

浙江大学

《信息电子学物理基础》 设计报告



题目 量子点织物设计

姓名

学号

专业 电子科学与技术

教学班 周四上午第 3、4、5 节

任课老师 林时胜

摘 要

量子点发光二极管（QLED）是近几年来发光器件领域的研究热点。本设计以钙钛矿量子点为基础，通过分析比较发射层厚度、不同空穴传输层（HTL）材料下量子点的发光效率、阈值电压、发光强度等特征，确立了一种较高效、发光效果好的 QLED 器件设计方案，并以此为基础设立了工作温度、发光频率和效果、使用寿命等若干设计指标，利用自动编织和激光焊接和 QLED 器件集成的编制方法，设计了一种应用于商业娱乐环境的 QLED 衣物。最后对生产安全防护和社会环境因素进行了简要分析。

关键词：QLED 量子点 智能衣物

目录

- 1.设计背景和设计指标要求.....4
- 2.QLED 基本原理和材料选择4
 - 2.1. QLED 基本原理4
 - 2.2. 钙钛矿量子点特点与优势.....5
- 3.应用场景和工作参数确定6
- 4.钙钛矿量子点的器件制作.....6
 - 4.1. CsPbBr₃ 钙钛矿量子点溶液的制备及表征结果.....6
 - 4.2. CsPbBr₃ 量子点 PeLED 器件的制备.....7
 - 4.3.QLED 智能编制方法和纺织物设计 10
- 5.生产安全防护和社会环境因素..... 11
- 6.总结..... 12
- 参考文献..... 13

1.设计背景和设计指标要求

随着科学技术的不断进步，柔性、便携、可穿戴的电子设备引起了人们的广泛关注。作为接收信息的主要窗口，显示器的质量直接决定了用户的体验。因此，开发超薄、轻量化、柔性、高色纯度的发光二极管（LED）对下一代照明和显示技术具有重要意义。目前有机发光二极管（OLED）和量子点发光二极管（QLED）均已经实现了柔性商业应用，例如手机折叠屏，曲面显示器等。OLED 具有自发、轻薄、对比度高和可用于柔性显示等优点。但是，由于低本征载流子迁移率、相对较低的色纯度、高成本和稳定性等限制，促使研究人员寻找新的发光材料。而基于无机量子点和背光系统的 QLED（由于其高色纯度（FWHM~ 30 nm）、宽色域、更好的稳定性和溶液可加工性，在显示应用中取得了显著成功。本设计报告旨在探讨利用量子点发光二极管的高效率发光和多种颜色发光的优势，以及在柔性材料和工艺上的可行性，将 QLED 器件集成到服饰上，实现智能服饰的创新应用。本报告的目标是：设计一款在商业娱乐场景下使用的 QLED 发光织物，具有以下功能和特点：

- （1）支持多色 QLED 灯光切换、闪烁功能；
- （2）常见环境下发光稳定，工作寿命长；
- （3）穿戴舒适、便捷。

根据以上基本要求，确定基本 QLED 的设计指标如下：

- （1）标准工作温度 300K（室温）下能正常工作
- （2）基本发光频率：红光（ $\lambda_0 = 628nm$ ）、绿光（ $\lambda_0 = 545nm$ ）、蓝光（ $\lambda_0 = 465nm$ ）。
- （3）激发信号：使用控制电路产生信号控制 QLED 的工作/关闭，控制单元使用干电池供电；
- （4）环境及寿命要求：在正常工作环境下的使用寿命不小于 5 年。

2.QLED 基本原理和材料选择

2.1. QLED 基本原理

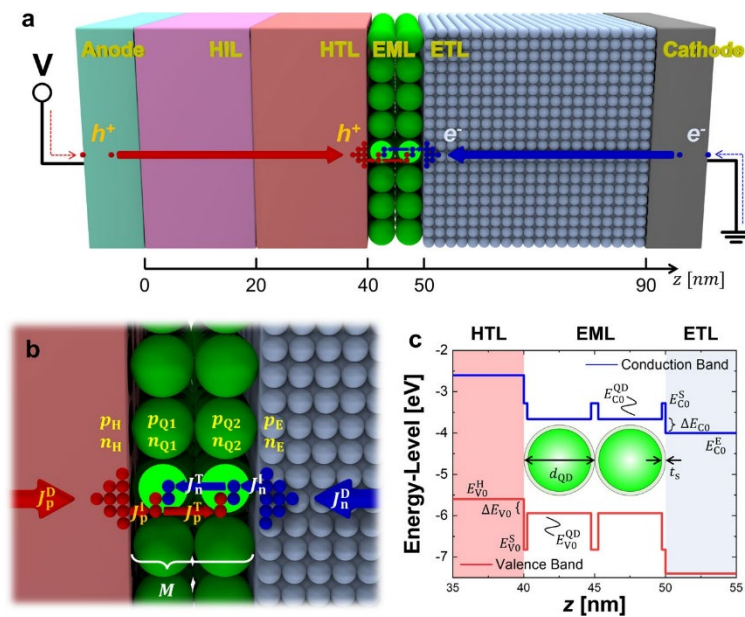


图 1 QLED 器件模型和工作原理示意图

QLED的基本原理如图1(a)所示。该器件包括夹在阳极和阴极之间的空穴注入层(HIL)、空穴传输层(HTL)、发射层(EML)和电子传输层(ETL)，EML被处理为M个QD层的堆叠。从电压源提供的空穴和电子分别通过HIL/HTL和ETL传输，并注入QD层。然后，电子-空穴对被限制在QD粒子中，并且可见光范围内的光子通过电子-空穴配对的辐射复合过程产生。

