法。数值模拟分析因具备低成本、高效迅速和重复性高等特点,而被大量用于印刷 OLED 液滴喷射性能的研究中。2017 年,Wei 等人提出了一种基于数值模拟的高密度喷嘴排布的打印头波形设计方法,获取了高质量喷射的最佳波形^[20]。2019 年,Wang 等人对压电驱动的单液滴进行了数值模拟,发现正压幅值和回波幅值的升高会导致墨滴速度和半径的增大^[21]。2020 年,Shah 等人通过集总元素模型(LEM)分析了流道内压力记录,证明了无调谐时间的双极脉冲对残余振动的抑制效果最好,见图 3^[22]。2020 年,Aqeel 等人通过多相流求解器,发现双极脉冲比单极脉冲驱动喷射的液滴体积更小^[23]。

综合以上研究可以看出,在压电印刷 OLED 的过程中,大多采用双极类脉冲信号来驱动喷射,可以有效抑制残余振动和卫星滴的产生;根据不同类型的印刷 OLED 基板及不同尺寸的像素坑,合理设置脉冲幅值及喷射频率,可以控制主液滴大小及均匀性;通过调节单周期脉冲波形中各波

段的持续时间,可以快速稳定液滴形成初期的形貌,为实现更高频率的喷射及大面积快速印刷提

供了可能,压电印刷 OLED 中常用驱动波形的参数范围见表 1。

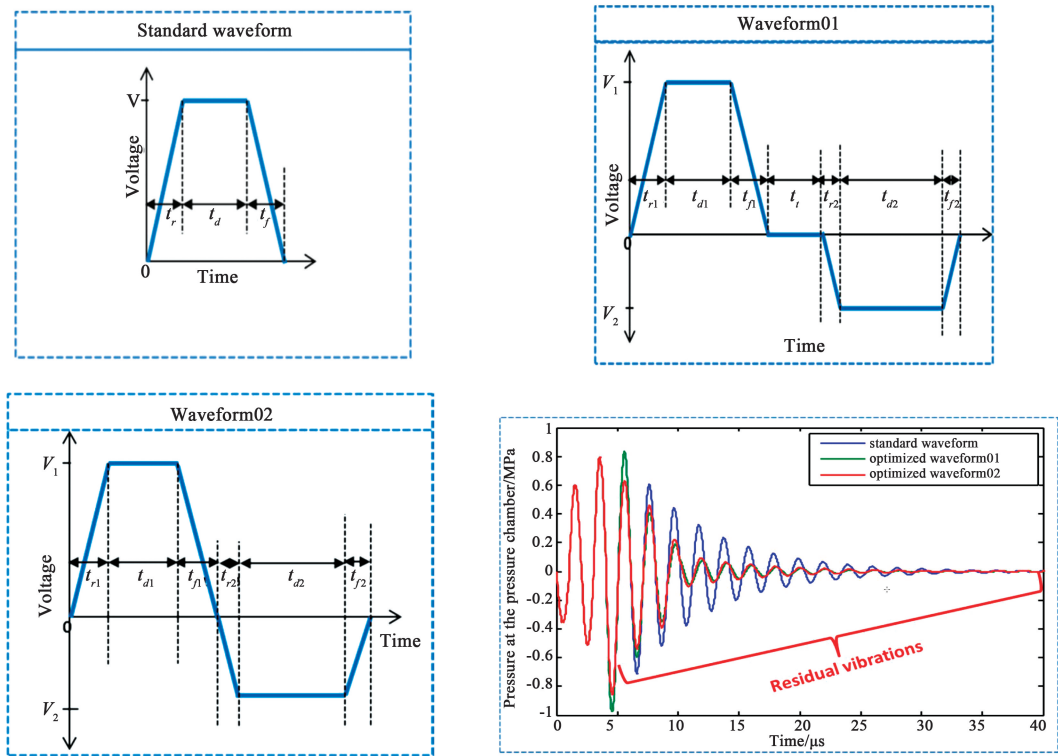


图 3 单极波、有调谐时间双极波、无调谐时间双极波及 3 种波形对残余振动的影响^[22]。

Fig. 3 Influence of unipolar waveform, tuning-time bipolar waveform and untuning-time bipolar waveform on residual vibration^[22].

