



浙江大學
ZHEJIANG UNIVERSITY

信息电子学物理基础课程设计报告

量子点发光智能服装设计

姓名 _____

学号 _____

院所 _____ 信息与电子工程学院

2024 年 12 月 29 日

摘要

随着可穿戴技术的快速发展，智能服装作为其重要分支，正逐渐成为市场的新宠。本项目旨在设计一款集成量子点发光二极管（QD-LED）技术的智能服饰，利用 QD-LED 的高效率发光和多种颜色发光的优势，结合柔性材料和多样化的制造工艺，实现服饰的智能化和个性化。通过深入研究和创新设计，我们实现了一款具有高效能、个性化和智能化特点的智能服装。

在设计过程中，我们面临了柔性与耐用性、功耗与续航、环境适应性以及智能控制等挑战。通过选择高性能的柔性材料、优化电路设计、采用防水防尘的封装材料以及集成先进的传感器和控制系统，我们确保了智能服装的高性能和稳定性。此外，我们还考虑了产品的环保性、成本效益、市场定位以及法规遵从性，确保产品在满足市场需求的同时，也具有社会和环境的可持续性。

最终，我们的智能服装在发光效率、颜色多样性、柔性材料集成、工艺多样性、场景适应性等方面均达到了设计目标。产品在舒适性、耐用性、智能化和美观性上均表现出色，满足了市场的期望。通过本项目，我们展示了智能服装在技术、市场和环境可持续性方面的全面优势，为智能服饰领域的发展提供了坚实的基础。

目录

1	设计背景	4
2	设计指标	6
3	QD-LED 介绍	8
3.1	QD-LED 概述	8
3.2	QD-LED 工作原理	10
4	QD-LED 器件设计	13
4.1	器件设计指标	13
4.2	器件结构与材料	14
4.3	器件参数设计	19
5	QD-LED 智能服装设计	20
5.1	设计理念	20
5.2	设计目标	20
5.3	设计方案	20
5.4	应用场景	21
5.5	设计挑战与解决方案	21
6	产品工艺与制造	22
6.1	量子点合成	22
6.2	QD-LED 器件制备	23
6.3	智能服装制造	24
7	设计评估	27
7.1	产品评估	27
7.2	环境和社会效益评估	28
8	总结	30

1 设计背景

市场需求

随着科技的快速发展，智能服装作为可穿戴技术的一个重要分支，正逐渐成为市场的新宠。消费者对于个性化、健康监测以及时尚与科技结合的需求日益增长，这为智能服装的发展提供了广阔的市场空间。

技术发展

量子点发光二极管（QD-LED）技术因其高效率、高亮度、宽色域和可调谐性等特性，在智能服装领域展现出巨大潜力。QD-LED 技术的发展，特别是在显示和照明技术中的应用，为智能服装的创新设计提供了新的可能性。

项目目标

本项目旨在设计一款集成 QD-LED 技术的智能服饰，该服饰将利用 QD-LED 的高效率发光和多种颜色发光的优势，结合柔性材料和多样化的制造工艺，实现服饰的智能化和个性化。以下是本项目的主要设计目标：

- 实现高效能、个性化和智能化的穿戴体验。
- 确保服装在各种光照条件下的可视性，满足夜间或低能见度条件下的安全需求。
- 通过控制 QD-LED 的发光颜色和图案，实现服装的个性化显示。
- 集成传感器和控制系统，使服装能够根据环境和用户需求自动调整显示效果。

设计挑战

在设计和制造过程中，我们面临以下挑战：

- 柔性性与耐用性的平衡：确保智能服装在保持柔性的同时，具有足够的耐用性。
- 功耗与续航：优化电路设计，降低功耗，延长电池续航时间。
- 环境适应性：选择适合各种环境条件的材料和封装技术。
- 智能控制：集成先进的传感器和控制系统，实现智能化的显示和交互功能。

技术优势

QD-LED 技术在智能服装中的应用具有以下优势：

- 高效能发光：QD-LED 的高效率发光特性确保服装在各种光照条件下的可视性。
- 多样化显示：通过控制 QD-LED 的发光颜色和图案，实现服装的个性化显示。
- 智能控制：集成传感器和控制系统，使服装能够根据环境和用户需求自动调整显示效果。
- 环保材料：尽量选择环保材料，减少对环境的影响。

通过深入理解市场需求、技术发展以及面临的挑战，我们的智能服装设计项目旨在提供一种创新的解决方案，满足现代消费者对于智能、个性化和环保的需求。

2 设计指标

设计目标

本项目旨在设计一款集成 QDLED 技术的智能服饰，该服饰将利用 QDLED 的高效率发光和多种颜色发光的优势，结合柔性材料和多样化的制造工艺，实现服饰的智能化和个性化。以下是本项目的主要设计目标：

发光效率和颜色多样性

QDLED 技术以其高效率发光和多种颜色发光的优势而著称。设计指标需确保服饰能够根据不同的应用场景需求，调整发光效率和颜色显示。具体指标包括：

- 发光效率：服饰需达到高发光效率，确保在不同环境下的可见性。
- 颜色范围：服饰应能达到宽色域显示，覆盖至少 90% 的 NTSC 色域。

柔性材料集成

考虑到服饰的舒适性和实用性，QDLED 器件需集成到柔性材料中。设计指标应包括：

- 材料柔韧性：所选材料应能承受至少正常服饰的弯曲和拉伸。
- 材料耐久性：材料应能承受常见的洗涤条件，确保长期使用的可靠性。

工艺多样性

QDLED 器件的制造工艺需适应不同的服饰设计。设计指标应考虑：

- 工艺兼容性：QDLED 器件应能通过多种不同的制造工艺集成到服饰中。
- 定制化能力：工艺应支持从小型图案到大面积显示的定制化需求。

场景适应性

服饰需根据不同的应用场景调整显示内容。设计指标应包括：

- 场景识别：服饰应能识别并适应各种不同的应用场景。
- 显示内容适应性：服饰应根据场景自动调整显示内容。

成本效益分析

考虑到成本因素，设计指标应确保产品的市场竞争力：

- 成本控制：单件服饰的生产成本应控制在合理范围内。
- 市场定位：产品应定位于中高端市场，以确保合理的利润空间。

工艺可行性

工艺的可行性直接影响产品的量产和质量。设计指标应包括：

- 量产能力：工艺应支持大规模生产，确保产品的稳定性和一致性。
- 缺陷率：产品缺陷率应控制在合理范围内，确保产品质量。

环境影响

考虑到环境影响，设计指标应确保产品的可持续性：

- 材料可回收性：使用绿色环保材料，确保产品的可回收性。
- 能源效率：服饰的能源消耗应控制在合理范围内，减少能源浪费，提高能源利用率。

社会效益

最后，设计指标还应考虑产品的社会效益：

- 安全性：服饰应通过所有相关的安全测试，确保用户安全。
- 社会接受度：通过市场调研，确保产品的社会接受度足够高，有充分的市场需求。

3 QD-LED 介绍

3.1 QD-LED 概述

QD-LED 技术，即量子点发光二极管技术，是一种新型的显示技术，它结合了量子点的优良光电特性与 LED 的高效能特性。量子点是半导体纳米晶体，具有独特的光电性质，能够根据量子点的大小发射特定波长的光。这种技术使得 QD-LED 在显示领域具有革命性的潜力。

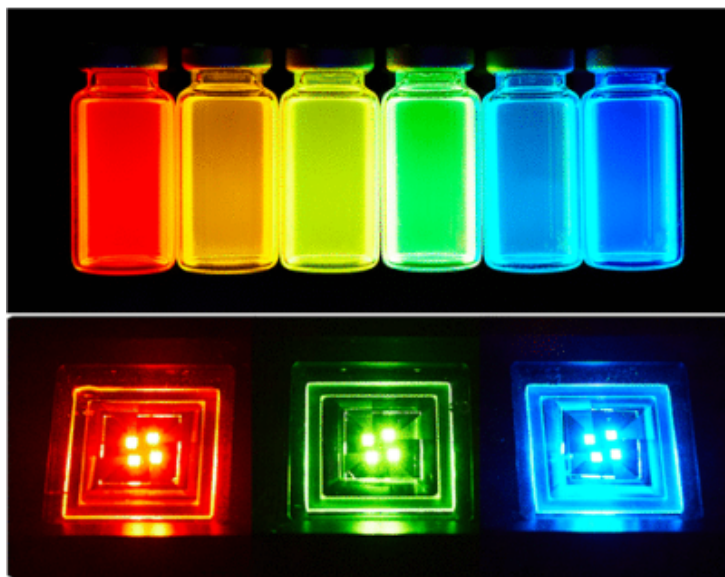


图 1: 量子点发光 [1]