图1(b)显示了可能流过QLED器件的电流的示意路径。器件上的电荷传输可以用三种类型的空穴和电子电流来描述：(i) HIL/HTL和ETL中的漂移扩散电流密度 J_p^D 和 J_n^D ；(ii) 在两个相邻的QD层之间隧穿电流密度 J_p^T 和 J_n^T ；(iii) QD层和电荷传输层之间的注入电流密度 J_p^I 和 J_n^I 。在图1(b)所示的电流密度中，与QD层和电荷传输层之间的电荷捕获过程相关的多数载流子的注入电流密度 J_p^I 和 J_n^I 由等式2-1和2-2描述。这里，在正向偏置条件下，忽略了少数载流子的电荷注入。

$$J_p^I = qr_{QD}(\pi r_{QD}^2)\sigma_p T_{bp}\mu_{p0}^{QD}(F_p^{\frac{3}{2}}/F_0^{\frac{1}{2}})p_H(N_{QD} - p_{Q1}) \quad (2-1)$$

$$J_n^I = qr_{QD}(\pi r_{QD}^2)\sigma_n T_{bn}\mu_{n0}^{QD}\left(F_n^{\frac{3}{2}}/F_0^{\frac{1}{2}}\right)n_E(N_{QD} - n_{Q2}) \quad (2-2)$$

这里 q 是载流子电荷， r_{QD} 是QD的半径， πr_{QD}^2 是QD的横截面积， σ_p 和 σ_n 分别是空穴和电子的相对捕获横截面积， T_{bp} 和 T_{bn} 是由QD的壳层形成的能垒的空穴和电子隧穿概率， μ_{p0}^{QD} 和 μ_{n0}^{QD} 是电场 F_0 下QD层的空穴和电子迁移率，遵循Poole-Frenkel定律， F_p 和 F_n 分别是HTL/QD和ETL/QD界面处的电场， p_H 和 n_E 分别是在面向QD层的HTL和ETL表面处的空穴密度和电子密度，两者都随着施加的电压而成比例，并且分别朝向相邻的QD层起到空穴或电子源的作用， p_{Q1} 和 n_{Q2} 分别是在面向HTL和ETL的最外层QD层的中心处的空穴密度和电子密度， N_{QD} 是通过单个QD颗粒的体积的倒数获得的QD密度。引入空穴的电荷注入迁移率 $\alpha_p = \sigma_p T_{bp}\mu_{p0}^{QD}$ ，电子的电荷注入率 $\alpha_n = \sigma_n T_{bn}\mu_{n0}^{QD}$ 。

整个器件的平带能级图如图1(c)所示。此外，还考虑了HTL和QD核之间的价带偏移 ΔE_{V0} 以及ETL和QD核之间的导带偏移 ΔE_{C0} ，以分析价带偏移和导带偏移之间的差异引起的电荷注入失配的影响。频带偏移由 $\Delta E_{V0} = E_{V0}^H - E_{V0}^{QD}$ 和 $\Delta E_{C0} = E_{C0}^{QD} - E_{C0}^E$ 定义。这里， E_{V0}^{QD} 和 E_{C0}^{QD} 是QD核的最高被占据分子轨道(HOMO)和最低未被占据分子轨道(LUMO)能级， E_{V0}^H 和 E_{C0}^E 分别是HTL和ETL的价带和传导能级的平带边缘。公式2-3通过对EML区电场的线性近似预测QLED的阈值电压：

$$V_{th} \cong \frac{2M}{q} \max(\Delta E_{C0}, \Delta E_{V0}) + V_{bi} \quad (2-3)$$

其中 V_{bi} 是由阴极和阳极电极之间的功函数差引起的内建电势。

2.2. 钙钛矿量子点特点与优势

基于钙钛矿量子点的发光二极管具有窄半峰宽(FWHM)、宽色域、低成本和制备简单等优点，是QLED体系中的研究热点。全无机钙钛矿量子点(Pe-QDs)可以通过调节卤化物阴离子成分和粒径大小(即量子尺寸效应)的方式，实现精细可调和更窄的发射光谱，并通过合成方法等手段进一步改善其发光性能。钙钛矿结构类型化合物的制备方法主要有传统的高温固相法(陶瓷工艺方法)、溶胶-凝胶法、水热合成法、高能球磨法和沉淀法，此外还有气相沉积法、超临界干燥法、微乳法及自蔓延高温燃烧合成法等。