表 1 常用压电驱动波形的参数范围

Tab.1 Parameter range of commonly used piezoelectric drive waveforms

波形参数	单极梯形波	双极梯形波	阶梯波	单极方波
上升时间/ μs	1~3	1~3	1~5	无
驻留时间/ μs	3~10	3~10	5~15	1~20
下降时间/ μs	1~3	1~3	分级递减	无
回波信号	无	参考正脉冲	无	无
喷射频率/kHz	<10	<30	<5	<5
卫星滴抑制效果	较差	极好	较好	极差

2.2 控制系统的自修复

实验分析和数值模拟是对最终的液滴喷射现象进行反复观察与统计,并不断地人为调整输入驱动参数,以多次的重复测试为手段达到最佳喷射效果的方法。测试过程中会因测试人员和测试方法的不同而带来较大的测试误差,

若能从软硬件系统和控制算法的角度建立一套实时控制修复系统,在喷射的过程中自动调节系统参数,这将极大提高印刷 OLED 液滴喷射的优化效率和精度。2006 年,Bale 等人提出采用高规格空气轴承,并对印刷图像进行系统线性校正,可进一步减小印刷 OLED 中的射流偏

差^[24]。2012 年, Bruner 等人采用多误差源隔离分析方法, 在打印机端设计了误差补偿算法, 从而提高了印刷 OLED 液滴落点精度^[25]。2012 年, Khalate 等人提出一种有效抑制油墨残余振动的前馈控制方法, 可有效提升液滴喷射频率^[26-27]。2011 年, Ezzeldin 等人采用了一种模型预测进程控制方法, 可抑制墨通道内的残余振动并使流道间串扰效应最小化^[28]。2014 年, Chen 等人提出了一种基于小波神经网络的智能控制算法, 并通过具体的液滴喷射实验证明了该算法的可行性^[29]。2017 年, Zhan 等人设计了一种基于 PID 的供墨控制方法, 减少了印刷过程中的卫星滴和彗尾现象^[30]。2019 年, Wang 等人利用闭环测量电路提高了长时间喷射的液滴均匀性, 控制过程见图 4^[31]。

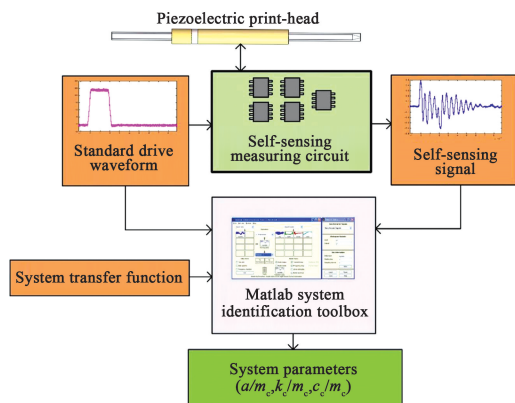


图 4 控制系统参数识别过程^[31]

Fig.4 Control system parameter identification process^[31]

2.3 油墨的流变特性调控

通过实验分析的经验归纳、数值模拟的参数优化和控制系统的自修复等方法可以提升压电印刷 OLED 的喷射性能, 但墨滴的形貌稳定性和分散均匀性更多的是由印刷油墨的物理特性和流变特征所决定, 墨水成分的任何波动都可能改变流体的物理特性, 必须严格控制油墨密度、表面张力、粘弹性和 PH 值等参数, 并进一步探究油墨在通道中、喷嘴处和下落空中的动态流动特征。在分析印刷 OLED 过程中的液滴形成和喷射特性时, 使用流体力学中的无量纲数来表征喷墨喷嘴的设计参数和油墨特性是一种非常有效的方法。无量纲数主要包括雷诺数 Re (惯性力与粘性力之比)、韦伯数 We (惯性力与表面张力之比)、毛细

管数 Ca (粘性力与表面张力之比) 和 Z 数 (描述雷诺数和韦伯数之间的平衡), 各参数的定义式如下:

$$Re = \frac{\text{惯性力}}{\text{粘性力}} = \frac{\rho v^2 d^2}{\mu v d} = \frac{\rho v d}{\mu}, \quad (1)$$

$$We = \frac{\text{惯性力}}{\text{表面张力}} = \frac{\rho v^2 d^2}{\gamma d} = \frac{\rho v^2 d}{\gamma}, \quad (2)$$

$$Ca = \frac{\text{粘性力}}{\text{表面张力}} = \frac{\mu v d}{\gamma d} = \frac{\mu v}{\gamma}, \quad (3)$$

$$Z = \frac{1}{Oh} = \frac{Re}{\sqrt{We}} = \frac{\sqrt{\text{惯性力}} \sqrt{\text{表面张力}}}{\text{粘性力}} = \frac{\sqrt{\rho v^2 d^2} \sqrt{\gamma d}}{\mu v d} = \frac{\sqrt{\gamma \rho d}}{\mu}, \quad (4)$$

