

DOI: 10.13475/j.fzxb.20220606609

织物显示器件的研究进展

施翔^{1,2,3}, 王臻^{1,2,3}, 彭慧胜^{1,2,3}

(1. 复旦大学 高分子科学系, 上海 200438; 2. 复旦大学 聚合物分子工程国家重点实验室, 上海 200438;
3. 复旦大学 先进材料实验室, 上海 200438)

摘要 显示器件是电子设备不可或缺的人机交互平台, 其结构朝着轻量化、柔性化、集成化方向发展。为了实现显示功能与织物的集成, 同时保持织物的柔软、透气导湿、适应复杂形变等特性, 围绕与织物结构有效匹配的发光材料和器件设计, 综述了织物显示器件领域的发展, 阐述了被应用于织物显示的发光材料及其工作原理, 总结了平面、纤维和经纬交织3种织物显示器件的结构, 讨论了不同材料和结构对织物显示器件的发光和显示性能、柔性、稳定性的影响, 最后展望了织物显示技术的发展方向, 以期期为纺织和显示领域交叉融合发展提供理论和应用参考。

关键词 发光纤维; 显示织物; 发光材料; 显示器件; 柔性

中图分类号: TS 102.6; TN 383.1 文献标志码: A

人类从外界所获取的信息有80%来自于视觉, 显示设备作为人机交互的窗口, 推动了信息社会的发展^[1-3]。近年来, 随着5G、物联网、虚拟现实等新一代信息技术的发展, 传统电子设备的手持使用模式已难以满足人们与更大规模的信息高效、实时交互的需求, 主要的瓶颈在于显示设备仍未摆脱硬质、块状的传统形态。将显示器件制成轻薄、贴近人体的可穿戴设备, 被认为是解决这个问题的有效途径^[4-5], 因此, 理想的可穿戴显示器件需要贴合人体不规则表面, 与人体力学性能实现有效匹配, 在跟随人体发生三维扭曲的剧烈形变时保持良好的性能。此外, 新型可穿戴显示器件需要具备透气性, 以满足在便携式人机交互、健康监测、社交通信等应用场景中人体舒适度和长期稳定性的要求。

织物是人们日常生活中不可或缺的组成部分, 主要由柔性纤维构成互锁网络^[6]。这种独特的结构使织物具有柔软质感以保证穿着舒适度, 高的孔隙率以实现透气导湿, 一定的弹性以贴合人体不规则表面和顺应人体活动中的扭曲变形^[7], 因此, 将显示器件与织物的结构融合集成, 得到具有柔性、透气性的显示织物, 符合可穿戴显示设备的理想形态。

显示器的功能单元是发光器件, 其传统的制备方法是在平面基底上逐层沉积厚度均匀、膜层平整的电极和发光活性层, 器件通常为三明治叠层结

构^[8-9]; 然而织物具有高度粗糙多孔的形貌, 难以直接在其表面进行发光器件的制备, 因此, 实现显示功能与织物集成的关键在于如何设计与织物有效匹配的发光材料和器件结构。

本文系统总结了不同发光材料和器件结构在织物发光和显示中的应用, 讨论了不同构建策略下器件发光性能、柔性、稳定性、显示效果等的变化规律, 最后展望了织物显示技术的发展方向。

1 电致发光器件概述

目前, 人们已经将多种不同类型的发光材料应用于构建织物电致发光器件, 发光材料的基本性质和发光原理决定了器件结构设计。本文根据器件的驱动原理, 按照直流发光器件和交流发光器件进行分类阐述。

直流驱动的器件中最常见的是发光二极管, 其发光原理是在正向偏压下, 空穴和电子分别从正极和负极注入发光半导体材料的价带和导带, 空穴和电子在半导体材料中复合, 多余的能量以可见光的形式发射形成发光。所选用的半导体材料的带隙不同, 载流子复合后发射的光的波长也不同。发光二极管由于其低功耗、高亮度等突出优势, 如今被广泛应用于日常生活中的照明和显示^[10]。根据发光材

收稿日期: 2022-06-28 修回日期: 2022-08-15

基金项目: 上海市科学技术委员会科研项目(20JC1414902, 21511104900); 上海市教育委员会科研创新计划项目(2017-01-07-00-07-E00062)

第一作者: 施翔(1993—) 男, 博士。主要研究方向为柔性发光器件。

通信作者: 彭慧胜(1976—) 男, 教授, 博士。主要研究方向为高分子纤维器件。E-mail: penghs@fudan.edu.cn。

料的组成,进一步可分为无机发光二极管和有机发光二极管。无机发光二极管是基于 III-V 族元素半导体形成的 PN 结实现发光^[11](见图 1(a)),但是无机发光半导体是本征脆性材料,无法满足器件柔性的需求。

有机发光二极管的材料为具有共轭结构的小分子或聚合物半导体,依靠空穴和电子在有机半导体发光层中复合而发光^[12](见图 1(b))。有机发光材料具有本征柔性,更适用于柔性发光器件的制备,并且可通过加入增塑剂进一步调节发光层的模量使其具有弹性,使发光器件耐受拉伸、扭曲、戳刺等极端变形^[13]。有机发光二极管虽然具有柔性和高效率的优势,但是需要额外添加电荷传输层来保证载流子传输过程中的能级匹配,结构较为复杂。器件所使用的低功函金属电极化学稳定性差,也容易在频繁变形中产生裂纹。

聚合物发光电化学池是一种利用聚合物电解质作为发光层的直流发光器件,发光层主要由共轭发光聚合物、固态电解质和离子盐构成,当在发光层之间施加大于共轭聚合物的带隙的电压时,离子向两极迁移,使得正极和负极附近的发光聚合物发生电化学掺杂,分别生成 P 型区和 N 型区,并与中央的聚合物本征 I 区自发形成 P-I-N 结,电荷注入 P-I-