3.应用场景和工作参数确定

本设计的目标是设计一款在商业娱乐场景下使用的 QLED 发光织物，主要要求设计产品具有良好的视觉效果、舒适安全的穿戴体验和经济环保的生成过程。考虑到本产品的应用场景主要为酒吧、商场、直播间、广场等适宜娱乐活动进行的环境，因此将设计参数和指标确定为：

（1）标准工作温度 300K，工作温度范围 270K~330K。这项指标下，量子点的工作受影响较小，但足以覆盖一般的娱乐环境。

（2）基本发光频率：红光（ $\lambda_0 = 628nm$ ）、绿光（ $\lambda_0 = 545nm$ ）、蓝光（ $\lambda_0 = 465nm$ ），在此基础上可通过电控系统将不同光进行混合，发出不同颜色的光，并且可以控制每一种光的强度或明暗闪烁，从而实现良好的视觉效果，起到娱乐作用。

（3）激发信号：使用嵌入式 MCU 控制开关电路和压控电阻，实现对正向电压的施加与关闭的控制。工作电压（可以和 MCU 的控制电平不同）范围为 3.3V~12V。

（4）环境及寿命要求：在正常工作环境下的使用寿命不小于 5 年。

4.钙钛矿量子点的器件制作

以下部分以绿色 QLED 器件为例说明 QLED 器件的制作过程，其他颜色的光源可通过调整变钙钛矿 ABX_3 晶体结构中量子点的尺寸和卤素 X 离子（Cl⁻、Br⁻ 及 I⁻）的组分来实现。

4.1. CsPbBr₃ 钙钛矿量子点溶液的制备及表征结果

采用 LARP 法（如图 2）在室温下合成 CsPbBr₃ 发光量子点。环境光下澄清透明的量子点溶液，在紫外光照射下可以发出明亮的绿色荧光。

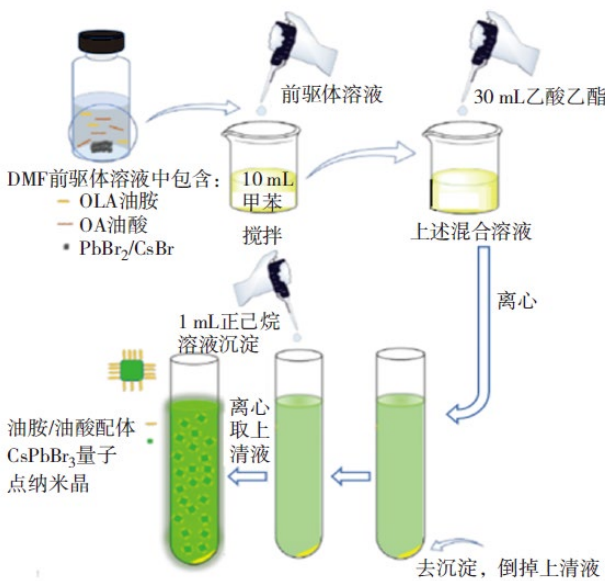


图 2 LARP 法制备 CsPbBr₃ 量子点示意图

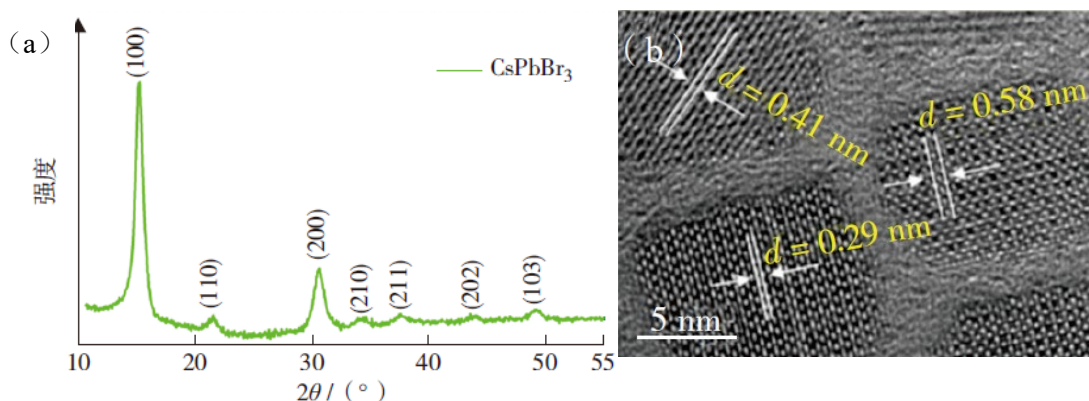


图 3 (a) LARP 法合成的 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的 X 射线衍射 (XRD) 图; (b) 高倍透射电子显微镜 (TEM) 下晶格图