工作原理

QD-LED 的工作原理基于量子点的光电效应。当量子点受到电或光的刺激时，它们会发出光。量子点的大小决定了发出光的颜色，这使得 QD-LED 能够发出从蓝光到红光的广泛颜色范围。这种颜色的精确控制是传统 LED 技术难以实现的。

技术优势

QD-LED 技术具有多项优势，包括：

- **高色纯度：** QD-LED 能够产生高色纯度的光，这对于显示设备来说至关重要。

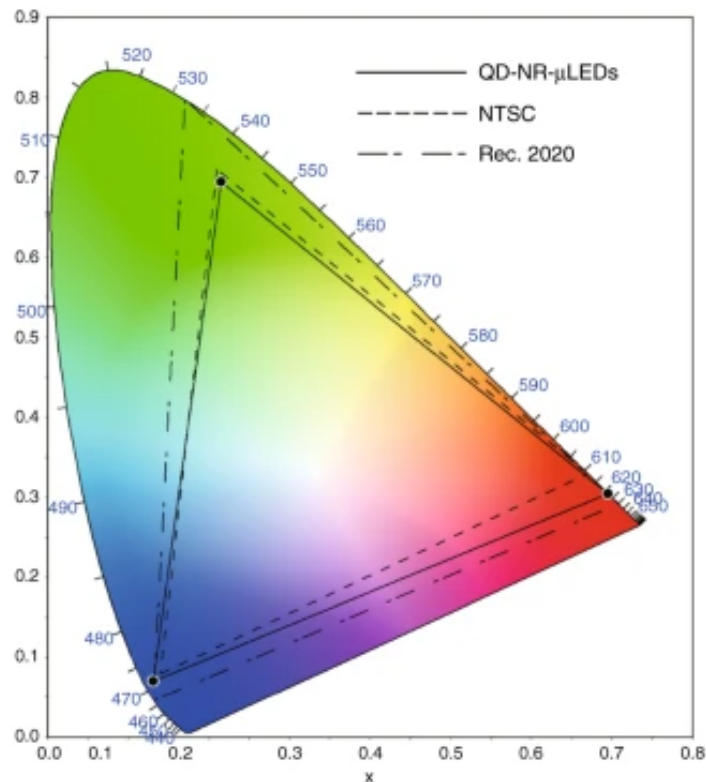


图 2: QD-LED 的色域优势 [2]

- **宽色域：**由于量子点可以精确控制发射光的颜色，QD-LED 能够覆盖更宽的色域，提供更丰富的色彩表现。
- **低能耗：**相比于传统 LED，QD-LED 在某些应用中可以展现出更低的能耗。
- **长寿命：**QD-LED 的使用寿命长，这对于需要长时间运行的显示设备来说是一个巨大的优势。
- **可调谐性：**量子点的大小可以通过化学方法调整，从而实现不同颜色光的发射。

应用前景

QD-LED 技术的应用前景广阔，包括但不限于：

- **显示技术：**提供更高质量的显示效果，特别是在电视和手机屏幕上。
- **照明技术：**提供更高效、更环保的照明解决方案。
- **智能服饰：**集成到服饰中，实现动态的、可编程的光效，为时尚和功能性提供新的可能性。

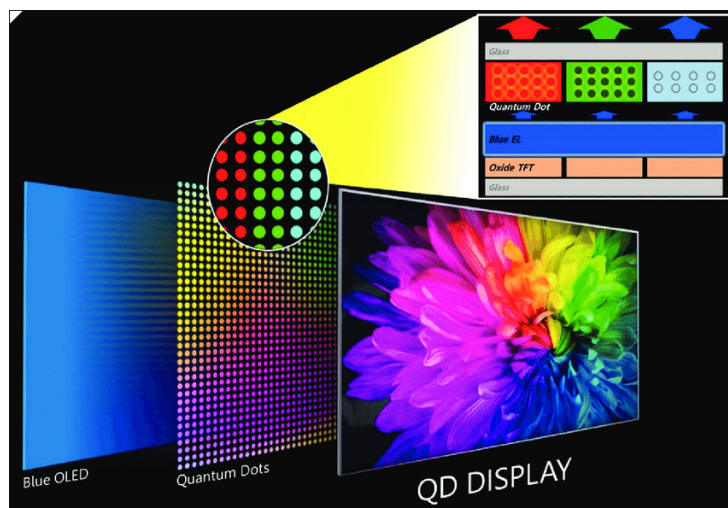


图 3: QD-LED 技术的应用

QD-LED 技术的这些特性使其成为智能服饰领域的理想选择，它不仅能够提供视觉上的吸引力，还能够通过智能控制实现更多的功能性。

3.2 QD-LED 工作原理

量子点发光二极管（QD-LED）是一种先进的显示技术，它利用量子点的尺寸依赖发光特性来实现高效率和高色纯度的发光。以下是 QD-LED 工作原理的关键点：

量子点的光电特性

量子点是半导体纳米晶体，其独特的光电特性来源于量子限制效应。当量子点的尺寸减小时，其能级分裂，导致发射光的波长与量子点的尺寸直接相关。这种尺寸依赖性使得 QD-LED 能够通过精确控制量子点的尺寸来发射特定波长的光。

此外，不同材料的量子点具有不同的能带结构，这也影响了发射光的波长。通过选择不同的材料和控制量子点的尺寸，可以实现从蓝光到红光的广泛颜色范围 [3]。

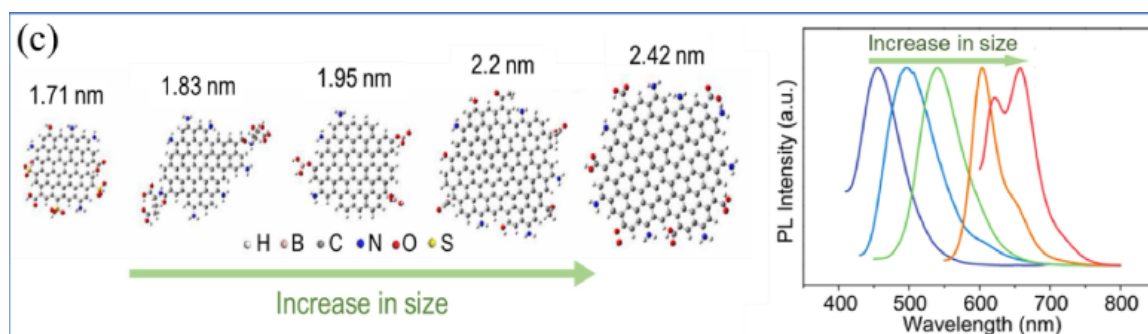


图 4: 量子点尺寸与发射光波长的关系

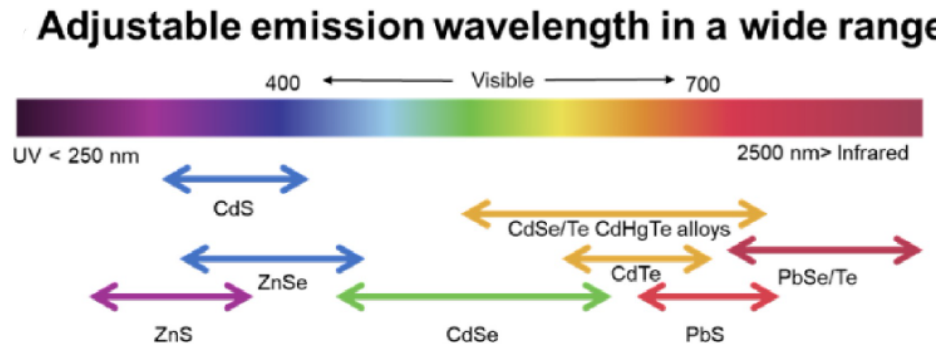


图 5: 不同材料的量子点发光波长范围 [3]