N 结后实现发光^[14](见图 1(c))。该独特的材料和机制使得聚合物发光电化学池具有较高的本征弹性,不需要材料的能级匹配,对基底平整度要求较低,适用刮涂、喷涂等制备工艺,在织物显示应用中具有较大潜力^[15-16]。

交流发光器件中,最常用的是粉末交流发光器件,其发光层是将电致发光粉与绝缘柔性聚合物复合得到^[17]。直流发光器件的激发依靠注入发光层中的电流,交流发光器件的激发则是依靠施加在发光层两端的交流电场。以铜掺杂的硫化锌发光粉为例,当电场施加在发光粉上时,电子和空穴从发光粉中的 $Cu_{2-x}S$ 相注入到 ZnS 晶格中并被掺杂形成的陷阱俘获,当电场反转,电子和空穴复合从而实现发光^[18](见图 1(d))。

由于场致发光的机制,交流发光器件更易于通过材料改性满足更多柔性可穿戴器件的使用需求,如引入超弹性聚合物使发光器件耐受超过 400% 的拉伸^[19]或者引入自愈合的聚合物实现发光器件在机械损伤下功能的自行修复^[20]。此外,交流发光器件还具有不需要考虑层间能级匹配、发光层平整度要求低,易于大面积加工,电极与发光层之间通过简单的物理接触就能实现器件正常工作等优点,在柔性发光器件中得到了广泛的关注。

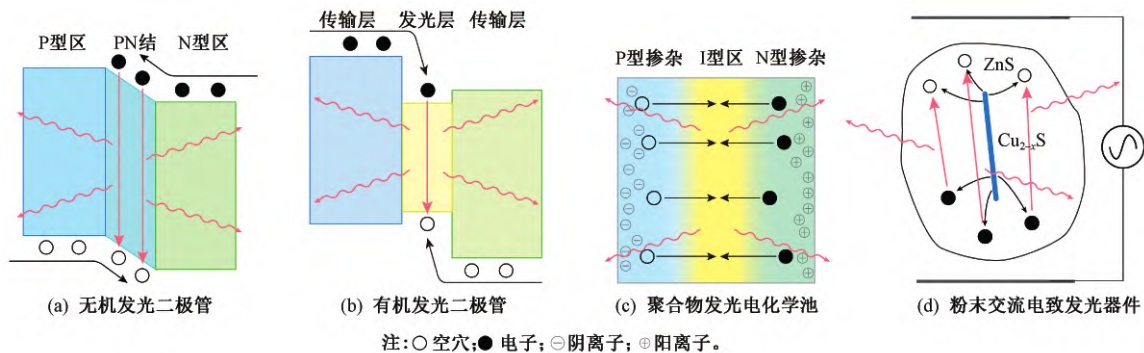


图 1 器件发光原理示意图

Fig. 1 Schematic illustration to light-emitting mechanisms of devices. (a) Inorganic light-emitting diodes; (b) Organic light-emitting diodes; (c) Polymer light-emitting electrochemical cells; (d) Powder AC electroluminescent devices

2 织物基平面发光器件

平面柔性发光器件的材料、工艺等发展较为成熟,因此将平面柔性发光器件转移粘贴在织物表面,或者以织物为基底制备平面柔性发光器件是得到织物显示最直接的方式。基于有机发光二极管的柔性薄膜显示已得到广泛应用,其正常工作需要纳米级平整的基底,研究人员通过在粗糙的织物基底上利用热压或紫外光聚合的方式引入聚合物缓冲层,将

具有微米级沟壑的织物表面转变为具有纳米级粗糙度的平整表面,构建了高效的织物发光器件^[21-22](见图 2(a))。所得到的织物发光二极管与薄膜器件性能相当,通过改良封装条件,织物发光二极管在水下依旧能稳定工作^[23]。

交流发光器件对基底平整度要求低,可使用导电织物同时作为电极和器件基底,在其表面通过涂刷或打印的方式制备膜层连续、覆盖均匀的 ZnS 发光材料,以银纳米线、聚乙撑二氧噻吩-聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)导电聚合物或导电凝胶作为透明电

极, 可得到交流发光织物^[24-25](见图 2(b))。如以商业的锦纶-氨纶面料作为基底, 在其表面镀金得到弹性薄纱透明电极, 以解决现有透明电极材料柔性差、

稳定性低的问题。在薄纱电极表面负载弹性 ZnS 发光层后, 得到贴合人体的发光织物, 器件在 100% 拉伸下依然稳定发光, 具有良好的穿戴舒适性^[26]。

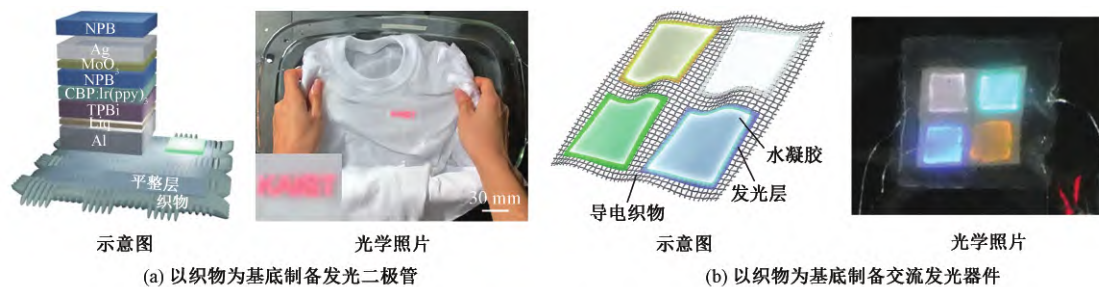


图 2 织物基平面发光器件

Fig. 2 Planar light-emitting devices on textile substrate. (a) Organic light-emitting diode fabricated on textile; (b) AC electroluminescent device fabricated on textile