图 3 (a) 为 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶的 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 图, 图中展示了 15.21°、21.50°、30.70°、34.19°、37.60°、43.69° 及 49.01° 的衍射峰, 分别代表立方相纳米晶的 (100)、(110)、(200)、(210)、(211)、(202) 及 (103) 晶面。图 3 (b) 为高倍 TEM 下 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶的晶格图, 图中清晰显示了纳米晶的晶格, 晶面间距为 0.41、0.29 和 0.58 nm, 分别对应 CsPbBr₃ 的 (110)、(200) 和 (100) 晶面。

4.2. CsPbBr₃ 量子点 PeLED 器件的制备

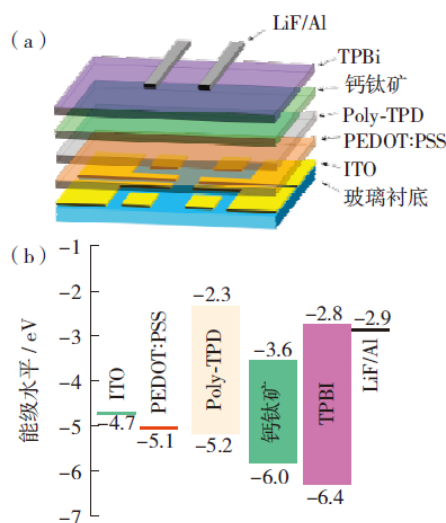


图 4 CsPbBr₃ 量子点发光二极管的器件结构示意图以及器件中各层材料的能级图

图 4 为 CsPbBr₃ 量子点发光二极管的器件结构示意图以及器件中各层材料的能级图。各层的作用为:

- (1) ITO: 基板, 作为阴极;
- (2) PEDOT: PSS: 空穴注入层 HIL, 厚度为 30nm;
- (3) Poly-TPD: 空穴传输层 HTL, 厚度为 22nm;
- (4) 钙钛矿层: 发射层 EML, 1、2 和 3 层 PQD 发光层薄膜的厚度分别为 24.7、43.2 及 62.1nm;
- (5) TPBi: 电子传输层 ETL, 厚度为 40nm;

(6) LiF/Al: 中间层和阳极金属电极, 厚度分别为 1nm 和 100nm。

CsPbBr₃ PeLED 的制备流程为: ①在清洗后的 ITO 玻璃表面滴加 PEDOT: PSS 溶液, 用于制备空穴注入层, 旋涂仪的转速为 4000 r/min, 旋转时间为 60 s, 然后放在加热台上在温度 130℃下退火 15min, 以去除溶剂中的水分; ②将热处理后含有 PEDOT: PSS 薄膜的 ITO 玻璃转移至手套箱中, 旋涂 8 mg/mL 的 Poly-TPD 氯苯溶液制备空穴传输层, 然后在 4000r/min 的转速下旋涂 40s, 在加热台上以 120℃退火 20min, 以去除多余的氯苯; ③将 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点溶液旋涂于 Poly-TPD 薄膜上, 旋涂转速为 1500r/min, 时间为 40 s, 以控制钙钛矿发光层的膜厚, 随后在室温下退火 15min, 用甲醇擦除部分薄膜, 露出 ITO 底电极; ④将衬底转移至真空蒸镀系统中, 分别蒸镀厚度为 40nm 的 TPBi 作为电子传输层, 1nm 的氟化锂 (LiF) 中间层及 100nm 的 Al 电极; ⑤将 LED 器件从蒸镀系统中取出, 在手套箱内用紫外固化胶封装器件。

图 5 为分别用 1、2 和 3 层钙钛矿量子点薄膜作为发光层所制备 PeLED 的电致发光、电学性能曲线以及样品加电点亮照片。

由图 5 (a) 可见, 当发光层薄膜厚度由 1 层增加到 3 层时, PeLED 电致发光峰的峰位和半高宽固定不变, 但发光强度略有增加, 这可能是由于膜厚增加导致更多的量子点参与发光所造成。

由图 5 (b) 可见, 随着旋涂钙钛矿量子点溶液层数的增多, CsPbBr₃ PeLED 的发光亮度略有增强。

图 5 (c) 和 (d) 为 LED 的电流密度和亮度随外加电压增加的变化 (J-V 和 L-V) 曲线, 可见, 随着发光层薄膜厚度的增大, PeLED 的开启电压由单层时的 3.80V 先降低到 2 层时的 3.61V, 再进一步降低至 3 层时 3.60V, 而亮度随着电压的增加呈现出先升后降的趋势, 当电压达到 7.5V 时亮度达到最高值 2281.45cd/m²。

图 5 (e) 为 3 组 PeLED 器件的外量子效率变化曲线, 可见, 随着电流密度的增加曲线呈现先升后降的趋势, 这是由于电荷注入不平衡, 非辐射俄歇复合和焦耳热的影响造成的。器件的外量子效率 (external quantum efficiency, EQE) 随发光层薄膜厚度的增加逐渐增大, EQE 最高 0.129%, 在含有 3 层钙钛矿发光层薄膜的 PeLED 器件中获得, 2 层 CsPbBr₃ 薄膜所制备 PeLED 的 EQE 为 0.109%, 略小于 3 层薄膜器件, 这可能是由于室温合成的量子点和薄膜中存在大量的表面缺陷, 因此, 器件的电光转换效率较低。