QD-LED 的基本结构

QD-LED 的基本结构包括以下几个部分：

- 阳极 (Anode): 通常是透明的导电层, 允许光线透过。
- 空穴注入层 (Hole Injection Layer): 促进空穴从阳极注入到量子点层。
- 量子点发光层 (Quantum Dot Emissive Layer): 包含量子点, 是发光的核心区域。
- 电子注入层 (Electron Injection Layer): 促进电子从阴极注入到量子点层。
- 阴极 (Cathode): 通常是金属层, 用于电子的注入。

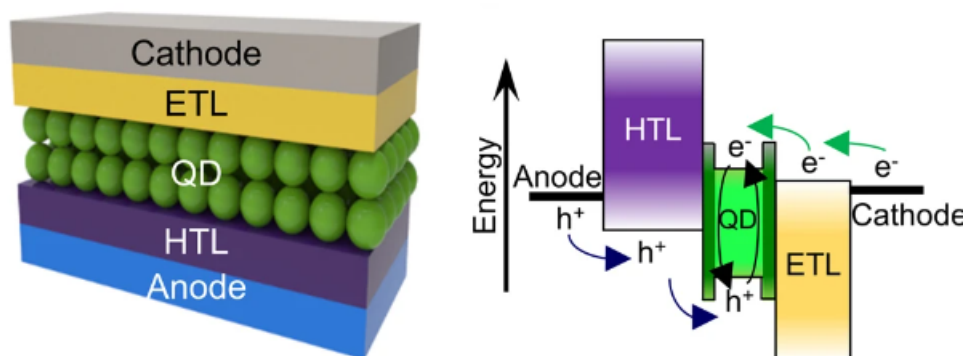


图 6: QD-LED 的基本结构 [4]

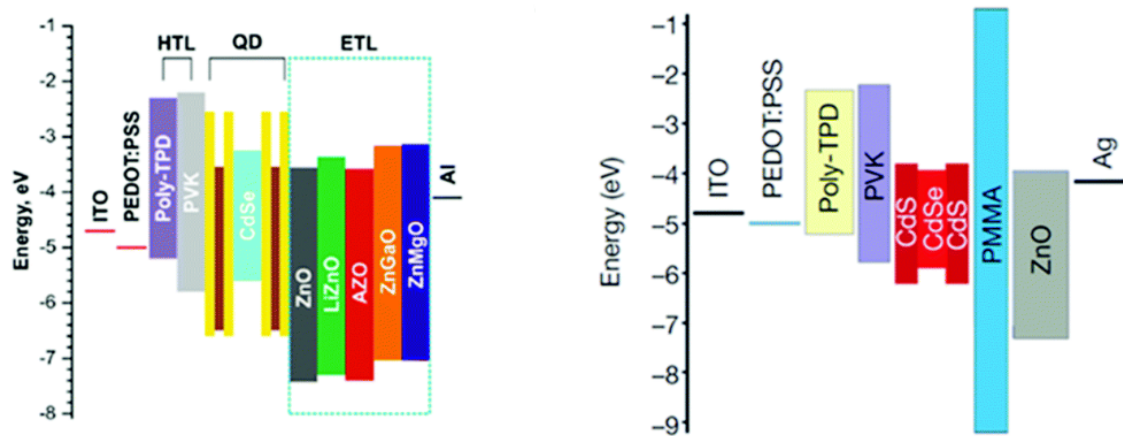


图 7: 不同材料下的 QD-LED 结构示意图 [5]

电致发光过程

在 QD-LED 中, 当施加电压时, 电子从阴极注入并通过电子注入层, 空穴从阳极注入并通过空穴注入层。这些电子和空穴在量子点发光层中相遇并复合, 释放出能量, 该能量以光的形式发射出来。这个过程被称为电致发光 (Electroluminescence)。

通过精确控制量子点的尺寸和化学组成, QD-LED 能够实现全色谱的发光, 覆盖从蓝光到红光的广泛范围, 这为显示技术提供了前所未有的色彩表现力。

4 QD-LED 器件设计

量子点发光二极管（QD-LED）技术以其卓越的显示性能和潜在的制造优势，正在成为显示技术领域的一个热点。QD-LED 器件设计不仅涉及对量子点材料的深入理解，还包括对器件结构的精心设计和器件参数的精确调控。本节将详细介绍 QD-LED 器件的设计指标、结构与材料选择，以及器件参数设计的关键要素。

QD-LED 器件设计的目标是实现高效率、高亮度、宽色域和长寿命的发光性能。为了达到这些目标，设计过程中需要考虑多种因素，包括量子点的合成、器件结构的优化、材料的选择以及器件参数的调整。以下是 QD-LED 器件设计的几个关键组成部分：

4.1 器件设计指标

QD-LED 器件的设计指标是确保其性能满足特定应用需求的关键。以下是主要的设计指标：

光学性能要求

- **亮度 (Luminance):** 设计目标为最高亮度 $\geq 500 \text{ cd/m}^2$ ，确保在户外环境下的可见性，满足夜间或低能见度条件下的安全需求。
- **色域 (Color Gamut):** QD-LED 应能够显示红色、绿色、蓝色及其混合色，目标覆盖至少 70% NTSC 色域，以满足安全警示和个性化表达的需求。
- **视角 (Viewing Angle):** 设计要求视角 $\geq 140^\circ$ ，确保在不同角度下均能清晰可见。
- **对比度 (Contrast Ratio):** 设计目标对比度 $\geq 1000 : 1$ ，以提高显示内容的清晰度和可读性。
- **响应时间 (Response Time):** 设计要求响应时间 $\leq 10 \text{ ms}$ ，以确保动态显示效果的流畅性。

电学性能要求

- **工作电压:** QD-LED 的工作电压设计在 3.3V 至 5V 之间，以适应不同的电源条件。
- **功耗:** 设计应优先考虑低功耗，以提高能效并延长电池使用寿命。
- **驱动方式:** 采用恒流驱动方式，支持亮度调节，以适应不同场景的需求。
- **电源效率:** 设计目标电源效率 $\geq 85\%$ ，以减少能源浪费。
- **电磁兼容性 (EMC):** 设计应符合相关电磁兼容性标准，确保在各种环境下的正常工作。

机械性能要求

- **柔性:** 设计应支持可弯曲、可折叠的特性，以适应不同的应用场景。
- **耐久性:** 设计应能耐受常见的洗涤条件，确保长期使用的可靠性。
- **抗拉强度:** 设计应具备足够的抗拉强度，确保在日常使用中的耐用性。
- **耐磨性:** 设计应具备良好的耐磨性，以延长使用寿命。

集成性能要求

- **集成:** 设计应允许 QD-LED 器件集成到织物中，为智能服饰等应用提供可能性。
- **兼容性:** 设计应与现有的智能服饰系统兼容，确保易于集成和使用。
- **模块化:** 设计应支持模块化集成，以便于维护和升级。

经济性能要求

- **成本:** 设计应考虑低成本，以提高市场竞争力。
- **生产效率:** 设计应考虑高效的生产工艺，以降低制造成本。
- **市场定位:** 设计应定位于中高端市场，以确保合理的利润空间。

环境和社会效益要求

- **环保:** 设计应尽量使用环保材料，减少对环境的影响。
- **可回收性:** 设计应考虑材料的可回收性，以减少废弃物。
- **安全性:** 设计应通过所有相关的安全测试，确保用户安全。
- **社会接受度:** 通过市场调研，确保产品的社会接受度高于 80%。

