

红光QLED顶发射器件中上电极的构筑与性能研究

孙博阳

宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波

收稿日期: 2024年8月2日; 录用日期: 2024年9月2日; 发布日期: 2024年9月12日

摘要

量子点是一种半导体纳米晶体, 因其发光波长可调、颜色纯度高、色域广、寿命长、可溶液法制备受到广泛关注。量子点发光二极管(QLED)以其优越的发光性能、高效的能量转换效率, 成为下一代平板显示、照明和可穿戴设备等领域的候选方案。顶发射是一种发光二极管结构, 最后蒸镀的电极方向即为出光方向, 不同于底发射, 它的出光不需要经过驱动薄膜晶体管(TFT), 因此其开口率高, 是OLED/QLED显示的一种选择方案。顶发射QLED从顶电极一侧出光, 因此, 提高顶电极的出光效率是一个重要课题。通常在顶部电极上覆盖一层光提取层(Extraction Layer, EXL), 调整功能层和光提取层之间的折射率差异, 以提高出光率, 同时采用光散射层(Scattering Layer, SCL)抑制微腔效应造成的出光角度不均匀问题。但是, 通过调整功能层厚度来匹配光提取层折射率的方法会使得器件的电荷平衡性遭到破坏, 同时现有的光散射层的制备过程涉及光刻、刻蚀等工艺, 比较复杂, 也易破坏器件功能层。基于此, 本论文研究了光提取材料的筛选原则, 使用了与量子点发光层折射率相匹配的光提取材料, 优化光提取层厚度, 提升了器件电流效率。另外, 通过旋涂工艺, 引入了光学纳米材料对出光施加散射, 对比发现, 粗糙度更大的纳米颗粒能够显著抑制光的角度分布不均匀问题。实验结果显示, 优化后的顶电极结构使得器件的电流效率从14.8 cd/A提升到17.9 cd/A, 而且器件的出光角度更加分散。

关键词

顶发射QLED, 光提取, 光散射

Study on the Construction and Performance of the Top Electrode in Red-Emitting QLED Top-Emitting Devices

Boyang Sun

Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

文章引用: 孙博阳. 红光 QLED 顶发射器件中上电极的构筑与性能研究[J]. 现代物理, 2024, 14(5): 179-188.

DOI: 10.12677/mp.2024.145021

Abstract

Quantum dots are semiconductor nanocrystals that have garnered significant attention due to their tunable emission wavelengths, high color purity, wide color gamut, long lifetimes, and solution-processable fabrication. Quantum dot light-emitting diodes (QLEDs), renowned for their superior luminescent properties and high energy conversion efficiency, are emerging as potential candidates for next-generation flat-panel displays, lighting, and wearable devices. Top-emission is a type of light-emitting diode structure where the direction of the light emission corresponds to the direction of the final deposited electrode. Unlike bottom-emission, top-emission does not require the light to pass through the driving thin-film transistors (TFTs), resulting in a higher aperture ratio, making it a viable option for OLED/QLED displays. In top-emission QLEDs, light is emitted from the top electrode, making the improvement of the top electrode's light extraction efficiency a critical issue. Typically, a light extraction layer (EXL) is applied over the top electrode to enhance light extraction by adjusting the refractive index difference between the functional layer and the light extraction layer. Additionally, a scattering layer (SCL) is used to mitigate the uneven light emission angle caused by the microcavity effect. However, adjusting the functional layer thickness to match the refractive index of the light extraction layer can disrupt the device's charge balance. Furthermore, the current preparation process for scattering layers involves complex techniques like photolithography and etching, which can damage the functional layers of the device. In this context, the present study investigates the selection criteria for light extraction materials. By employing light extraction materials that match the refractive index of the quantum dot emission layer and optimizing the thickness of the light extraction layer, the device's current efficiency is enhanced. Additionally, the introduction of optical nanomaterials via spin-coating applies scattering to the emitted light. Comparative analysis reveals that nanomaterials with greater roughness significantly suppress the uneven angular distribution of light. Experimental results demonstrate that the optimized top electrode structure increases the device's current efficiency from 14.8 cd/A to 17.9 cd/A, while also achieving a more diffuse light emission angle.