图 5 (f) 的瞬态荧光寿命光谱仪测试结果再次证明上述推测, 随着 PQD 薄膜层数由 1 层增加到 3 层时, 量子点薄膜的荧光寿命先逐渐增大, 分别为 8.6、10.9 及 15.1ns, 表明增加膜厚可以减少薄膜中的缺陷态, 从而减少非辐射复合。

在综合考虑较小开启电压、较长荧光寿命及较高电-光转换效率等因素, 选定最佳的 CsPbBr₃ PeLED 发光层薄膜的层数为 2 层, 膜厚为 43.2 nm。此时开启电压为 3.61V, 电压约 7.5V 时亮度最大。和预先设计的指标比较, 发现在设定的工作温度范围和电压范围内, 可以实现对 QLED 的控制, 故设计指标无需修改。

由于器件中采用较薄的 PQD 发光层, 易造成电子和空穴注入不平衡, 从而阻碍器件稳定性和发光效率的进一步提高, 因此, 选取 4 种空穴传输层材料 (PVK、TFB、Poly-TPD 和 PTAA) 制备 FASn_{0.3}Pb_{0.7}Br₃ 钙钛矿 LED, 研究不同空穴传输层材料对钙钛矿薄膜发光性能的影响。

图 6 (a) 中框住的部分为 4 种材料的能级图, 图 6 (b) 为钙钛矿在不同 HTL 结构 (ITO/PEDOT: PSS/HTL/FASn_{0.3}Pb_{0.7}Br₃) 上的 PL 谱。可见, 相比于玻璃衬底, 空穴传输层上 PQD 薄膜的发光存在不同程度的荧光淬灭, 最高 PL 谱值在 PVK HTL 上的薄膜中获得, 其次是 TFB, 在 Poly-TPD 和 PTAA 上的荧光淬灭最严重。这是由于不同 HTL 的最高占据分子轨道 (HOMO) 与 FASn_{0.3}Pb_{0.7}Br₃ 价带顶 VBM 的能级差 ΔE 不同所造成, 如图 6

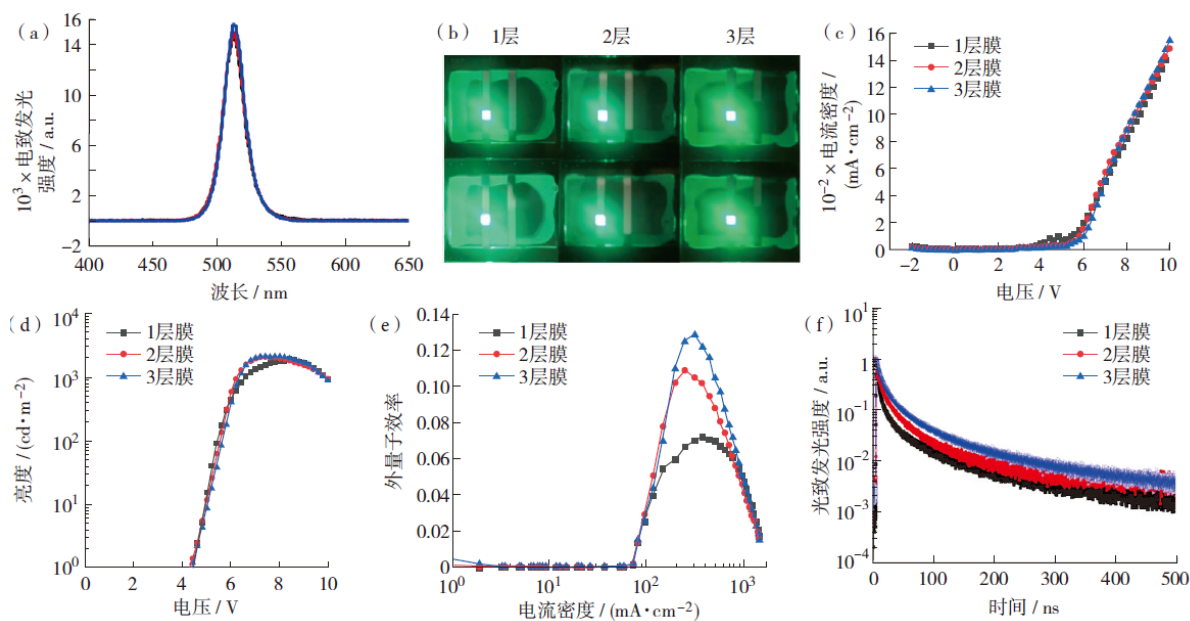


图 5 三组 CsPbBr_3 钙钛矿量子点 PeLEDs 的电学和光学特性曲线和照片 (a) EL 光谱; (b) 加电压点亮的 PeLED 照片; (c) J-V 曲线; (d) L-V 曲线; (e) 外量子效率与电流密度曲线; (f) 不同厚度 CsPbBr_3 薄膜的 TRPL 衰减曲线