其中: ρ 、 v 、 μ 、 γ 分别是油墨液滴的密度、速度、粘度和表面张力; d 为特征长度, 通常是喷嘴或墨滴的直径; Z 表示惯性力的平方根和表面张力的平方根之积与粘性力的比值, 化简后的公式仅反映液体的物理性质和液滴的大小比例, 与喷嘴处的射流状态密切相关; 各无量纲数参考范围见图 5^[32]。

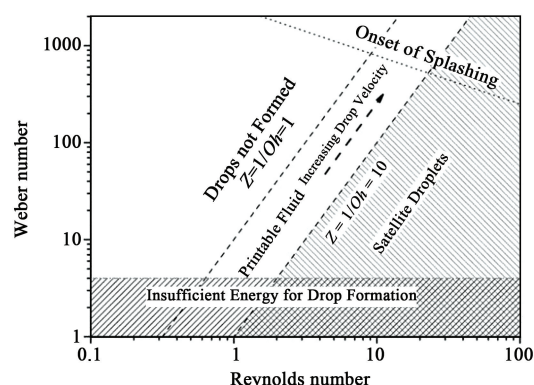


图 5 由无量纲数定义的印刷流体适用范围及可打印条件^[32]

Fig.5 Scope and conditions for printing inks defined by dimensionless numbers^[32]

目前已有诸多研究将以上参数用于压电印刷 OLED 中的油墨分析, 并进一步配制出满足无量纲数适用范围的印刷油墨, 实现了液滴喷射性能的提升。2017 年, Zhou 等人利用 Z 数理论比较了 4 种溶剂所成油墨的液滴喷射效果, 见图 6(a), 并通过含有环己酮溶剂的油墨印刷了蓝色 OLED 图案, 见图 6(b)^[33]。2019 年, Lin 等人配置了符合 Z 数适用范围的有机油墨, 并进一步印刷了 HTL 和 EML^[34]。2017 年, Olivier 等人通

过添加不同性质的溶剂来改变油墨的流变特性,并压电印刷制备了绿色顶发射 OLED 器件^[35]。2008 年,Castrejón-Pita 等人通过调整雷诺数和韦伯数的范围,最终实现了液滴喷射速度的恒定控制^[36]。2019 年,Yus 等人制成了具有合适的粘度、表面张力和 Z 值的油墨,并进一步印刷了电极^[37]。2020 年,Kang 等人绘制了油墨粘度、表面张力与 Oh 值、 Z 值的关系曲线,并以此来减少卫星滴的产生^[38]。参考以往学者所做的压电印刷 OLED 研究,当 Z 值处于 1~10 的范围内时,可形成均匀性良好的喷射液滴;而当 Z 值小于 1 时,粘性耗散作用会增加,阻碍液滴的形成;当 Z 值大于 10 时,会形成较多的卫星滴。因此,可通过调整油墨粘度和表面张力的方法,使 Z 值处于合适的范围内,以形成稳定喷射的液滴。目前用于印刷 OLED 中的油墨,粘度普遍在 $0.30 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 以下,表面张力在 $60 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 以下。在喷头加热的条件下,油墨的最大粘度可升至 $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

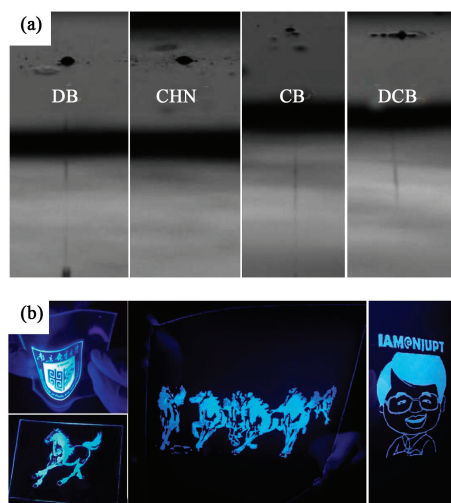


图 6 (a)PFP-3 分别与 4 种溶剂互溶后的油墨液滴喷射过程;(b)印刷蓝色 OLED 图案^[33]。

Fig.6 (a) Ink droplet injection process after PFP-3 is intersoluble with four solvents respectively; (b) Printing blue OLED pattern^[33].