通过这些详细的设计指标，QD-LED 器件将能够提供卓越的性能，同时满足市场和环境的需求

4.2 器件结构与材料

器件结构

QD-LED 器件的结构设计是实现其高性能发光特性的关键。一个典型的 QD-LED 器件结构包括以下几个主要部分：

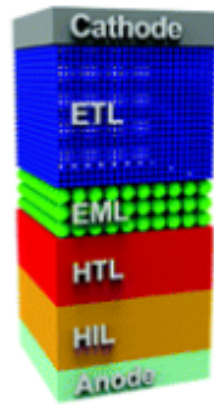


图 8: QD-LED 器件结构示意图 [5]

- **基底 (Substrate):** 通常由玻璃或塑料构成，用于支撑整个器件结构。
- **阳极 (Anode):** 通常由透明的导电材料构成，如 ITO（铟锡氧化物），其作用是允许光线透过并作为电流的注入端。
- **空穴注入层 (HIL - Hole Injection Layer):** 位于阳极之下，其功能是促进空穴从阳极注入到量子点发光层。这一层通常由有机小分子或聚合物构成，具有良好的空穴传输性能。
- **空穴传输层 (HTL - Hole Transport Layer):** 紧邻空穴注入层，负责将空穴从空穴注入层传输到量子点发光层。
- **量子点发光层 (QD Layer):** 这是 QD-LED 器件的核心部分，由量子点材料构成。量子点的尺寸和组成决定了发射光的颜色。这一层的设计需要精确控制量子点的尺寸和分布，以实现最佳发光效率和颜色稳定性。
- **电子传输层 (ETL - Electron Transport Layer):** 位于量子点发光层之下，其作用是促进电子从阴极注入到量子点发光层，并阻止空穴的过度注入，从而提高器件的发光效率和寿命。
- **阴极 (Cathode):** 通常由低功函数的金属构成，如钙、铝或其合金，用于电子的注入。

图9展示了 QD-LED 器件的横截面，其中包含了 LiF/Al 作为阴极，TPBi 作为空穴传输层，InP/ZnSe/ZnS 量子点作为发光层，Poly-TPD 作为电子传输层，PEDOT:PSS 作为空穴注入层，以及 ITO 作为阳极和 PEN 作为衬底。这些层共同工作，实现了高效的电致发光。[6]

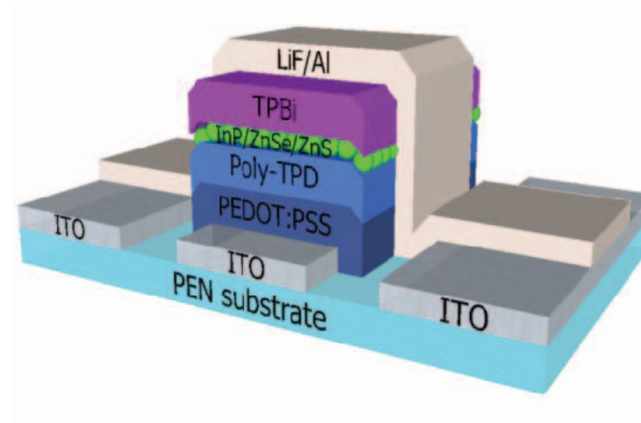


图 9: QD-LED 器件横截面示意图 [6]

材料选型

基底材料

基底材料的选择取决于器件的尺寸、形状和集成需求。对于 QD-LED 器件，常用的基底材料包括玻璃、塑料和聚合物。考虑到成本、可加工性和机械性能，可以选择聚酰亚胺（PEN）作为基底材料。PEN 具有优异的机械性能、耐化学性和良好的热稳定性，适合用于柔性电子器件。

阳极材料

电极材料的选择取决于器件的工作电压和电流密度。对于 QD-LED 器件，常用的电极材料包括金属、金属氧化物和导电聚合物。考虑到成本、导电性和机械性能，可以选择 ITO（铟锡氧化物）作为阳极材料。ITO 具有良好的导电性和机械性能，同时具有较低的成本。

HIL 和 HTL 材料

首先根据下表 [1]，考虑工艺和器件的成熟性，优先选择传统的正常结构中有有机空穴传输材料（normal structure organic hole transport materials）。再综合考虑亮度，能效，寿命等因素，综合后选择 PEDOT/TFB:CBP 作为 HIL 和 HTL 材料。

group	(HIL)/HTL	HOMO (eV) ^a	EQE (%)	max. lum (cd/m ²)	lifetime	year	ref
[inverted structure]	CBP/(MoO ₃)		7.3	23 040	1 000 h ^b	2012	31
	TPBi/CBP/(MoO ₃)		13.1 cd A ⁻¹			2014	128
	mCP/CBP/(MoO ₃)		15.6 cd A ⁻¹	37 850		2015	83
	CBP:BCBP/(MoO ₃)		18.3	410 000	2 140 000 h ^c	2020	129
	CBP/TCTA/NPB/(HATCN)	6.0–5.4	11		864 000 h ^d	2020	130
	CBP/TCTA/TAPC/(MoO ₃)	6.0–5.5	11		864 000 h ^d	2021	131
	NPB/(HATCN)	5.5	18.0	50 000		2013	32
[normal structure] organic hole transport materials	CzSi/TCTA/(MoO ₃)	6		17 400	150 min ^e	2019	75
	PEDOT/PS-TPD-PFCB	5.3	0.8	100		2006	72
	PEDOT/2-TPD-TCTA-VB		2.6	7 480		2009	132
	PEDOT/cross-link-TFB		8.9	119 600		2017	133
	PEDOT/TC-PDA-CBP	5.68	8.2	23 895	19.5 h ^f	2020	85
	PEDOT/PVK:Li-TFSI		11.5			2017	134
	PEDOT/PVK/TPD, TCTA, CBP	5.8	6.5	23 900		2013	89
	PEDOT/PVK/TFB		22.1	98 000		2018	73
	PEDOT/PVK/TPD		13.4	45 310		2018	135
	PEDOT/PVK:OXD-7	6.5	0.32	1 672		2020	136
	PEDOT/TFB	5.4	15.1		2 200 000 h ^d	2018	74
	PEDOT/TFB	5.4	22.9	614 000		2019	86
	PEDOT/TFB:CBP-V	6.2	22.3		148.9 h ^g	2020	137
	PEDOT/PFI	5.2–5.94	15.9	53 844	5 000 h ^h	2019	140
	PEDOT/TFB:CBP		30.0	963 433		2022	15
	PEDOT/PF8Cz	5.4	28.7	200 000	2 570 000 h ^d	2022	16
			21.9	25 000	24 400 h ^d		
[normal structure] inorganic hole injection/transport materials	NiO	6.7	0.18			2006	141
	NiO/p-TPD		2.45 cd A ⁻¹	1 000		2014	142
	NiO/Al ₂ O ₃		20.5 cd A ⁻¹	20 000		2017	143
	NiMgO/MgO	9.1	1.5	40 000	24 724 h ^d	2019	144
	Fe-NiO/TFB	5.7–6.5	3.8	27 624	11 490 h ^d	2020	145
	Cl@TPA	5.39	9.3	32 595	104 000 h ^d	2021	146
	V ₂ O ₅ /PVK		7.3	11 908	14 000 s ⁱ	2017	147
	Cu ₂ SnS ₃ -Ga ₂ O ₃ /PVK	5.4	14.9	73 820		2018	148

^aAbsolute value of the energy level. ^bTime for 50% decrease at 500 nit. ^cTime for 30% decrease at 100 nit, time for 50% decrease. ^dAt 100 nit. ^eAt 300 nit. ^fAt 1000 nit. ^gAt 2000 nit. ^hAt 600 nit. ⁱAt 1200 nit.