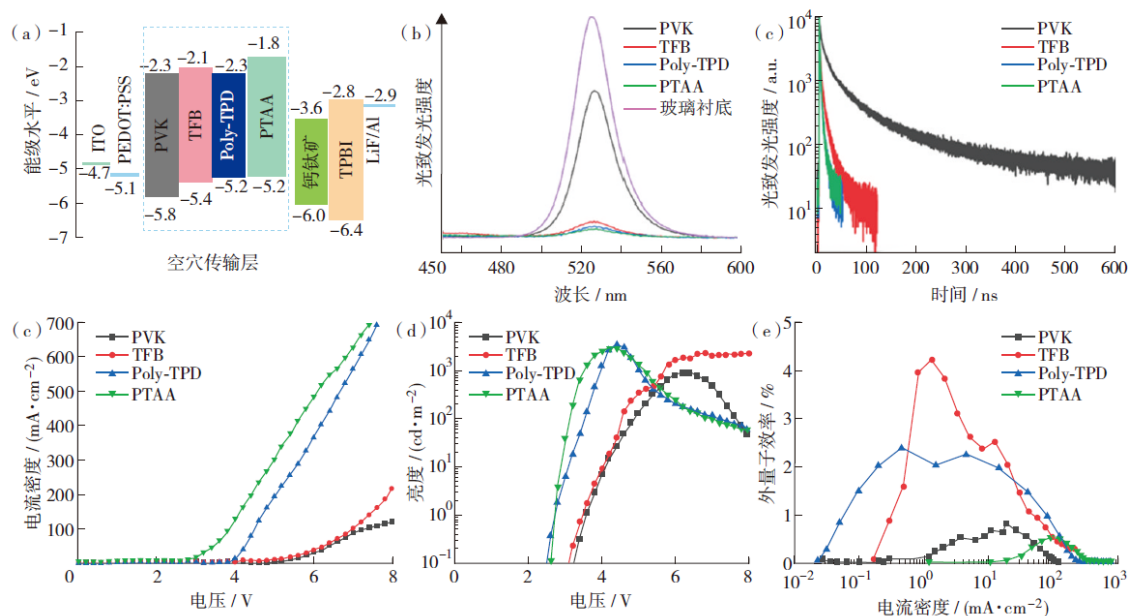


图 6 四组不同空穴传输层上 $\text{FASn}_{0.3}\text{Pb}_{0.7}\text{Br}_3$ PeLEDs 的电学光学特性曲线 (a) 器件中各层材料的能级图; (b) ITO/PEDOT:PSS/HTL 衬底上钙钛矿薄膜的 PL 光谱; (c) $\text{FASn}_{0.3}\text{Pb}_{0.7}\text{Br}_3$ 钙钛矿量子点薄膜的荧光寿命曲线; (d) $\text{FASn}_{0.3}\text{Pb}_{0.7}\text{Br}_3$ PeLED 的 J-V 曲线; (e) L-V 曲线; (f) 外量子效率与电流密度的关系曲线

(a) 中所示, PVK、TFB、Poly-TPD 及 PTAA 的 ΔE 分别为 0.2、0.6、0.8 及 0.8 eV, 表明包含较高 HOMO 水平的 HTL, 其空穴提取能力较高, 其能将钙钛矿层产生的光生载流子高效转移至相邻的 HTL 层, 导致钙钛矿层电子-空穴对复合效率降低。

图 6 (c) 为 $\text{FASn}_{0.3}\text{Pb}_{0.7}\text{Br}_3$ 纳米晶薄膜的时间分辨光致发光谱 (TRPL), 可见, 旋涂在 PVK、TFB、Poly-TPD 及 PTAA 不同 HTL 上的 $\text{FASn}_{0.3}\text{Pb}_{0.7}\text{Br}_3$ 纳米晶薄膜的平均 PL 寿命分别为 46.5、5.4、2.7 及 2.5 ns, 与图 6 (b) 的结果一致。

图 6 (d) 为器件的 J-V 曲线, 可见, PVK 作为器件空穴传输层材料时, 器件的电流密度较小, 这是由于 PVK 的空穴迁移率 $2.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 远小于 TFB、Poly-TPD 及 PTAA 的空穴迁移率 (分别为 1×10^{-2} 、 1×10^{-4} 及 $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$), 同时也比 TPBi 材料中的电子迁移率 $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 小, 所以空穴注入速率相对较慢, 导致发光层中电子和空穴注入的不平衡。

图 6 (e) 为 PeLED 的 L-V 曲线, PVK 作为空穴传输层材料时, 开启电压最高为 3.6 V, 大于其他 HTL 制备的器件。这是因为 PEDOT: PSS 与 PVK 的 HOMO 之间具有较大能级差 (0.7 eV), 空穴注入势垒大, 注入相对困难。