3 压电印刷 OLED 应用

近年来,OLED 以其优异的器件性能和可折叠性逐渐成为显示与照明领域的重点技术发展方向^[39],各大厂商纷纷加快印刷 OLED 进程布局,使新材料和新工艺取得了突破性进展。例如,在

显示面板领域,TCL 华星计划在广州建立 8.5 代可卷绕 OLED 生产线;LGD 计划建立 10.5 代 WOLED 生产线;JOLED 已实现印刷 OLED 量产出货等。随着印刷显示工艺稳定性的逐步提升,传统照明领域也迎来了一次新的变革,相比于主流的 LED 照明技术,OLED 具备高亮度、轻薄性、可挠曲和高光效的特点,在传统照明与灯具设计领域引出了一个新概念。

3.1 印刷 OLED 显示

OLED 凭借主动发光、快速响应、低压驱动、宽视角、广色域、低能耗、高对比度和重塑性好等优势,已经成为当下的主流显示技术^[40]。截至目前,绝大部分的小尺寸 OLED 都是采用真空蒸镀制备而成,在高端旗舰手机屏幕市场中 OLED 已成主导地位。但在大尺寸的电视屏幕市场中,因蒸镀技术中高昂的生产成本和设备的产能限制,阻碍了 OLED 的进一步发展,始终无法与传统的液晶显示器(LCD)形成市场竞争优势。不过随着压电印刷工艺的完善,尺寸更大、分辨率更高和价格更低的 OLED 电视屏幕的量产成为了可能。

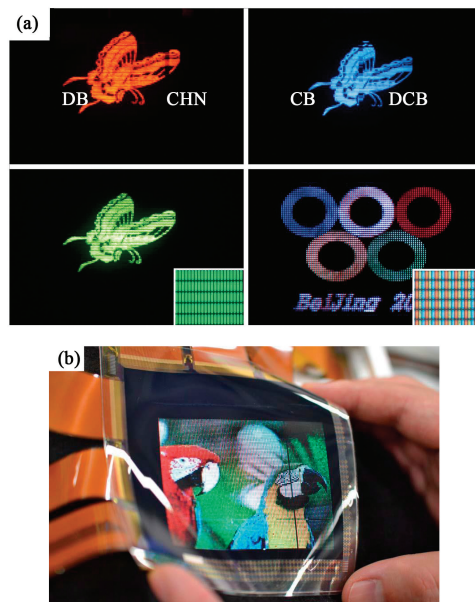


图 7 (a)全溶液工艺压电印刷 OLED 显示屏^[43]; (b) 基于压电印刷 OTFT 驱动的柔性 OLED^[46]。

Fig.7 (a) All-solution process piezoelectric printed OLED display^[43]; (b) Flexible OLED driven by piezoelectric printing OTFT^[46].

2008 年, Sonoyama 等人压电印刷制备了绿色 OLED 器件, 其在 $2\,000\text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 的亮度下具有 $22\text{ cd} \cdot \text{A}^{-1}$ 的发光效率^[41]。2012 年, Jung 等人利用压电喷墨打印制备了 RGB 磷光 OLED 像素阵列^[42]。2013 年, Zheng 等人通过压电打印方法实现了 OLED 显示屏的全溶液工艺制备, 其显示图案见图 7(a)^[43]。2016 年, Verma 等人通过压电喷墨制备了一种铜配合物 TADF-OLED, 该器件具有 $45\text{ cd} \cdot \text{A}^{-1}$ 的电流效率和 13.9% 的内量子效率^[44]。2017 年, Song 等人通过压电喷墨刻蚀工艺制备了微沟槽结构, 并进一步在微槽上成功制作了像素化 OLED^[45]。2017 年, Mizukami 等人制作了一种基于压电印刷 OTFT 驱动的柔性 OLED 显示器件, 见图 7(b)^[46]。2018 年, Bail 等人通过压电喷墨打印制备了蓝光 OLED, 其功率效率达到了同级别旋涂 EML 的 68%^[47]。2019 年, Zhao 等人在 SID 研讨会上展示了压电印刷制备的高分辨率 (402 ppi) 柔性 OLED 显示屏^[48]。同年, Kang 等人压电印刷了磷光有机发光二极管, 该印刷器件效率达到了旋涂工艺的 84%^[49]。2020 年, Zheng 等人通过压电印刷的 EML 进一步制备了高效蓝色 OLED 阵列器件^[50]。