图 10: 空穴传输材料的性能比较 [1]

QD 材料

QD 主流的材料有 CdSe, CdTe, InP 等, 可以分为 base-Cd 和 cd-free 两种类型。下面是两种类型的性能对比。[1]

综合考虑能效和稳定性, 选择 InP/ZnSe/ZnS 一族的量子点作为红色 LED 的发光材料 [7]。选择 ZnCdSe/ZnS 一族的量子点作为蓝色 LED 的发光材料。选择 CdZnS/ZnS 一族的量子点作为绿色 LED 的发光材料。

QD structure	diameter (nm)	sol. QY (%)	film QY (%)	EQE (%)	peak (nm)	note	year	ref
CdSe@ZnS	9.5	42	18	0.5	518	21.4 ns ^a /4.9 ns ^b	2014	91
CdSe@ZnS/ZnS	12.7	83	71	12.6	516	27.2 ns ^a /9.2 ns ^b		
CdSe/ZnS	~5	>80		0.5	544	63% ^c	2016	93
CdSe@ZnS/ZnS	~13	>80		3.2	536	26% ^c		
ZnCdSe/ZnS	5.0	63		5	538	15.5 ns ^a /10.1 ns ^b	2018	94
ZnCdSe/ZnS	8.4	96		10	527	11.5 ns ^a /8.39 ns ^b		
ZnCdSe/ZnS	11.8	95		17	517	10.7 ns ^a /8.7 ns ^b		
ZnCdSe/ZnS	~15	85		7	515	11.0 ns ^a /9.44 ns ^b		
CdSe/2CdS/2ZnS	5.6	70		0.03			2012	95
CdSe/CdS	6.2	50		0.005	620			
CdSe/CdS	10.5	20		0.06				
CdSe/CdS	13.4	15		0.11				
CdZnSe/ZnSe-rich/ZnS	8			12.0	625	T ^{1/2} > 300 000 h	2015	35
CdZnSeS/CdS-rich/ZnS	10	70		7.5	534			
CdZnSeS/ZnSe-rich/ZnS	7-8	75		14.5	537	T ^{1/2} > 900 000 h		
CdZnS/ZnS	8			10.7	455	T ^{1/2} > 1000 h	2014	96
CdSe/CdZnS	9	81	25	3.5	639	T ^{1/2} = 2.3 h		
CdSe/CdZnS	11	80	43	5.4	633	T ^{1/2} = 5.7 h		
CdSe/CdZnS	13.2	81	50	6.7	633	T ^{1/2} = 8.2 h		
CdSe/CdZnS (Cd-rich)	16.6	80	55	7.4	626	T ^{1/2} = 10.1 h		
ZnCdSe/ZnS	3.8	60	30	4.5			2018	97
ZnCdSe/ZnS	6.6	73	38	7.0	550			
ZnCdSe/ZnS	11.8	90	65	11.0	~530			
ZnCdSe/ZnS	15.1	91	79	15.4	517	121 000 cd m ^{-2a}		
blue ZnCdS/ZnS	~15	93		11.9	445	10 400 cd m ^{-2a}	2018	98
CdSe/CdZnSe/ZnSeS	18.4	72		13.5	611			
CdSe/CdZnSe (C/S)	16.7	55		3.7	639			

^aPL lifetime for solution. ^bPL lifetime for film. ^cInitial brightness measured at 200 mA cm⁻². ^dT₅₀ (half-life) at 100 nit. ^eBrightness.

图 11: base-Cd 材料性能 [1]

Table 5. LED Characteristics of Cd-free QDs

QD EML	diameter (nm)	sol. QY (%)	film QY (%)	EQE (%)	peak (nm)	note	year	ref
InP@ZnSe _{0.8} S _{0.2}	3.9	55					2011	39
InP@ZnSe _{0.1} S _{0.9}	4.3	45						
InP@ZnSe _{0.05} S _{0.95}	5.3	45		0.008	532			
InP@ZnSeS (gradient)	3.3	81		0.48	520		2013	40
InP@ZnSeS (gradient)	4.5	72		3.46	518			
InP/ZnSe/ZnS-thin	6.5			3.32 cd/A	555	1960 cd m ^{-2a} 55 s ^b	2014	110
InP/ZnSe/ZnS-thick	7.3			4.65 cd/A	555	2430 cd m ^{-2a} 123 s ^b		
InP/ZnSe	6.8	46					2018	42
InP/ZnSe/ZnS-thick	15	73	43	6.6	607	55.6 ns ^c /38.7 ns ^d		
InP/ZnSe/ZnS-thin	9.4	61	25			43.4 ns ^c /26.6 ns ^d		
InP/GaP/ZnS	4.5	80	10	2.1			2019	78
InP/GaP/ZnS//ZnS	7.2	70	30	6.3	527	2938 cd m ^{-2a}		
InP/ZnSe (thin)	3.26	60					2019	43
InP/ZnSe/ZnS	7.8	93		12.2	630	10 000 cd m ^{-2a}		
InP/ZnSe/ZnS-1	7.4	98	69	8	639	1.3 h ^e	2019	44
InP/ZnSe/ZnS-2	9.2	92	84	10	631	6.2 h ^e		
InP/ZnSe/ZnS-3	10.8	75		7	632	4.7 h ^e		
InP/ZnSe/ZnS-1R	7.7	100		9	638	2.3 h ^e		
InP/ZnSe/ZnS-2R	9.2	100		13	635	12.6 h ^e		
InP/ZnSe/ZnS-3R	10.8	100	93	18.0	633	3000 h ^f		
InP/ZnSe/ZnS-3R-HA				21.4		4300 h ^f		
InP/ZnSeS/ZnS	6.0	>80		3.78	~537	2504 cd m ^{-2a}	2019	114
InP/ZnSeS/ZnS	6.7	>80		3.92	~643	6881 cd m ^{-2a}		

图 12: Cd-free 材料性能 [1]

ETL 材料

对于电子传输层 (ETL)，常用的材料包括 TPBi、ZnO、ZnMgO 等。参考最新研究，选择 ZnMgO 作为 ETL 材料，以提高器件的电子传输性能和稳定性。

阴极材料

阴极材料的选择取决于器件的工作电压和电流密度。对于 QD-LED 器件，常用的阴极材料包括金属、金属氧化物和导电聚合物。考虑到成本、导电性和机械性能，可以选择 LiF/Al 作为阴极材料。LiF/Al 具有较低的工作电压和较高的电流密度，适合用于 QD-LED 器件。

4.3 器件参数设计

确定好器件的结构和材料后,接下来需要设计器件的参数,以实现最佳的发光性能。QDLED 器件的核心是量子点发光层,其参数设计是实现高效率、高亮度和宽色域发光的关键。目前材料已经确定为 InP/ZnSe/ZnS 一族的量子点,下面是量子点的参数选定。

量子点尺寸

量子点的尺寸决定了其发射光的波长,因此需要精确控制量子点的尺寸。根据量子点的尺寸与发射光的关系,可以选择合适的量子点尺寸,以实现所需的发光颜色。

量子点的尺寸与发射光的关系,受到量子点的材料和结构等许多因素的影响。因此,需要通过实验来确定量子点尺寸与发射光的关系,并选择合适的量子点尺寸。

根据材料和前面表格中可以选出的大致的参考值,具体的量子点尺寸还需要进一步的实验验证。对于红色 LED 和对应的 InP/ZnSe/ZnS 材料,可以选择量子点的直径为 7.8nm 左右。对于蓝色 LED 和对应的 ZnCdSe/ZnS 材料,可以选择量子点的直径为 11.8nm 左右。对于绿色 LED 和对应的 CdZnS/ZnS 材料,可以选择量子点的直径为 8nm 左右。

器件电压

电压是影响量子点发光波长和性能的另一个关键因素。通过调整器件的工作电压,可以改变量子点的发光波长和亮度。研究表明,随着电压的增加,量子点的发光波长可能会发生蓝移或红移,这取决于量子点的材料和结构。此外,电压还影响量子点的发光效率和稳定性。因此,在设计 QD-LED 器件时,需要仔细选择和优化工作电压,以实现最佳的发光性能。

下图是某器件的电压与发光强度的关系 [8]。作为参考同时结合前面的设计指标,可以选择绿色和蓝色 LED 的工作电压为 3.3V,红色 LED 的工作电压为 5V 左右。具体的工作电压还需要通过制造和测试来进一步确定。