由图 6 (f) 的外量子效率-电流密度曲线可见, 当空穴传输层为 TFB 时, 器件的 EQE 最大为 4.2%, 器件性能最优。可见, 虽然 PVK 薄膜上所制备 PeLED 的 PL 发光性能较好, 但由于其空穴迁移率较小、注入慢, 器件的电-光转换效率最差。而 TFB 薄膜制备的 PeLED, 因其空穴迁移率较大、注入能力较强, 表现出较好电致发光特性。

综上, TFB 有利于空穴的快速注入, 是一种有效的空穴传输层材料。

上述为绿光 QLED 器件的产生, 若要产生蓝色光, 可采用基于 Rb^+ 、 Zn^{2+} 共掺的钙钛矿量子点器件, 结构为 ITO/PEDOT: PSS/TFB/Pe-QDs/TPBi/LiF/Al 的 QLED 器件, 也可通过改变钙钛矿层 (EML 层) 的量子点尺寸来实现, 对于红光同理可实现。

4.3. QLED 智能编制方法和纺织物设计

QLED 的实际应用, 可应用自动编织和激光焊接将纤维设备集成到纺织品中来实现, 如图 7 所示。产品的结构依次可分为: 传感层 (F-PD)、储能元件层 (F-SC)、电驱动和控制层 (F-FET) 和发光层 (F-QLED)。通过调整编制的速度和纵横方向, 在纵向 (经线方向) 编入导线, 横向 (纬线方向) 编入纺织衬底和纤维材料, 并利用激光焊接发挥连接和固化作用, 实现 QLED 的嵌入。

由于加入 QLED 器件和导线后势必会增加衣物的重量, 考虑到衣着时的轻便度和透气度, 选择棉作为纺织物的基本材料, 即衬底材料。编制材料上, 考虑到聚酯纤维具有出色的抗皱性和高模量, 在设计合理的前提下足以支撑各器件和金属导线, 使得衣物有层次感, 加上聚酯纤维具有高强度、高弹性恢复力、抗磨损和耐溶剂性, 可以对 QLED 器件和电路起到保护作用, 也使得衣物容易清洁, 同时聚酯纤维生产和纺织技术已成熟, 纺织的成本较低, 故选之。

选定材料后, 考虑到实际应用情况, 可以在衣物的身前、大臂等不易弯曲的区域主要集成 QLED 器件, 并可以组成需要的图案。将控制单元分布在后背、后衣领等不易弯曲、不易触碰、较为隐蔽的部分, 并加以适量 QLED 装饰。为了实现不同颜色的光的混合产生, 可以利用分层、聚合嵌入等方式在同一片区域内集成不同颜色的 QLED 器件。控制单元的作用是按照事先输入的程序, 自动产生电信号控制各 QLED 的工作或关闭。

统计结果表明, QLED 的量子点稳定性很高, 寿命可达 100 万小时, 故本次设计的产品实际寿命由聚酯纤维、棉花等衣物纺织材料的寿命决定, 实际情况下寿命足以超过 5 年。