3 发光纤维

以织物为基底制备平面发光器件所使用的薄膜材料的模量大都高于织物的模量, 二者力学性质的不匹配会导致织物柔性降低, 更容易导致在频繁变形过程中器件的功能层发生脱落、破损, 器件最终失效^[21]。此外, 贴附于织物表面的薄膜材料会遮盖织物的多孔结构, 降低织物舒适性和透气性, 难以实现大面积集成。

织物的基本构成单元是纤维, 将二维的薄膜发光器件转变为一维的纤维发光器件, 可通过编织的方式与织物集成, 不会牺牲织物固有的透气导湿性。此外, 一维结构具有更好的柔性, 能顺应不同形式的弯折, 有利于提高织物柔性和器件的力学稳定性^[27]。基于以上优势, 研究人员开发了一系列纤维状发光器件, 并获得了全编织结构的发光和显示织物, 本文从直流发光纤维和交流发光纤维 2 个方面进行阐述。

3.1 无机发光二极管纤维

无机发光二极管性能稳定、成本低, 已获得大规模应用, 将其集成到纱线上是最优先考虑的方案。由于无机发光二极管本身不具备柔性, 研究人员普遍采取的策略是用柔性纤维电极将具有硬质封装的微型无极发光二极管连接起来, 得到局部刚性、整体柔性的发光纤维。

在早期的工作中, 研究人员采取直接焊接的方法, 将无机发光二极管元件连接在导线上^[28-29]。基于无机发光二极管的发光纤维具有优异的发光性能和长的使用寿命, 但是焊接工艺的使用使得制备过程繁琐, 难以进行高效连续化生产, 金属焊接材料的

使用也进一步降低了纤维的柔性。

为了解决这一问题, 研究人员基于热拉工艺开发了规模化制备方法, 在无需焊接的情况下在纤维内部集成了微米级尺寸的发光二极管^[30](见图 3(a))。具体是将发光二极管和金属细丝嵌入热塑性聚合物基体中, 通过加热聚合物并施加牵引, 将基体聚合物成形为纤维。拉伸细化过程中, 金属丝和硬质发光二极管的距离逐渐靠近, 直至相互接触形成电学连接, 最终纤维直径约为 500 μm 。基于该方法得到的发光纤维可通过机器编织到织物中, 在智能传感和光通信领域展示出良好的应用前景。

局部刚性、整体柔性的纤维结构使得织物发光形态呈现分散的点状, 增加无机发光二极管的密度会导致柔性的丧失, 因此该策略在织物显示领域应用受限。研究人员通过将光纤和发光二极管结合, 将光纤编入织物中, 通过光纤将发光二极管发射的光导入到织物中, 紧密编织的聚合物光纤可作为高密度分布的织物光源。通过在光纤表面制备有规则分布的微米级刻痕, 使光从刻痕处发射出来, 通过调控刻痕的深浅、宽度等参数实现对发射光强度的控制, 在织物表面形成高质量的图像显示^[31]。然而, 与传统的纺织纤维相比, 聚合物光纤硬质、触感差, 在反复弯折情况下极易损坏。更重要的是, 一经加工的光纤表面刻痕是不可逆的, 无法实现可变图像的显示, 其应用范围非常有限。

3.2 有机发光二极管纤维

有机发光材料由于本征柔性的优势, 更适合于制备轻质、柔软的纤维发光器件。有机发光二极管纳米级厚度薄膜的发光容易受微小缺陷的影响, 因此主要的挑战来自如何在纤维表面构建高质量功能薄膜。

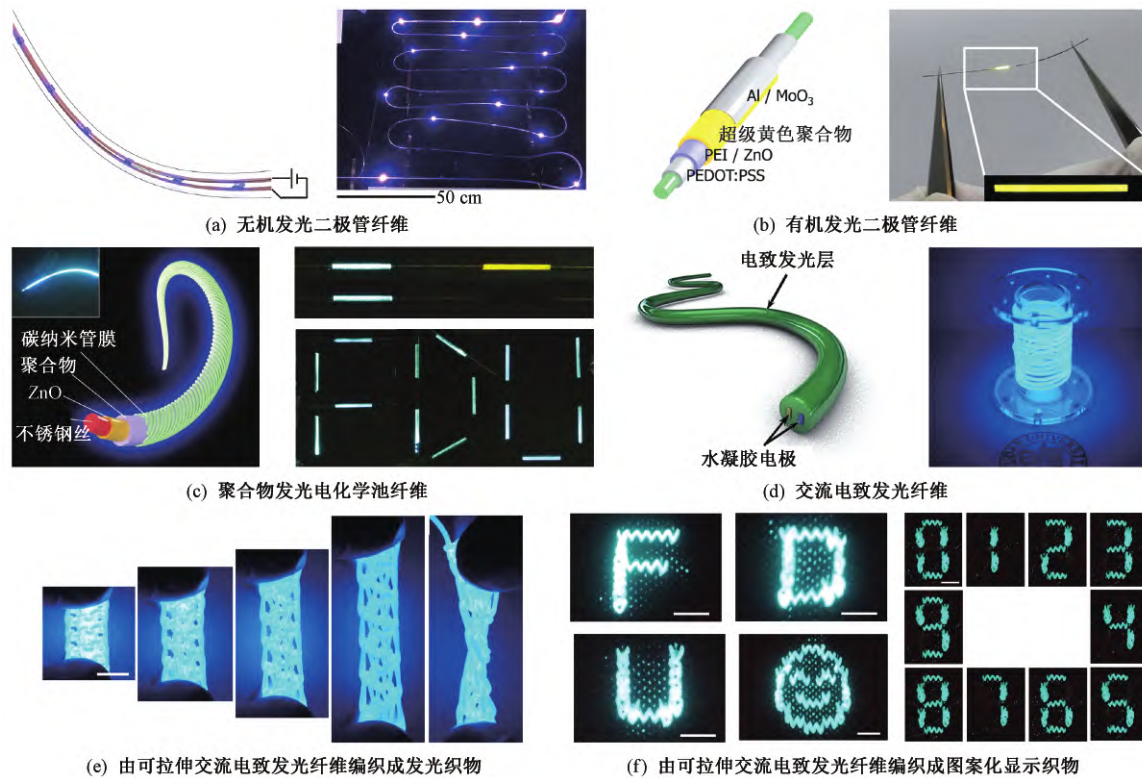


图 3 发光纤维及织物

Fig. 3 Light-emitting fibers and textiles. (a) Inorganic light-emitting diode fiber;