3.2 印刷 OLED 照明

自 2008 年欧司朗推出第一款 OLED 照明产品以来, OLED 因其逐渐成熟的制程工艺和优良的器件固有属性, 在目前的照明技术领域迎来了一次新的变革^[51-52]。与 LED 光源相比, OLED 具备面发光、高显色指数、无蓝害、低能耗、无眩光、轻薄可挠和低压安全驱动等特点; 同时还可将 WOLED 与滤光片相结合, 实现全色显示^[53]; 配合不同类型的基板, 可制备出半透明、柔性可贴敷和任意造型的灯具, 颠覆人们对照明产品的固有印象^[54]。由于以上优点, OLED 光源在室内照明、医疗照明和车载照明等应用领域拥有无可比拟的优势^[55]。

目前 OLED 在工艺上普遍采用真空蒸镀方式, 受限于良率和成本, OLED 照明产品还处于导入阶段。不过随着压电印刷技术的引入及成熟, 将进一步推动 OLED 在普通照明领域中的应用。2013 年, Ki 等人使用聚合物磷光油墨, 压电印刷了无源矩阵 OLED 光源^[56]。2013 年, Shin 等人提出了一种基于压电印刷工艺的光输出耦合

效率改进技术, 使得制备出的 OLED 光源在亮度上提高了一倍^[57]。2016 年, Ye 等人制作了一种具有压电印刷混合电极的柔性 OLED 光源器件, 该光源具有 $10\,000\text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 最大亮度和 $12\text{ cd} \cdot \text{A}^{-1}$ 的电流效率^[58]。2017 年, Shu 等人压电印刷了一种无 ITO 的透明 OLED, 其发光亮度达到 $16\,000\text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[59]。2018 年, Mu 等人压电印刷制备了最大亮度为 $4\,357\text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 的 OLED 照明器件^[60]。2018 年, Jun 等人在 ITO 基板上压电印刷了具有均匀网格状辅助电极的 OLED 照明器件^[61]。

3.3 压电印刷 OLED 面临的问题

在实现压电印刷 OLED 量产应用的进程中, 存在一些亟待解决的问题。例如, 采用多喷头多喷嘴快速印刷大尺寸屏幕时, 受到喷头制造误差、油墨和印刷工艺等因素的影响, 难以控制不同喷嘴的液滴均一性, 造成像素坑内的油墨量差异。其次, 高速移动的喷头平台, 如何将 R、G、B 油墨精准地沉积至各自的像素坑中, 是进一步提高显示质量的关键因素^[62]。另外, 在印刷油墨的灌入和传输过程中, 极易引入气泡, 而气泡的存在会阻碍墨水流动和稳定出墨。同时, 受限于喷嘴尺寸, 喷射的液滴直径普遍大于 $20\text{ }\mu\text{m}$, 对于追求超高分辨率的小尺寸屏幕而言, 现阶段的压电印刷工艺有待改进^[63]。如何克服以上缺陷, 是压电印刷 OLED 技术进一步发展的关键。

4 结 论

为进一步提升压电印刷 OLED 制备工艺, 必须形成均匀稳定的喷射液滴。为了获得最佳的喷射性能, 可通过实验分析和数值模拟等手段优化驱动波形, 抑制残余振荡, 减少卫星滴和彗尾现象的产生。同时, 搭建自修复控制系统, 从软硬件系统和控制算法的角度自动监测喷射缺陷, 来迅速响应修复误差。但最重要的是要配制合适的印刷墨水, 以流体力学中的无量纲数适用范围为界限, 进一步通过温度调节和喷射过程的动态分析等方法, 来达到最佳的喷射性能。

压电印刷 OLED 在显示与照明领域拥有巨大的优势, 压电印刷技术是实现 OLED 大面积、低成本和高良率的有效途径。随着研发力度的增加和材料、工艺的突破, 可以预见, 在未来的显示

领域中,OLED 将会成为手机端、电视端、户外影视和车载屏幕等应用的最佳选择之一。除此之外,OLED 已成为半导体照明领域近年来的研究热点,在光源舒适度、能耗和外观设计等方面拥有

独特优势。未来有必要从寿命、光效、亮度和柔性化等角度进一步寻求突破;同时尽快摆脱 OLED 照明高价泥潭,这是未来 OLED 照明广泛应用于民用领域的关键之一。

参 考 文 献:

- [1] HU Y X, TONG L, XIA X, *et al.* Novel phosphorescent iridium(III) emitters for both vacuum-deposition and inkjet-printing of OLEDs with exceptionally high efficiency [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(14): 4178-4184.
- [2] MADIGAN C F, HAUF C R, BARKLEY L D, *et al.* Advancements in inkjet printing for OLED mass production [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2014, 45(1): 399-402.
- [3] NING H L, ZHOU S X, CAI W, *et al.* Fabrication of high-performance solution processed thin film transistors by introducing a buffer layer [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 504: 144360.
- [4] ZHU Z N, ZHANG J H, NING H L, *et al.* Binary solvent systems for piezoelectric printing crack-free PAM/ ZrO_x hybrid thin films through nanostructure modulation [J]. *Langmuir*, 2021, 37(19): 5979-5985.
- [5] 宁洪龙,朱镇南,蔡炜,等.喷墨打印中的界面润湿问题[J].材料导报,2019,33(19):3236-3241.
NING H L, ZHU Z N, CAI W, *et al.* Interfacial wetting in inkjet printing [J]. *Materials Review*, 2019, 33(19): 3236-3241. (in Chinese)
- [6] CHEN J Q, GAN L, PAN Z P, *et al.* A strategy toward realizing ultrashort channels and microstructures array by piezoelectric inkjet printing [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(11): 1515.
- [7] 宁洪龙,陶瑞强,姚日晖,等.绿色柔性喷墨打印银纳米墨水研究综述[J].材料导报,2018,32(17):2959-2968.
NING H L, TAO R Q, YAO R H, *et al.* A review on green and flexible silver nano-ink for inkjet printing [J]. *Materials Review*, 2018, 32(17): 2959-2968. (in Chinese)
- [8] CHESTERFEILD R J, FENNIMORE A, HLAING H, *et al.* Solution printing for OLED televisions [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 491-493.
- [9] SUN Y F, LI X J, XIAO J J. A cascaded Mura defect detection method based on mean shift and level set algorithm for active-matrix OLED display panel [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(1): 13-20.
- [10] NING H L, TAO R Q, FANG Z Q, *et al.* Direct patterning of silver electrodes with 2.4 μm channel length by piezoelectric inkjet printing [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, 487: 68-72.
- [11] NING H L, CHEN J Q, FANG Z Q, *et al.* Direct inkjet printing of silver source/drain electrodes on an amorphous InGaZnO layer for thin-film transistors [J]. *Materials*, 2017, 10(1): 51.
- [12] NING H L, DENG P M, YANG C G, *et al.* Inkjet printing satellite-free silver electrodes array in a-IGZO TFTs by regulating piezoelectric waveforms [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2018, 676(1): 36-43.
- [13] LI H Y, LIU J K, LI K, *et al.* Piezoelectric micro-jet devices: a review [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 297: 111552.
- [14] AMRUTH C, SZYMAŃSKI M Z, ŁUSZCZYŃSKA B, *et al.* Inkjet printing of super yellow: ink formulation, film optimization, OLEDs fabrication, and transient electroluminescence [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 8493.
- [15] AMRUTH C, ŁUSZCZYŃSKA B, SZYMANSKI M Z, *et al.* Inkjet printing of thermally activated delayed fluorescence (TADF) dendrimer for OLEDs applications [J]. *Organic Electronics*, 2019, 74: 218-227.
- [16] CAO X H, YE Y, LIU X, *et al.* Realization of uniform OLED pixels based on multi-nozzle by inkjet printing [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52(S1): 395-397.
- [17] CHANG J Q, LIU Y X, BO H. Effects of dwell time of excitation waveform on meniscus movements for a tubular piezoelectric print-head: experiments and model [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2017, 27(7): 075023.