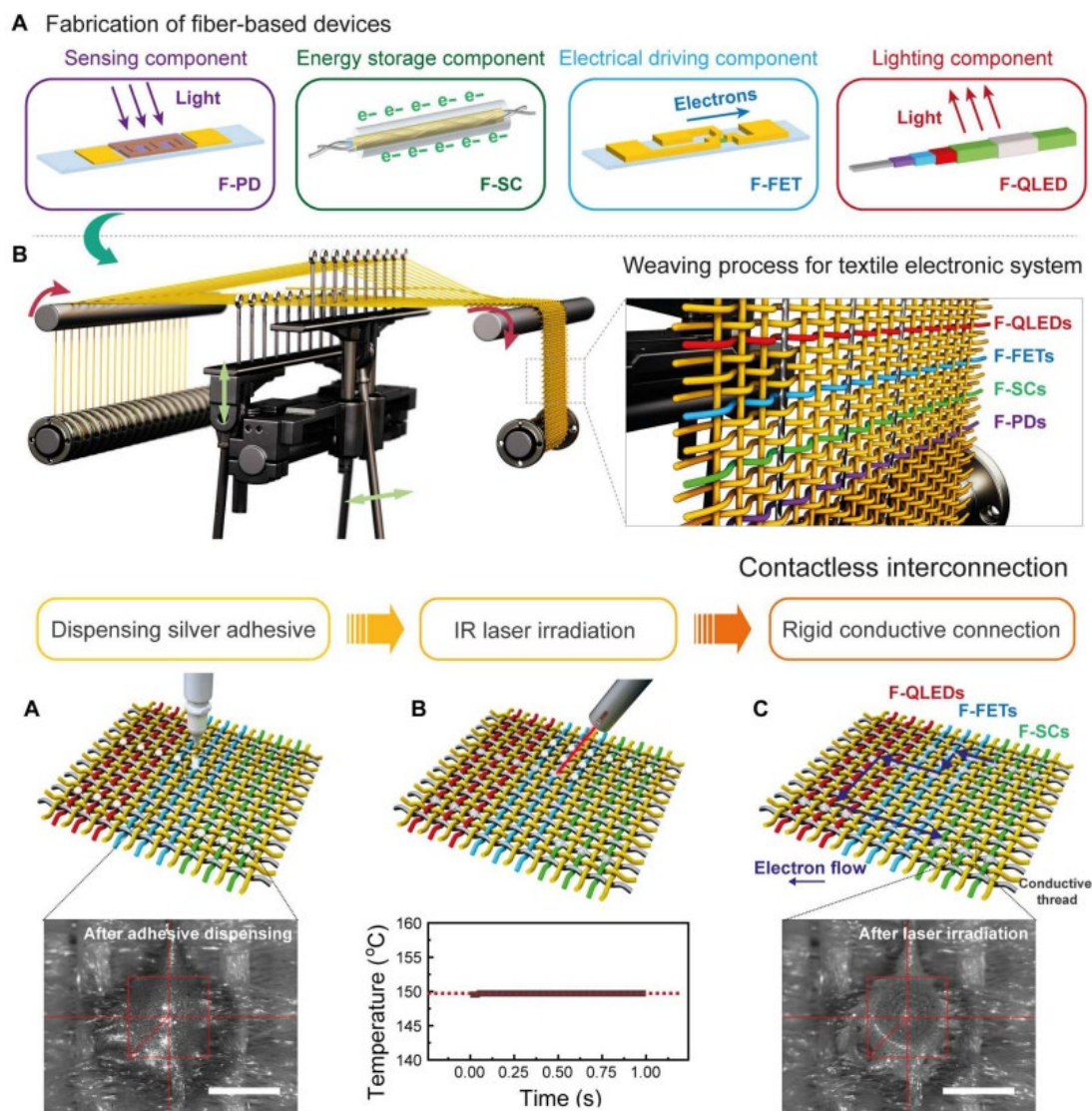


图 7 自动编制和激光焊接实现 QLED 与纺织品结合

5.生产安全防护和社会环境因素

量子点材料制造、量子点器件制造和智能纺织品制造是具有不同污染特征的行业。

量子点材料的制造涉及各类有毒有害重金属、纳米颗粒和溶剂污染。近年来，关于低毒钙钛矿半导体器件等相关技术逐渐发展，因此钙钛矿加工成量子点制作材料时的污染相对较小，但将其制作成量子点的过程中使用到的甲苯、乙酸乙酯、正己烷等有机溶剂和过滤掉的纳米颗粒废渣仍会对环境产生污染。

量子点器件制造涉及各类有机酸、无机酸、有机溶剂的作业工作危害和排放污染。应根据有关规定制定相应的废弃物、排放物处理方法和标准制度，减少对环境的破坏。同时考虑到上述两个过程中的有机试剂挥发会对工作人员产生危害，因此应让工作人员在专业的加工环境、佩戴合格的生产防护服后再进行操作，并加强生产安全教育。

聚酯纤维等纺织品制造涉及各类液相、高温处理方法和相应的废水废气排放，及作业过程中的健康环境风险。聚酯纤维的生产会与石油工业相关，产业链过程中的废水废气排放较

大：聚酯纤维纺织品生产过程中包含了噪声污染、粉尘污染和操作机器设备时的安全隐患，应加强对工作人员的安全教育和防护措施，并定期组织安全检查和员工体检。

6.总结

本文通过文献查阅、分析比较等方法，选择了以钙钛矿为基础的 QLED，通过分析比较发射层厚度、不同空穴传输层（HTL）材料下量子点的发光效率、阈值电压、发光强度等特征，确立了一种较高效、发光效果好的 QLED 器件设计方案，并以此为基础设计了一种适用于商业娱乐环境的 QLED 服装，这种设计成本较低，轻便耐用，可以投入商业生产和使用。

参考文献

- [1]陈嘉敏,崔向前,胡陆峰,等.溴基钙钛矿量子点发光二极管的制备及性能优化.深圳大学学报理工版,2023,40(6): 688-695.
- [2]肖毅,李丹阳,罗宇,等.共掺 Rb^+ 和 Zn^{2+} 蓝光钙钛矿量子点及其发光二极管.发光学报,2022,43(6): 901-910.
- [3]Sung-Min Jung, Tae Hoon Lee, Sang Yun Bang, et al. *Modelling charge transport and electro-optical characteristics of quantum dot light-emitting diodes*. npj Computational Materials. 122 (2021): 1-11
- [4]Sanghyo Lee, Hyung Woo Choi, Cátia Lopes Figueiredo, et al. *Truly form-factor-free industrially scalable system integration for electronic textile architectures with multifunctional fiber devices*. SCIENCE ADVANCES. 2021, Vol 9, Issue 16
- [5]Chatura Samarakoon, Hyung Woo Choi, Sanghyo Lee, et al. *Optoelectronic system and device integration for quantum-dot light-emitting diode white lighting with computational design framework*. Nature Communications 13, 4189 (2022).