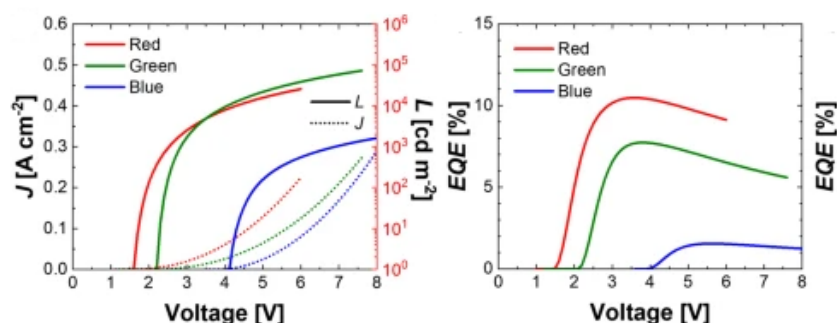


图 13: 量子点的发光性能与电压关系 [8]

5 QD-LED 智能服装设计

QD-LED 智能服装设计旨在将量子点发光二极管技术与智能服饰相结合，实现高效能、个性化和智能化的穿戴体验。以下是 QD-LED 智能服装设计的关键要素：

5.1 设计理念

QD-LED 智能服装设计核心理念是通过集成 QD-LED 技术，实现服装的智能化和个性化。具体包括：

- **高效能发光：**利用 QD-LED 的高效率发光特性，确保服装在各种光照条件下的可视性。
- **多样化显示：**通过控制 QD-LED 的发光颜色和图案，实现服装的个性化显示。
- **智能控制：**集成传感器和控制系统，使服装能够根据环境和用户需求自动调整显示效果。

5.2 设计目标

QD-LED 智能服装设计的主要目标包括：

- **舒适性：**选择柔性材料和轻量化设计，确保穿戴的舒适性。
- **耐用性：**设计应能耐受日常使用和洗涤，确保长期使用的可靠性。
- **智能化：**集成传感器和控制系统，实现智能化的显示和交互功能。
- **美观性：**通过精美的设计和多样化的显示效果，提高服装的美观性和时尚感。

5.3 设计方案

材料选择

- **基底材料：**选择柔性且耐用的材料，如聚酰亚胺（PEN），以确保服装的舒适性和耐用性。
- **QD-LED 材料：**选择高效能的量子点材料，如 InP/ZnSe/ZnS，用于实现高亮度和宽色域的发光效果。
- **封装材料：**选择透明且防水的封装材料，保护 QD-LED 器件免受环境影响。

结构设计

- **QD-LED 集成：**将 QD-LED 器件集成到服装的关键部位，如胸前、袖口等，实现最佳的显示效果。
- **电路设计：**设计灵活的电路布局，确保电源和控制信号能够稳定传输。
- **模块化设计：**采用模块化设计，便于维护和升级。

智能控制系统

- **传感器集成：**集成环境光传感器、温度传感器等，实现智能化的显示控制。
- **控制系统：**设计基于微控制器的控制系统，实现对 QD-LED 显示效果的精确控制。
- **无线通信：**集成蓝牙或 Wi-Fi 模块，实现与手机等设备的无线通信，便于用户控制和数据传输。

5.4 应用场景

QD-LED 智能服装可以应用于多种场景，包括但不限于：

- **运动健身：**通过显示运动数据和状态，提高运动的安全性和趣味性。
- **时尚展示：**通过个性化的显示效果，提升时尚感和吸引力。
- **安全警示：**在夜间或低能见度条件下，通过高亮度显示提高安全性。
- **医疗监测：**集成生理参数传感器，实现健康监测和数据记录。

5.5 设计挑战与解决方案

- **柔性与耐用性：**通过选择高性能的柔性材料和优化器件结构，确保服装的柔性和耐用性。
- **功耗与续航：**通过优化电路设计和选择高效能的 QD-LED 材料，降低功耗并延长电池续航时间。
- **环境适应性：**通过选择防水、防尘的封装材料，提高服装在各种环境下的适应性。
- **智能控制：**通过集成先进的传感器和控制系统，实现智能化的显示和交互功能。

通过以上设计，QD-LED 智能服装将能够提供卓越的性能和用户体验，满足多样化的应用需求，并推动智能服饰领域的发展。

6 产品工艺与制造

在 QD-LED 智能服装的设计中，产品工艺与制造是实现设计理念和性能目标的关键环节。本节将详细介绍 QD-LED 智能服装的生产工艺和制造流程，包括量子点的合成、器件的封装、以及智能控制系统的集成。通过精心的工艺设计和严格的制造控制，确保每一件智能服装都能达到预期的性能标准。

6.1 量子点合成

量子点的合成是 QD-LED 智能服装制造过程中的首要步骤，它直接影响到量子点的光学性能和器件的发光效率。量子点的合成方法多样，包括化学气相沉积、溶剂热法、微波辅助合成等。以下是量子点合成的关键步骤和考虑因素：

- **选择合成方法：**根据量子点的类型和所需的特性，选择合适的合成方法。例如，InP/ZnSe/ZnS 量子点可能更适合采用化学气相沉积法合成。
- **控制尺寸和形状：**量子点的尺寸和形状对其发光波长和效率有显著影响。通过精确控制合成条件，如温度、反应时间和前驱体浓度，可以调控量子点的尺寸和形状。
- **表面配体的选择：**量子点表面配体不仅影响量子点的稳定性和溶解性，还关系到量子点在器件中的性能。选择合适的表面配体，如油酸、三辛基磷等，对提高量子点的发光效率和稳定性至关重要。
- **纯化和功能化：**合成后的量子点需要经过纯化处理，以去除未反应的前驱体和副产品。此外，通过功能化处理，可以改善量子点在器件中的电荷传输性能。
- **质量控制：**在量子点合成过程中，需要进行严格的质量控制，确保量子点的尺寸分布、形状和表面状态符合器件制造的要求。

量子点合成的优化是实现高性能 QD-LED 智能服装的基础。通过精确控制合成参数，可以制备出具有优异光电性能的量子点，为后续的器件制造和应用打下坚实基础。

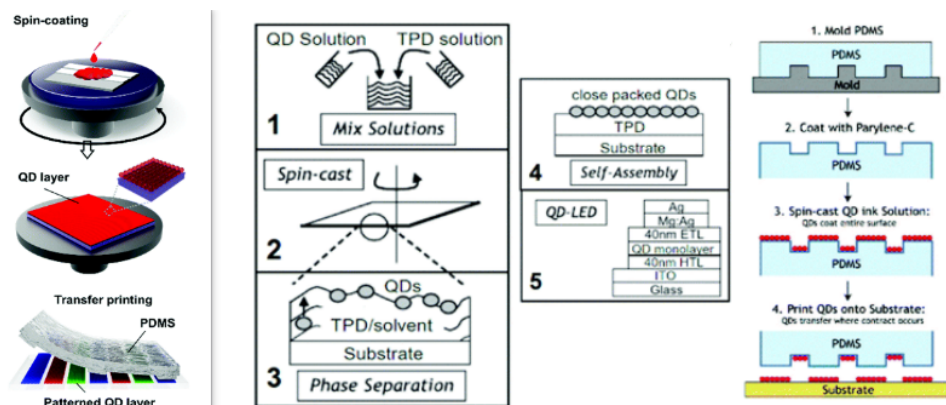


图 14: QD 层量子点的制备过程，包括混合溶液、旋涂、相分离、自组装以及最终的 QD-LED 结构。[5]

图14展示了 QD 层量子点的制备过程，包括混合量子点溶液和 TPD 溶液、旋涂、相分离、自组装以及最终形成 QD-LED 结构的步骤。这些步骤对于实现量子点的均匀分布和高效率发光至关重要。

在量子点合成过程中，还需要考虑量子点的表面修饰，以提高其在器件中的性能。例如，通过表面修饰可以改善量子点的电荷注入效率，减少非辐射复合，从而提高器件的发光效率和稳定性。