- [18] KANG S H, KIM S, LIM J W, *et al.* Study on fall velocity of continuously ejected micro inkjet droplet [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, 34(8): 3311-3315.
- [19] JIAO T, LIAN Q, ZHAO T Z, *et al.* Influence of ink properties and voltage parameters on piezoelectric inkjet droplet formation [J]. *Applied Physics A*, 2021, 127(1): 11.
- [20] WEI H F, XIAO X L, YIN Z F, *et al.* A waveform design method for high DPI piezoelectric inkjet print-head based on numerical simulation [J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(12): 5365-5373.
- [21] WANG S K, ZHONG Y H, FANG H S. Deformation characteristics of a single droplet driven by a piezoelectric nozzle of the drop-on-demand inkjet system [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 869: 634-645.
- [22] SHAH M A, LEE D G, LEE B Y, *et al.* Actuating voltage waveform optimization of piezoelectric inkjet printhead for suppression of residual vibrations [J]. *Micromachines*, 2020, 11(10): 900.
- [23] AQEEL A B, MOHASAN M, LV P Y, *et al.* Effects of the actuation waveform on the drop size reduction in drop-on-demand inkjet printing [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2020, 36(5): 983-989.
- [24] BALE M, CARTER J C, CREIGHTON C J, *et al.* Ink-jet printing: the route to production of full-color P-OLED displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2006, 14(5): 453-459.
- [25] BRUNER S, XU D, PHILLIPS C. Drop landing accuracy improvements in inkjet printed OLED displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2007, 38(1): 1611-1612.
- [26] KHALATE A A, BOMBOIS X, BABUŠKA R, *et al.* Performance improvement of a drop-on-demand inkjet printhead using an optimization-based feedforward control method [J]. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(8): 771-781.
- [27] KHALATE A A, BOMBOIS X, SCORLETTI G, *et al.* A waveform design method for a piezo inkjet printhead based on robust feedforward control [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, 21(6): 1365-1374.
- [28] EZZELDIN M, WEILAND S, VAN DEN BOSCH P P J. Improving the printing quality of an inkjet printhead using MIMO model predictive control [C]//*Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Control Applications*. Denver: IEEE, 2011: 382-387.
- [29] CHEN H Y, LIANG J W. Piezoelectric-actuated drop-on-demand droplet generator control using adaptive wavelet neural network controller [J]. *Journal of Process Control*, 2014, 24(5): 578-585.
- [30] ZHAN H W, XU F, NI Z J. Fluid dynamic modeling and fuzzy proportional-integral-derivative-based ink-supply method for piezoelectric ink-jet printing [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(7): 1-17.
- [31] WANG J J, HUANG J, PENG J, *et al.* Piezoelectric print-head drive-waveform optimization method based on self-sensing [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 299: 111617.
- [32] DERBY B. Inkjet printing ceramics: from drops to solid [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, 31(14): 2543-2550.
- [33] ZHOU L, YANG L, YU M J, *et al.* Inkjet-printed small-molecule organic light-emitting diodes: halogen-free inks, printing optimization, and large-area patterning [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(46): 40533-40540.
- [34] LIN T, SUN X, HU Y X, *et al.* Blended host ink for solution processing high performance phosphorescent OLEDs [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 6845.
- [35] OLIVIER S, ISHOW E, DELLA-GATTA S M, *et al.* Inkjet deposition of a hole-transporting small molecule to realize a hybrid solution-evaporation green top-emitting OLED [J]. *Organic Electronics*, 2017, 49: 24-32.
- [36] CASTREJÓN-PITA J R, MARTIN G D, HOATH S D, *et al.* A simple large-scale droplet generator for studies of inkjet printing [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(7): 075108.
- [37] YUS J, GONZALEZ Z, SANCHEZ-HERENCIA A J, *et al.* Semiconductor water-based inks: miniaturized NiO pseudocapacitor electrodes by inkjet printing [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(9): 2908-2914.
- [38] KANG S H, KIM S, SOHN D K, *et al.* Analysis of drop-on-demand piezo inkjet performance [J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(2): 022007.
- [39] 刘迪莹,钟锦耀,唐彪,等.柔性印刷 OLED 研究进展[J].*液晶与显示*, 2021, 36(2): 217-228.