(b) Organic light-emitting diode fiber ; (c) Polymer light-emitting electrochemical cell fiber;

(d) AC electroluminescent fiber ; (e) Weaving stretchable AC electroluminescent fibers into light-emitting textiles;

(f) Weaving stretchable AC electroluminescent fiber into patterned display textile

早期研究人员以聚酰亚胺涂覆的硅纤维为基底,制备了基于热蒸镀工艺的有机发光二极管纤维^[32],但是蒸发沉积方式不利于在纤维高曲率表面形成厚度均匀、精确的薄膜;采用的有机小分子发光材料结晶性强,膜层力学稳定性差,该研究仅实现了毫米级长度的纤维发光。

聚合物发光材料具有更好的柔性,可以通过溶液涂覆的连续化方法在纤维表面成膜,更适合于发光纤维的构建,因此,研究人员基于溶液法制备了有机发光二极管纤维^[33](见图 3(b)),在柔性聚酯纤维表面依次浸涂 PEDOT:PSS 电极层、聚乙烯亚胺/ZnO 纳米颗粒(PEI/ZnO)电子传输层和超级黄色聚合物共轭发光层。最后通过蒸镀的方式在纤维一侧沉积 Al/MoO₃ 电极,另一侧纤维表面用于向外发射光。低粗糙度的 PEDOT:PSS 层和高质量电子传输层共同确保纤维良好的发光性能,器件在 10 V 下的亮度和电流效率分别超过 10 000 cd/m² 和 11 cd/A。有机发光二极管纤维直径最小可达到 90 μm,具有良好的柔性,可承受 3.5 mm 的弯曲半径,并可以编入织物中进行字母显示。有机发光材料对水氧敏感,需要进一步通过原子层沉积法在纤维表面沉积 Al₂O₃ 封装层,纤维在 150 cd/m² 亮度

下空气中的发光半衰寿命达到 230 h。

目前,所报道的纤维状有机发光二极管依然无法完全摆脱热蒸发沉积工艺,导致器件制备工序复杂,成本较高,纤维器件的连续化制备难以实现,器件长度限制在厘米尺度,开发可溶液加工的纤维负极材料是一个重要的发展方向。

3.3 聚合物发光电化学池纤维

由于不需要电极与发光层之间严格的能级匹配,聚合物发光电化学池器件无需使用金属电极,从而避免了真空蒸镀工艺。原位电化学掺杂的发光机制使发光层对平整性要求较低,在连续化制备和织物应用方面显示出突出潜力。

最近研究人员基于溶液法开发了聚合物发光电化学池纤维^[34](见图 3(c))。器件具有同轴结构,以不锈钢丝作为纤维电极,依次浸涂 ZnO 纳米颗粒、发光聚合物电解质(包含发光共轭聚合物 PF-B,离子导电成分乙氧基化三羟甲基丙烷三丙烯酸酯和掺杂剂三氟化甲烷基硫酸锂)分别作为电子传输层和发光层,最后在外围缠绕取向碳纳米管膜作为透明电极。ZnO 纳米颗粒起到降低器件漏电流、平衡载流子注入以及防止荧光猝灭效应的作用;碳纳米管薄膜具有 10²~10³ S/cm 的高电导率以及

87%的高光学透过率,可通过连续化的缠绕方式进行组装。

聚合物发光电化学池纤维在13 V下达到最高亮度 609 cd/m^2 ,电流效率达到 0.83 cd/A ,并且发光比较均匀,在纤维圆周方向发光亮度不随观察角度的改变而变化。由于发光层和电极材料良好的本征柔性,发光纤维在9 mm曲率半径下连续弯曲100次后的亮度保持初始亮度的91.2%。基于纤维器件的良好柔性和稳定性,可将不同颜色的聚合物发光电化学池纤维缠绕组装为复合纤维,实现蓝-白-黄色光谱可调的变色纤维,也可将纤维编到织物中,实现不同字母的显示。

但是,由于发光层P-I-N结稳定性较差、聚合物电解质易降解等问题,导致聚合物发光电化学池纤维寿命较低^[35],所报道的发光半衰寿命为4 h。此外,在实际使用中,纤维还会频繁受到挤压、摩擦等外力作用,碳纳米管电极薄膜以及纳米级厚度的聚合物电解质发光层是否可以耐受外力作用,还需要进一步评估。

3.4 交流电致发光纤维

粉末交流发光器件中,通常采用橡胶和树脂材料作为聚合物基体与发光粉复合制备发光层^[36],其力学稳定性显著高于直流发光体系。基于场致发光的原理,粉末交流发光活性层的厚度在 $50 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ 区间均可正常工作,对膜层平整度要求低^[37],适合与具有不规则表面的纤维或织物结合。此外,粉末交流发光体系在长时间工作情况下发热量低^[24],也使其在可穿戴应用上具有优势。根据器件结构分类,交流电致发光纤维可分为缠绕结构和同轴结构2种。

缠绕结构是将负载有发光层的复合纤维和纤维电极缠绕得到。如以镀银锦纶复丝作为纤维电极,通过溶液涂覆的方式依次在外层负载混合 BaTiO_3 的聚合物介电层、 ZnS 电致发光层和透明封装层,得到负载有发光层的复合纤维,与细铜丝或镀银锦纶丝缠绕得到交流电致发光纤维^[38]。金属纤维电极的高电导率可以高效地在纤维长度方向上传递电场,以驱动米级长度的交流电致发光纤维;但是金属电极不透光,对发光效果有较严重的遮挡,因此该发光纤维在370 V下的照度仅为 0.065 lx ,其低发光亮度限制了该类器件的实际应用。此外,缠绕结构的纤维电极无法完全覆盖发光活性层,因此该纤维只能实现部分发光。