此外，量子点的合成还涉及到环境和成本因素。因此，开发环境友好、成本效益高的量子点合成方法对于 QD-LED 智能服装的商业化生产具有重要意义。

6.2 QD-LED 器件制备

QD-LED 器件的制备是一个精细的过程，涉及多个关键步骤，以确保器件的高性能和稳定性。以下是 QD-LED 器件制备的详细步骤：

清洗 ITO 衬底

首先，对预先图案化的氧化铟锡 (ITO) 玻璃衬底进行彻底清洗，以去除表面的有机污染物和无机残留物。清洗过程包括使用去离子水、丙酮和异丙醇进行超声清洗，然后在紫外臭氧下处理，以改善 ITO 的功函数。

沉积空穴传输层 (HTL)

随后，通过旋涂法在 ITO 衬底上沉积空穴传输层 (HTL)。常用的 HTL 材料包括 PEDOT:PSS 或聚三苯胺衍生物。将 HTL 溶液旋涂在 ITO 衬底上后，在控制的气氛和温度下进行退火，以形成均匀的薄膜。

沉积量子点发光层 (QD Layer)

接下来, 将量子点溶液通过旋涂法沉积在 HTL 薄膜上, 形成 QD 发光层。旋涂参数, 如转速、加速度和时间, 以及溶剂的选择, 对量子点薄膜的均匀性和质量至关重要。旋涂后, 通常在惰性气氛下进行退火, 以去除残留溶剂并提高薄膜质量。

沉积电子传输层 (ETL)

在 QD 发光层之上, 沉积电子传输层 (ETL)。ETL 材料可以是金属氧化物, 如 ZnO 或 TiO₂, 或者是有机小分子材料。沉积方法可能包括旋涂法或真空蒸镀法。ETL 的作用是传输电子到 QD 层, 并阻挡空穴泄漏到阴极。

沉积金属阴极

最后, 通过真空蒸镀在高真空条件下沉积金属阴极。常用的阴极材料包括钙 (Ca)、镁 (Mg) 或铝 (Al)。在金属阴极和 ETL 之间可能插入一层薄的氟化锂 (LiF) 以改善电子注入。

封装

在完成所有薄膜的沉积后, 为了提高器件的稳定性和寿命, 通常需要进行封装。封装方法包括使用紫外固化环氧树脂或玻璃盖板, 并在惰性气氛下进行密封。

性能测试

整个器件制造过程需要在洁净的环境中进行。制备完成后, 对 QD-LED 器件进行电致发光性能测试, 包括测量电流密度-电压-亮度 (J-V-L) 特性、发光光谱和效率等, 以评估器件的性能。

通过以上步骤, QD-LED 器件的制备过程确保了器件的高性能和稳定性, 为 QD-LED 智能服装的应用提供了坚实的基础。

6.3 智能服装制造

智能服装的制造是一个高度技术化的过程, 它涉及到 QD-LED 器件、纤维设备、导电线以及系统架构的精确集成。以下是智能服装制造的关键步骤:

设备集成

通过自动编织技术将设备集成到纺织品中, 以实现所需的系统架构。这一过程涉及将 QD-LED 器件和导电线分别沿纬向和经向插入纺织品中, 与预先设计的电路图相对应。例如, 利用可拉伸的鞘导电纤维, 可以在拉伸的超弹纤维芯材上包裹定向排列的碳纳米管, 制备可拉伸的芯导电纤维。

导电线互连

QD-LED 器件和纺织品中的导电线之间的互连是通过使用 980 nm 红外激光的两步非接触式焊接实现的。第一步需要通过注射器将导电银粘合剂分配到目标位置。第二步是通过激光进行固化，然后在 1 秒内使银胶在低于 150°C 的温度下固化，这是避免银胶粘着的最佳条件。

系统架构形成

在完成所有薄膜的沉积后，为了提高 QD-LED 器件的稳定性和寿命，通常需要进行封装。封装方法包括使用紫外固化环氧树脂或玻璃盖板，并在惰性气氛下进行密封，以防止水和氧气进入器件内部。整个器件制造过程需要在洁净的环境中进行，以避免灰尘和杂质对器件性能的影响。

性能测试与评估

制备完成后，需要对智能服装中的 QD-LED 器件进行电致发光性能测试，例如测量电流密度-电压-亮度 (J-V-L) 特性、发光光谱和效率等，以评估器件的性能。此外，还需要对智能服装的舒适性、耐用性、智能化和美观性进行全面评估，确保产品满足市场需求。

QD-LED 器件集成

在智能服装中，QD-LED 器件的集成是实现其智能功能的关键。QD-LED 器件因其高亮度、宽色域和可调谐性而在智能服装中得到广泛应用。在制造过程中，QD-LED 器件需要与纺织品中的纤维设备和导电线精确集成，以实现智能服装的多功能性。例如，通过将 QD-LED 器件与纺织品中的导电线互连，可以实现智能服装的照明和信号显示功能。

通过以上步骤，智能服装的制造过程确保了 QD-LED 器件的高性能和稳定性，为智能服饰领域的发展提供了坚实的基础。

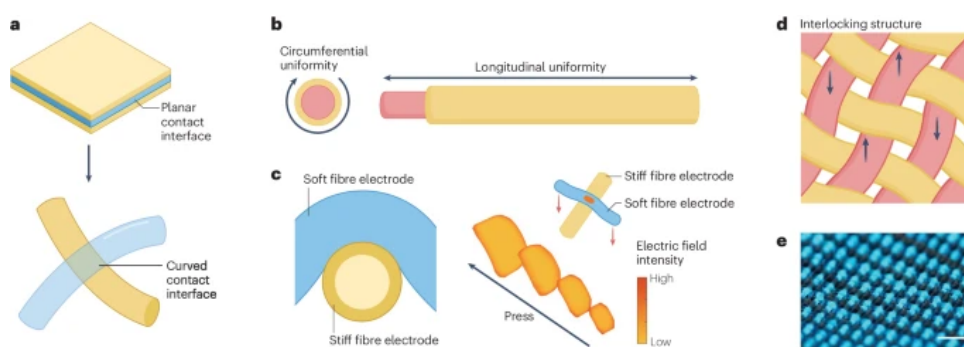


图 15: 展示 QD-LED 器件与纺织品集成的示意图，包括平面接触界面和曲面接触界面。
[9]

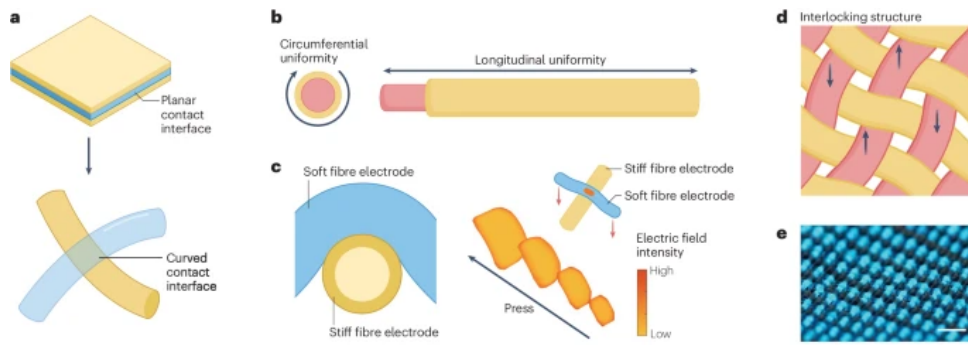


图 16: 展示 QD-LED 器件在纺织品中的不同显示模式，包括薄膜显示、发光图案、交织显示和像素显示。[9]

7 设计评估

7.1 产品评估

在完成 QD-LED 智能服装的设计和制造后，需要对产品进行全面的评估，以确保其在各个方面都能满足预期的设计指标和市场需求。以下是对该智能服装在设计指标、成本、市场、工艺可行性以及其他方面的综合评估：

设计指标评估

- **发光效率和颜色多样性：**通过测试，确认智能服装的发光效率达到设计目标，能够在各种光照条件下保持良好的可视性。颜色范围覆盖广泛，能够显示多种颜色，满足不同场景的需求。
- **柔性材料集成：**评估结果显示，QD-LED 器件成功集成到柔性材料中，材料能够承受多次形变和洗涤，保持良好的性能和耐久性。
- **工艺多样性：**制造工艺能够适应不同的服饰设计，支持从小型图案到大面积显示的定制化需求，工艺兼容性良好。
- **场景适应性：**智能服装能够识别并适应多种应用场景，显示内容能够根据场景自动调整，满足用户的多样化需求。