- LIU D X, ZHONG J Y, TANG B, *et al.* Research progress of flexible and printed OLED [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(2): 217-228. (in Chinese)
- [40] 文宏福, 钟锦耀, 符晓, 等. 印刷 OLED/QLED 材料研究进展 [J]. 数字印刷, 2021(1): 1-11.
- WEN H F, ZHONG J Y, FU X, *et al.* Research progress of materials for printed OLED and QLED [J]. *Digital Printing*, 2021(1): 1-11. (in Chinese)
- [41] SONOYAMA T, ITO M, SEKI S, *et al.* Ink-jet-printable phosphorescent organic light-emitting-diode devices [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2008, 16(12): 1229-1236.
- [42] JUNG S H, KIM J J, KIM H J. High performance inkjet printed phosphorescent organic light emitting diodes based on small molecules commonly used in vacuum processes [J]. *Thin Solid Films*, 2012, 520(23): 6954-6958.
- [43] ZHENG H, ZHENG Y N, LIU N L, *et al.* All-solution processed polymer light-emitting diode displays [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1971.
- [44] VERMA A, ZINK D M, FLÉCHON C, *et al.* Efficient, inkjet-printed TADF-OLEDs with an ultra-soluble NHetPHOS complex [J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(3): 191.
- [45] WANG J H, SONG C, ZHONG Z M, *et al.* In situ patterning of microgrooves via inkjet etching for a solution-processed OLED display [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(20): 5005-5009.
- [46] MIZUKAMI M, CHO S I, WATANABE K, *et al.* Flexible organic light-emitting diode displays driven by inkjet-printed high-mobility organic thin-film transistors [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2018, 39(1): 39-42.
- [47] BAIL R, HONG J Y, CHIN B D. Inkjet printing of blue phosphorescent light-emitting layer based on bis(3,5-di(9H-carbazol-9-yl))diphenylsilane [J]. *RSC Advances*, 2018, 8(20): 11191-11197.
- [48] ZHAO D J, HUANG W, DONG L W, *et al.* 5.5 inch full screen flexible high-resolution OLED display fabricated by ink jet printing method [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 945-948.
- [49] KANG Y J, BAIL R, LEE C W, *et al.* Inkjet printing of mixed-host emitting layer for electrophosphorescent organic light-emitting diodes [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(24): 21784-21794.
- [50] ZHENG X J, LIU Y, ZHU Y B, *et al.* Efficient inkjet-printed blue OLED with boosted charge transport using host doping for application in pixelated display [J]. *Optical Materials*, 2020, 101: 109755.
- [51] HE Z Y, WANG C Y, ZHAO J W, *et al.* Blue and white solution-processed TADF-OLEDs with over 20% EQE, low driving voltages and moderate efficiency decrease based on interfacial exciplex hosts [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(38): 11806-11812.
- [52] SU K, LI J, GE C, *et al.* Stackable luminescent device integrating blue light emitting diode with red organic light emitting diode [J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(4): 048504.
- [53] SALEHI A, FU X Y, SHIN D H, *et al.* Recent advances in OLED optical design [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(15): 1808803.
- [54] VERBOVEN I, DEFERME W. Printing of flexible light emitting devices: a review on different technologies and devices, printing technologies and state-of-the-art applications and future prospects [J]. *Progress in Materials Science*, 2021, 118: 100760.
- [55] LEE J H, CHEN C H, LEE P H, *et al.* Blue organic light-emitting diodes: current status, challenges, and future outlook [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(20): 5874-5888.
- [56] KI H C, KIM S H, KIM D G, *et al.* Printing method for organic light emitting device lighting [C]//*Proceedings of SPIE 8622, Organic Photonic Materials and Devices XV*. San Francisco: IEEE, 2013: 86221J.
- [57] SHIN S J, PARK T H, CHOI J H, *et al.* Improvement of light out-coupling in organic light-emitting diodes by printed nanosized random texture layer [J]. *Organic Electronics*, 2013, 14(1): 187-192.
- [58] TAO Y, LI J, LI K, *et al.* Inkjet-printed Ag grid combined with Ag nanowires to form a transparent hybrid electrode for organic electronics [J]. *Organic Electronics*, 2017, 41: 179-185.
- [59] SHU Z, BECKERT E, EBERHARDT R, *et al.* ITO-free, inkjet-printed transparent organic light-emitting diodes with a single inkjet-printed Al : ZnO : PEI interlayer for sensing applications [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(44): 11590-11597.

- [60] MU W Y, LIN T, HU Y X, *et al.* Double layer printed high performance OLED based on PEDOT : PSS/Ir (bt)₂acac:CDBP [J]. *AIP Advances*, 2018, 8(11): 115112.
- [61] YU J H, CHO K H, KANG K T, *et al.* Fabrication of auxiliary electrodes using Ag inkjet printing for OLED lighting [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 843-846.
- [62] XIONG J H, WU S T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications [J]. *eLight*, 2021, 1: 3.
- [63] HUANG Y G, HSIANG E L, DENG M Y, *et al.* Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 105.

作者简介:



赵 杰(1997—),男,安徽合肥人,硕士研究生,2020 年于安徽工业大学获得学士学位,主要从事印刷显示用压电喷墨沉积系统的研发。E-mail: zhao_jjie1997@163.com



姚日晖(1981—),男,湖南娄底人,博士,副教授,2008 年于中山大学获博士学位,主要从事印刷电子材料与器件方面的研究。E-mail: yaorihui@scut.edu.cn