针对缠绕结构纤维亮度低、发光区域不完整的问题,在负载有发光层的复合纤维表面涂覆透明导电层,构建同轴结构的交流电致发光纤维可以解决

以上问题。一个典型的例子是在聚合物纤维基底上依次涂覆银纳米线内电极、硅胶绝缘层、发光粉层、银纳米线外电极和封装层,获得直径约为 $500 \mu\text{m}$ 的交流电致发光纤维^[39]。同轴结构设计显著提升了器件的发光性能,在195 V下发光亮度达到 202 cd/m^2 ,并且纤维在长度方向和圆周方向均匀发光。所使用的硅橡胶材料保证了器件良好的稳定性,器件在循环弯曲500次后亮度减小于10%;且可抵挡空气中水、氧的侵蚀,在连续工作6 h后亮度下降13.3%。

可穿戴器件采用本征可拉伸的材料制备不仅能提高穿着舒适度,也使器件在频繁拉伸、扭曲等变形下可以保持性能稳定,因此,基于弹性导电凝胶和硅橡胶-发光粉复合发光层,研究人员提出了一步法挤出弹性交流电致发光纤维的技术^[40](见图3(d))。所采用的冷冻交联的凝胶在纤维挤出-固化过程中不发生体积变化、没有氧阻聚现象,保证了电极材料和发光层间稳定的器件界面,因此,发光纤维最大拉伸量达到800%,并且在300%拉伸量下稳定循环。得益于良好的稳定性,该发光纤维可通过机器与普通纱线混编,得到了弹性的发光织物,通过对编织图案和控制电路的设计,获得了织物七段显示器(见图3(e)、(f))。

4 经纬交织显示织物

平面动态图像显示是通过输入行列电信号调控微型发光单元阵列的程序化启亮来实现的,其中每个微型发光单元称为一个显示像素^[41]。发光纤维是线状光源,将发光纤维编入织物中只能显示特定的编织图案,显示的信息非常受限,无法在织物上实现如同手机、电脑屏幕的动态像素显示,使其难以作为可穿戴人机交互界面得到进一步应用。

织物的经纬交织结构与平面显示器中的像素阵列类似。最近本文课题组提出在经纬交织点处构建微型发光器件的策略,即开发负载交流电致发光活性层的复合经纱和透明导电纬纱,将其编织在一起,2种纱线相互接触形成织物显示像素^[42](见图4(a))。通过熔融纺丝的方法制备了低模量的弹性透明导电纤维,其在交织界面处发生自适应弹性形变,在经纬交织处形成紧密贴附的面状接触,从而在纤维高曲率接触界面构建均匀电场,实现了经纬交织发光器件稳定工作。该方法实现了编织方法和显示器制备的统一。基于连续化的编织工艺,实现了包含 5×10^5 个电致发光单元、6 m长、25 cm宽的大面积显示织物(见图4(b)),发光单元发光均匀,

600 个织物像素亮度偏差小于 8%。显示织物具有良好的稳定性, 耐受上万次弯折和上百次机洗。织物像素间距最小达到 800 μm (见图 4(c) 、(d)) , 通过与供能、输入和无线通信等模块集成, 实现了智能织物显示系统, 展示出其在物联网导航、便携通信、辅助沟通等领域的良好应用前景。

上述基于 ZnS 交流发光材料的显示织物亮度最高达到 115 cd/m^2 , 其亮度未能完全满足应用需求, 比如室内最优显示亮度通常高于 200 cd/m^2 [43]。此外, ZnS 交流发光材料缺少高效的红色体系, 无法实现全

彩发光, 因此, 基于高效、全彩的有机发光二极管体系发展了经纬交织的显示织物[44]。红、绿、蓝织物像素的最高亮度均超过 1 000 cd/m^2 , 最高电流效率分别达到 16.3、60.7 和 16.9 cd/A 。通过掩膜的方法在纤维上分段沉积功能材料, 再将负载有图案化发光功能层的纤维和金属纤维经纬交织, 制得 4 像素 \times 4 像素的显示织物, 在行列电信号的控制下实现不同字母的显示。但是, 热蒸发沉积工艺导致纤维长度受限和膜层均匀性不佳, 获得像素亮度均匀、大面积的有机发光二极管织物显示依然存在挑战。