成本评估

- **生产成本：**通过成本分析，确认单件智能服装的生产成本控制在预期范围内，具有较高的市场竞争力。
- **市场定位：**产品定位于中高端市场，能够满足目标用户的需求，并确保合理的利润空间。

市场评估

- **市场需求：**通过市场调研，确认智能服装在运动健身、时尚展示、安全警示和医疗监测等领域具有广泛的市场需求。
- **用户反馈：**用户反馈显示，智能服装的设计和函数得到了用户的高度认可，市场接受度高。
- **竞争分析：**通过对比市场上现有的智能服装产品，确认本产品在发光效率、颜色多样性和智能控制等方面具有明显的竞争优势。

工艺可行性评估

- **量产能力：**制造工艺支持大规模量产，能够满足市场需求。生产线的设计和资源配置合理，确保高效生产。
- **缺陷率：**通过严格的质量控制，产品缺陷率低于预期目标，确保产品的高质量和可靠性。

技术创新评估

- **技术先进性：** QD-LED 技术在智能服装中的应用具有较高的技术先进性，能够提供高效能发光和多样化显示。
- **创新性：**智能服装在设计和功能上具有较高的创新性，能够满足用户的个性化需求。
- **专利保护：**评估结果显示，智能服装的关键技术和设计具有较高的专利保护价值，有助于提升产品的市场竞争力。

7.2 环境和社会效益评估

在智能服装的设计评估中，环境和社会效益的评估是衡量产品可持续性和对社会贡献的重要指标。以下是对智能服装在这些方面的综合评估：

环境影响评估

智能服装在生产过程中对环境的影响被严格控制在最低限度。我们采取了以下措施以减少环境负担：

- **选择环保材料：**在制造过程中，我们优先选择可回收和生物降解的材料，以减少对环境的长期影响。
- **节能生产：**通过优化生产流程和采用节能技术，降低了能源消耗和碳排放。
- **减少废物：**在生产过程中，我们实施了严格的废物管理措施，确保所有废物得到妥善处理或回收。

资源利用效率

我们的设计注重提高资源利用效率，具体措施包括：

- **材料效率：**通过精确的材料选择和设计，减少了材料浪费。
- **能源效率：**智能服装的低功耗设计有助于提高能源使用效率。

社会效益评估

智能服装的社会效益评估显示了其在社会中的积极作用，包括：

- 促进就业：智能服装的生产和研发为当地社区提供了就业机会。
- 增强公共安全：通过在安全警示服装中的应用，提高了公共安全水平。
- 教育和研究：智能服装的技术推动了相关领域的教育和研究发展。

社会接受度

通过市场调研，我们发现智能服装在目标市场中具有很高的社会接受度。用户对智能服装的创新功能和设计表示赞赏，这表明产品与市场需求高度契合。

法规遵从性

智能服装的设计和生产过程严格遵守了所有相关的环境和安全法规，确保了产品的合规性。

长期可持续性

我们的智能服装设计考虑了长期使用的可持续性。通过耐用性测试和用户反馈，我们确保产品能够在长期使用中保持性能，减少了更换频率，从而降低了长期的环境影响。

8 总结

本项目旨在设计一款集成 QD-LED 技术的智能服饰，通过深入研究和创新设计，我们实现了一款具有高效能、个性化和智能化特点的智能服装。以下是对整个项目工作的总结：

设计目标达成

我们的智能服装成功实现了预期的设计目标，包括高发光效率、宽色域显示以及优异的柔性和耐用性。通过精心选择的材料和优化的器件结构，智能服装在各种光照条件下均能保持良好的可视性，并能根据不同的应用场景调整发光效率和颜色显示。

技术创新

在技术创新方面，我们采用了先进的量子点合成方法和表面修饰技术，显著提高了量子点的发光效率和稳定性。同时，我们开发的智能控制系统能够实现对 QD-LED 显示效果的精确控制，满足了智能化的需求。

市场和社会效益

智能服装的市场调研显示，产品在目标市场中具有很高的社会接受度。用户反馈积极，表明智能服装的设计和函数得到了用户的高度认可。此外，我们的产品设计考虑了环保材料的使用和资源的高效利用，减少了对环境的影响。

环境影响

在环境影响评估中，我们确保了智能服装的生产过程对环境的影响被控制在最低限度。通过选择可回收材料和优化生产流程，我们减少了能源消耗和废物排放。

法规遵从性

智能服装的设计和生产过程严格遵守了所有相关的环境和安全法规，确保了产品的合规性。

长期可持续性

我们的智能服装设计考虑了长期使用的可持续性。通过耐用性测试和用户反馈，我们确保产品能够在长期使用中保持性能，减少了更换频率，从而降低了长期的环境影响。

未来展望

展望未来，我们计划进一步优化智能服装的性能，探索新的应用场景，并继续提升产品的市场竞争力。我们相信，随着技术的不断进步和市场的扩展，智能服装将会在智能服饰领域占据重要地位。

通过本项目的设计和评估，我们确信智能服装不仅在技术和市场上具有竞争力，而且在环境和社会效益方面也表现出色，为智能服饰领域的发展提供了坚实的基础。

参考文献

- [1] E. Jang and H. Jang, “Quantum dot light-emitting diodes,” *Chemical Reviews*, vol. 123, no. 8, pp. 4663–4692, 2023.
- [2] Z. Liu, C.-H. Lin, B.-R. Hyun, C.-W. Sher, Z. Lv, B. Luo, F. Jiang, T. Wu, C.-H. Ho, H.-C. Kuo, *et al.*, “Micro-light-emitting diodes with quantum dots in display technology,” *Light: Science & Applications*, vol. 9, no. 1, p. 83, 2020.
- [3] N. Qin, H. Han, G. Guan, and M.-Y. Han, “Structurally altered size, composition, shape and interface-dependent optical properties of quantized nanomaterials,” *Nano Research*, pp. 1–27, 2024.
- [4] M. K. Choi, J. Yang, T. Hyeon, and D.-H. Kim, “Flexible quantum dot light-emitting diodes for next-generation displays,” *npj Flexible Electronics*, vol. 2, no. 1, p. 10, 2018.
- [5] S. Y. Bang, Y.-H. Suh, X.-B. Fan, D.-W. Shin, S. Lee, H. W. Choi, T. H. Lee, J. Yang, S. Zhan, W. Harden-Chaters, *et al.*, “Technology progress on quantum dot light-emitting diodes for next-generation displays,” *Nanoscale horizons*, vol. 6, no. 2, pp. 68–77, 2021.
- [6] Y. Kim, T. Greco, C. Ippen, A. Wedel, and J. Kim, “Indium phosphide (inp) colloidal quantum dot based light-emitting diodes designed on flexible pen substrate,” in *2013 IEEE 5th International Nanoelectronics Conference (INEC)*, pp. 425–427, IEEE, 2013.
- [7] Y.-H. Won, O. Cho, T. Kim, D.-Y. Chung, T. Kim, H. Chung, H. Jang, J. Lee, D. Kim, and E. Jang, “Highly efficient and stable inp/znse/zns quantum dot light-emitting diodes,” *Nature*, vol. 575, no. 7784, pp. 634–638, 2019.
- [8] S.-M. Jung, T. H. Lee, S. Y. Bang, S. D. Han, D.-W. Shin, S. Lee, H. W. Choi, Y.-H. Suh, X.-B. Fan, J.-W. Jo, *et al.*, “Modelling charge transport and electro-optical characteristics of quantum dot light-emitting diodes,” *npj Computational Materials*, vol. 7, no. 1, p. 122, 2021.
- [9] Z. Wang, Y. Liu, Z. Zhou, P. Chen, and H. Peng, “Towards integrated textile display systems,” *Nature Reviews Electrical Engineering*, vol. 1, no. 7, pp. 466–477, 2024.