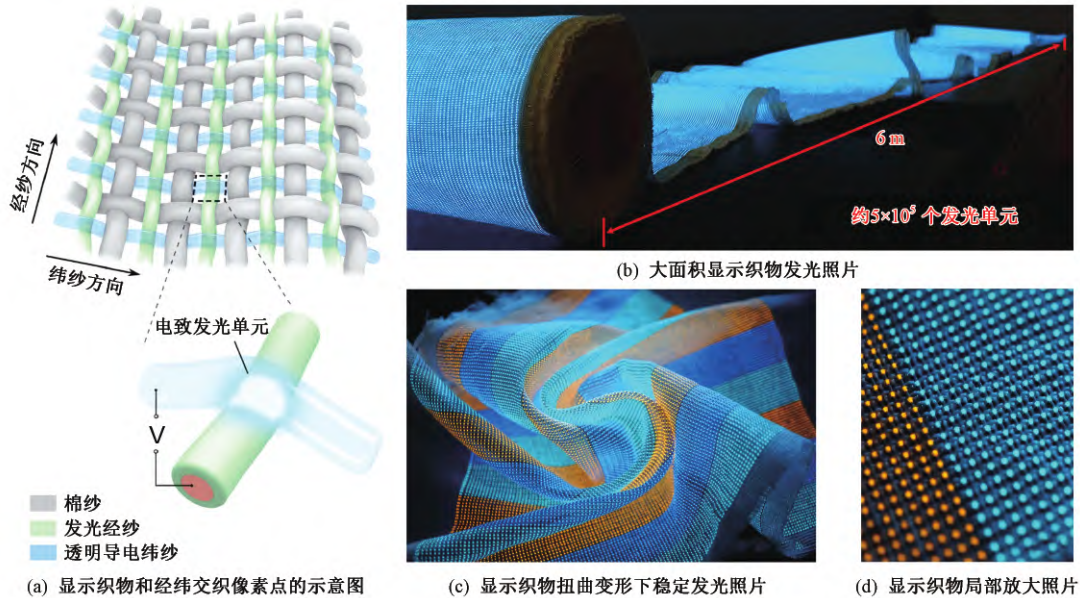


图 4 经纬交织显示织物

Fig. 4 Displaying textile in weft-warp interwoven structure. (a) Scheme for displaying textile and interwoven pixel; (b) Photograph of large-area displaying textile; (c) Photographs of stable luminescence of displaying textile under distortion; (d) Amplification photograph of displaying textile

5 结束语

在过去十多年中, 织物显示经历了快速的发展。通过材料和结构的设计, 器件结构经历了从硬质到柔性、二维到一维的转变, 实现了电子器件制备与织物的有效融合, 但仍然有一些问题亟待解决, 以推进显示织物的实际应用。

1) 发光材料是显示性能的基础。有机半导体发光材料有高亮度、高效率 and 全色彩的优势, 但是其化学稳定性差、膜层质量要求高。在织物应用中需要面临严苛的物理化学环境, 器件性能难以保持稳定; 粉末交流发光材料能与韧性聚合物复合形成耐极端变形、耐摩擦、耐水洗的稳定发光层, 但是需要高压驱动, 亮度低、色彩单一, 难以应用于高质量显示器件, 因此, 需要结合二者的优势开发新型发光材料。

2) 全彩显示是智能人机交互的标配。平面显示中利用 3 个紧密相邻的红、绿、蓝发光器件光谱叠加实现全彩发光。基于纤维的发光器件形成的是曲面光源, 在空间中形成的光场与平面器件不同, 发展基于曲面的新型表征手段, 探究三原色纤维的几何尺寸、空间位置、观察角度等因素对纤维光谱叠加效果的影响规律, 是实现全彩织物显示的基础。

3) 分辨率是提高显示质量的关键指标。显示技术的发展中, 通过缩小像素尺寸提高显示器分辨率使得图像质量不断提高。目前的显示织物像素点尺寸最小约为 200 μm , 像素点间隔约为 800 μm , 距离商业显示器还有比较大的距离。发展超细纤维表面材料均匀负载的新方法, 研究纤维交织界面的电场分布和载流子迁移规律是未来需要攻克的难题。

4) 系统集成是实现应用的前提。以织物显示为中心, 人机交互功能的实现还需要运算、供能、传感、通信等模块的共同运转。目前研究人员已经开

发了多种不同功能的纤维器件,如何在织物上实现精确、稳定的电学连接和织电器件之间的电学参数匹配,从而获得足够续航、运行稳定的织物系统是亟需解决的问题。 FZXB

参考文献:

- [1] KOO Ja Hoon , KIM Dong Chan , SHIM Hyung Joon , et al. Flexible and stretchable smart display: materials , fabrication , device design , and system integration [J]. *Advanced Functional Materials* , 2018. DOI: 10.1002/adfm.201801834.
- [2] WANG Jiangxin , LEE Pooi See. Progress and prospects in stretchable electroluminescent devices [J]. *Nanophotonics* , 2017 , 6(2) : 435–451.
- [3] ZHANG Dongdong , HUANG Tianyu , DUAN Lian. Emerging self-emissive technologies for flexible displays [J]. *Advanced Materials* , 2019. DOI: 10.1002/adma.201902391.
- [4] LEE S M , KWON J H , KWON S. et al. A review of flexible OLEDs toward highly durable unusual displays [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices* , 2017 , 64(5) : 1922–1931.
- [5] TAKEI Kuniharu , HONDA Wataru , HARADA Shingo et al. Toward flexible and wearable human-interactive health-monitoring devices [J]. *Advanced Healthcare Materials* , 2015 , 4(4) : 487–500.
- [6] CASTANO Lina M , FLATAU Alison B. Smart fabric sensors and e-textile technologies: a review [J]. *Smart Materials and Structures* , 2014. DOI: 10.1088/0964-1726/23/5/053001.
- [7] ZENG Wei , SHU Lin , LI Qiao , et al. Fiber-based wearable electronics: a review of materials , fabrication , devices , and applications [J]. *Advanced Materials* , 2014 , 26(31) : 5310–5336.
- [8] FUKAGAWA Hirohiko , SASAKI Tsubasa , TSUZUKI Toshimitsu , et al. Long-lived flexible displays employing efficient and stable inverted organic light-emitting diodes [J]. *Advanced Materials* , 2018. DOI: 10.1002/adma.201706768.
- [9] CONAGHAN Patrick J , MATTHEWS Campbell S B , CHOTARD Florian , et al. Highly efficient blue organic light-emitting diodes based on carbene-metal-amides [J]. *Nature Communications* , 2020. DOI: 10.1038/s41467-020-15369-8.
- [10] DUPUIS R D , KRAMES M R. History , development , and applications of high-brightness visible light-emitting diodes [J]. *Journal of Lightwave Technology* , 2008 , 26(9) : 1154–1171.
- [11] JEONG Junseok , JIN Dae Kwon , CHOI Joonghoon , et al. Transferable , flexible white light-emitting diodes of GaN p-n junction microcrystals fabricated by remote epitaxy [J]. *Nano Energy* , 2021. DOI: 10.1016/j.nanoen.2021.106075.
- [12] LIU Yuchao , LI Chensen , REN Zhongjie , et al. All-organic thermally activated delayed fluorescence materials for organic light-emitting diodes [J]. *Nature Reviews Materials* , 2018. DOI: 10.1038/natrevmats.2018.20.
- [13] KIM Jin Hoon , PARK Jin Woo. Intrinsically stretchable organic light-emitting diodes [J]. *Science Advances* , 2021. DOI: 10.1126/sciadv.abd9715.
- [14] YOUSSEF Kareem , LI Ying , O'KEEFFE Samantha , et al. Fundamentals of materials selection for light-emitting electrochemical cells [J]. *Advanced Functional Materials* , 2020. DOI: 10.1002/adfm.201909102.
- [15] SANDSTR M Andreas , DAM Henrik F , KREBS Frederik C , et al. Ambient fabrication of flexible and large-area organic light-emitting devices using slot-die coating [J]. *Nature Communications* , 2012. DOI: 10.1038/ncomms2002.
- [16] ARUMUGAM S , LI Y , PEARCE J , et al. Spray-coated organic light-emitting electrochemical cells realized on a standard woven polyester cotton textile [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices* , 2021 , 68(4) : 1717–1722.
- [17] WANG Lin , XIAO Lian , GU Haoshuang , et al. Advances in alternating current electroluminescent devices [J]. *Advanced Optical Materials* , 2019. DOI: 10.1002/adom.201801154.
- [18] BREDOL Michael , SCHULZE DIECKHOFF Hubert. Materials for powder-based AC-electroluminescence [J]. *Materials* , 2010 , 3(2) : 1353–1374.
- [19] LARSON C , PEELE B , LI S , et al. Highly stretchable electroluminescent skin for optical signaling and tactile sensing [J]. *Science* , 2016 , 351(6277) : 1071–1074.
- [20] SHI Xiang , ZHOU Xufeng , ZHANG Ye , et al. A self-healing and stretchable light-emitting device [J]. *Journal of Materials Chemistry C* , 2018 , 6 (47) : 12774–12780.
- [21] CHOI Seungyeop , KWON Seonil , KIM Hyuncheol , et al. Highly flexible and efficient fabric-based organic light-emitting devices for clothing-shaped wearable displays [J]. *Scientific Reports* , 2017. DOI: 10.1038/s41598-017-06733-8.
- [22] YIN Da , CHEN Zhiyu , JIANG Nairong , et al. Highly flexible fabric-based organic light-emitting devices for conformal wearable displays [J]. *Advanced Materials Technologies* , 2020. DOI: 10.1038/s41598-017-06733-8.
- [23] JEONG So Yeong , SHIM Hye Rin , NA Yunha , et al. Foldable and washable textile-based OLEDs with a multi-functional near-room-temperature encapsulation layer for smart e-textiles [J]. *NPJ Flexible Electronics* , 2021. DOI: 10.1038/s41528-021-00112-0.
- [24] ZHANG Zhitao , SHI Xiang , LOU Huiqing , et al. A stretchable and sensitive light-emitting fabric [J]. *Journal of Materials Chemistry C* , 2017 , 5(17) : 4139–4144.
- [25] HU Bin , LI Dapeng , ALA Okan , et al. Textile-based flexible electroluminescent devices [J]. *Advanced Functional Materials* , 2011 , 21(2) : 305–311.
- [26] WU Yunyun , MECHAEEL Sara S , LERMA Cecilia , et al. Stretchable ultrasheer fabrics as semitransparent electrodes for wearable light-emitting e-textiles with changeable display patterns [J]. *Matter* , 2020 , 2(4) : 882–895.
- [27] WANG Lie , FU Xuemei , HE Jiqing , et al. Application challenges in fiber and textile electronics [J]. *Advanced*

- Materials, 2020. DOI: 10.1002/adma.201901971.
- [28] HARDY Dorothy A, MONETA Andrea, SAKALYTE Viktorija, et al. Engineering a costume for performance using illuminated LED-yarns [J]. *Fibers*, 2018. DOI: 10.3390/fib6020035.
- [29] CHERENACK Kunigunde, ZYSSET Christoph, KINKELDEI Thomas, et al. Woven electronic fibers with sensing and display functions for smart textiles [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(45): 5178–5182.
- [30] REIN Michael, FAVROD Valentine Dominique, HOU Chong, et al. Diode fibres for fabric-based optical communications [J]. *Nature*, 2018, 560(7717): 214–218.
- [31] KONCAR Vladan. Optical fiber fabric displays [J]. *Optics and Photonics News*, 2005, 16(4): 40–44.
- [32] O'CONNOR B, AN K H, ZHAO Y, et al. Fiber shaped light emitting device [J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(22): 3897–3900.
- [33] KWON Seonil, KIM Hyuncheol, CHOI Seungyeop, et al. Weavable and highly efficient organic light-emitting fibers for wearable electronics: a scalable, low-temperature process [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(1): 347–356.
- [34] ZHANG Zhitao, GUO Kunping, LI Yiming, et al. A colour-tunable, weavable fibre-shaped polymer light-emitting electrochemical cell [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(4): 233–238.
- [35] YANG Chunhe, SUN Qingjiang, QIAO Jing, et al. Ionic liquid doped polymer light-emitting electrochemical cells [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2003, 107(47): 12981–12988.
- [36] WANG Jiangxin, YAN Chaoyi, CAI Guofa, et al. Extremely stretchable electroluminescent devices with ionic conductors [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22): 4490–4496.
- [37] ZHANG Xin, WANG Feng. Recent advances in flexible alternating current electroluminescent devices [J]. *APL Materials*, 2021. DOI: 10.1063/5.0040109.
- [38] DIAS Tilak, MONARAGALA Ravi. Development and analysis of novel electroluminescent yarns and fabrics for localized automotive interior illumination [J]. *Textile Research Journal*, 2012, 82(11): 1164–1176.
- [39] LIANG Guojin, YI Ming, HU Haibo, et al. Coaxial-structured weavable and wearable electroluminescent fibers [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2017. DOI: 10.1002/aelm.201700401.
- [40] ZHANG Zhitao, CUI Liyuan, SHI Xiang, et al. Textile display for electronic and brain-interfaced communications [J]. *Advanced Materials*, 2018. DOI: 10.1002/adma.201800323.
- [41] KIM Jaemin, SHIM Hyung Joon, YANG Jiwoong, et al. Ultrathin quantum dot display integrated with wearable electronics [J]. *Advanced Materials*, 2017. DOI: 10.1002/adma.201700217.
- [42] SHI Xiang, ZUO Yong, ZHAI Peng, et al. Large-area display textiles integrated with functional systems [J]. *Nature*, 2021, 591(7849): 240–245.
- [43] KIM Minkoo, JEON Dong-Hwan, KIM Jeong-Sik, et al. Optimum display luminance depends on white luminance under various ambient illuminance conditions [J]. *Optical Engineering*, 2018. DOI: 10.1117/1.oe.57.2.024106.
- [44] HWANG Yong Ha, KWON Seonil, SHIN Jeong Bin, et al. Bright-multicolor, highly efficient, and addressable phosphorescent organic light-emitting fibers: toward wearable textile information displays [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021. DOI: 10.1002/adfm.202009336.

Research progress in display units fabricated from textiles

SHI Xiang^{1,2,3}, WANG Zhen^{1,2,3}, PENG Huisheng^{1,2,3}

(1. Department of Macromolecular Science, Fudan University, Shanghai 200438, China;

2. State Key Laboratory of Molecular Engineering of Polymers, Fudan University, Shanghai 200438, China;

3. Laboratory of Advanced Materials, Fudan University, Shanghai 200438, China)

Abstract

Significance As the window of human-machine interaction, demands on displays have become an important driving force for the development of the information society. The development of display technology ranges from the early three-dimensional bulky cathode ray tube display to flat-panel liquid crystal display, and now to the two-dimensional thin-film organic light-emitting diode display, and the displays are becoming flexible and lightweight by reducing the thickness of the device. With the rapid development of emerging fields such as wearable devices, smart interactions and the Internet of Things, displays are required to fit the irregular surface of the human body, match the human body in mechanical properties and remain stable under three-dimensional deformation. Additionally, future displays should be permeable for long-term comfort in the applications of human-machine interaction and health monitoring. Textile is an indispensable part of our daily life, and integrating displays into textile is an ideal way to realize new displays that is highly flexible, adaptive to complex deformation, and permeable.

Progress Light-emitting devices are the basic components of displays. Dynamic images in displays are realized by controlling light-emitting devices according to the driving program. Until now, three types of textile

light-emitting device structures have been developed. They are textile-based planar light-emitting devices, light-emitting fibers, and warp-weft interwoven light-emitting devices.

Textile-based planar light-emitting devices are prepared by attaching flexible thin-film light-emitting devices to the textile substrate or depositing active materials layer by layer on the textile substrate to obtain light-emitting devices. Owing to the wide investigation on materials and fabrication of planar light-emitting devices, it is easy to achieve high luminance and efficiency in textile-based planar light-emitting devices for better display performance. However, the modulus of film materials is always higher than the modulus of textiles. The mismatch between the mechanical properties leads to reduced flexibility of the textile, and the devices can be easily peeled off from the textile or fade in performance during deformation.

The two-dimensional thin film light-emitting devices are converted into one-dimensional light-emitting fibers, which are the building blocks of textiles. Light-emitting fibers can be woven into textiles without sacrificing the inherent permeability and flexibility of textiles. Through the design of material and device structure, meter-length light-emitting fibers were realized based on AC electroluminescent material. Light-emitting fibers with good mechanical stability and flexibility can be woven into textile to display pre-designed weaving patterns. However, this is a significant limitation because simply based on pre-designed patterns, it is almost impossible for them to satisfy the display applications like computers and cell phones.

For real displays consisting of an array of pixels, the pixels are individually controlled in real time for dynamic change. A strategy is proposed to build micron-scale light-emitting devices at the warp and weft interwoven points. Composite warps that load luminescent materials and transparent conductive wefts were developed, and the textile pixels were formed by contacting two fibers during weaving. This method unifies the textile and the display device in function, structure, and fabrication method. High-resolution display in the textile was achieved by applying digital signals to warps and wefts.

Conclusion and Prospect In the past decade, many efforts are made to design materials, device structures, and fabricate methods for displaying textiles. High stability, flexibility, and permeability of displaying textiles are achieved by developing one-dimensional fiber devices, and pixel displays with high resolution and large-area integration are facilitated by developing warp-weft interwoven devices. However, the following problems remain to be solved to promote the practical application of displaying textile.

1) Luminescent materials are the basis for high display performance. Unique highly curved structures of fibers lead to new requirements for the composition, structure, film forming method and mechanical stability of light-emitting materials.

2) Full-color display is indispensable for human-machine interaction. In planar display, full color is realized by mixing the light emitting from three adjacent light-emitting devices in red, green, and blue. Fiber-shaped light-emitting devices are curved light sources. The space distribution of emitted light from fiber devices is different from that from planar devices, which demands new principles of color mixing.

3) Resolution is a key parameter for display quality. The resolution of displaying textiles is still far below that of the commercial displays. It is challenging to uniformly load the luminescent materials on superfine fiber and reveal the light-emitting mechanism of interwoven light-emitting devices in the size of tens of microns.

4) Systematic integration is the foundation of practical application. In order to integrate displaying textiles with other fiber devices such as battery fibers and sensing fibers, problems should be solved to connect fiber electrodes in high bonding strength and stable electrical conductivity under deformation. Matching of electrical parameters among textile devices should also be investigated for the reliable operation of the textile system.

Keywords light-emitting fiber; displaying textile; light-emitting material; display unit; flexible