Keywords

Top-Emitting QLED, Light Extraction, Light Scattering

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在顶发射 QLED 中, 底电极承担了反射、载流子注入, 以及承载整个器件的作用, 对器件至关重要, 而顶电极的作用同样重要。顶发射 QLED 的顶电极要兼顾高透过率和高导电性, 顶电极的反射与底电极的反射相互作用, 可以形成微腔, 增强顶发射 QLED 的出光强度, 影响出光效率, 因此, 对顶电极的研究就显得尤为重要。

目前也有不少针对顶电极的研究, 大致可以分为两个研究方向: 1) 提高出光效率: 由于外界空气和器件的折射率不匹配, 造成器件出光减弱的问题。2) 出光角度问题: 由于顶发射器件的底部电极和顶部电极会形成一个平行平面腔, 该腔体会使得器件垂直方向出光增强, 侧向出光减弱的问题。

针对以上两个问题, 目前已经有一些非常优秀的研究成果。针对出光效率的问题, 2021 年, Feng 等

人[1]在顶部电极之上覆盖了一层有机物来减少空气和顶部电极之间的光损失,使得蓝光器件的电流效率达到了 4.0 cd/A。此方法是通过减少层与层之间的折射率差异来减少光的损失,该方向很好,但是顶部金属电极的折射率往往在 1.3 左右,而功能层的折射率往往在 1.8~1.9,因此功能层与外界空气之间由于折射率差异所造成的光损失往往更大。

同时,微腔效应的存在使得器件的出光存在严重的角度依赖问题,直观的表现便是垂直方向出光强度很大而其他角度的出光较弱。针对出光角度的问题,2019年, Lee 等人[2]通过将顶部电极从半透明金属电极变换为 IZO,使得器件顶部电极反射的光极大减弱,从而减弱了器件的微腔效应。2021年, Li 等人[3]通过调整功能层中电子传输层 ZnO 的厚度,从而减弱了器件的微腔效应,从而使得器件的出光依赖性减弱。以上两种方法均是通过减弱器件的微腔效应来减弱器件出光的角度依赖问题。但是顶发射器件的主要优势便是器件出光的亮度高,减弱微腔效应就等于减弱了器件的出光强度。虽然器件的角度依赖问题得到了一定程度的缓解,然而器件的出光强度反而受到了影响。因此,需要开发一种在不减弱器件出光强度的前提之下,减弱器件出光依赖性的问题。

针对以上问题,本文首先使用了 MoO₃、CPL-145、CBP 三种材料作为顶部光提取层,测试了这三种材料与红光 QD 的折射率,并将这三种材料制备成器件,比较了使用三种材料之后器件的出光强度和电流效率,最后通过调整器件顶部光提取层的厚度确定了其最优厚度。之后针对顶发射器件出光的角度依赖问题,我们再次在顶部光提取层之上旋涂了一层 ZnO 纳米颗粒层,来增加顶部光提取层的粗糙度,增加了出光的散射性能。因为测试盒测试的是器件垂直出射光的强度,本文将旋涂了 ZnO 纳米颗粒的器件与没有旋涂 ZnO 纳米颗粒的器件进行对比,发现通过覆盖一层 ZnO 纳米颗粒确实可以提升器件出光的散射程度。

2. 实验部分

2.1. 实验材料

PEDOT:PSS 购自西安宝莱特有限公司; TFB 购自杭州领擎科技有限公司; QD、ZnO 购自合肥福纳科技有限公司; CBP 购自西安宝莱特有限公司; Al、Ag 购自河北罗鸿科技有限公司; MoO₃ 购自上海麦林生物科技有限公司; CPL-145 购自江苏三月科技股份有限公司。

2.2. 器件制备

首先,在超声波浴中用去离子水、丙酮、乙醇和异丙醇分别清洗玻璃基板 15 分钟。然后将清洁的玻璃基板转移到热蒸发室中,在那里使用热蒸发沉积 Al、Ag 和 MoO₃ (6 nm)。金属的沉积速率为 1.5 Å/s,而 MoO₃ 的沉积速率则为 0.2 Å/s。MoO₃ 的厚度为 6 nm。随后,用 UVO 处理样品 3 分钟。然后,以 4000 rpm 将 PEDOT:PSS (4083)旋涂到电极上,并在 150℃的空气中退火 15 分钟。接下来,在充氮手套箱中,使用以下条件旋涂 TFB 空穴传输层、红色 QD 发射层和 ZnO 电子传输层: TFB: 8 mg/ml 的氯苯溶液,以 4000 rpm 旋涂 30 s,并在 150℃退火 30 min; QD: 15 mg/ml 的辛烷值,以 3000 转/分的转速旋涂 30 秒; ZnO: 30 mg/ml 的乙醇,以 3000 rpm 旋涂 30 s。最后,通过分别以 1.5 Å/s 和 1 Å/s 的速率热蒸发沉积 30 nm 顶部阳极 Ag 和 40 nm 光提取层 CBP、CPL-145 和 MoO₃。

2.3. 器件表征

利用 AFM (Bruker, Dimension ICON)收集金属表面的形貌。使用 Keithley 2400 源测量仪和配备集成球体的商用设备(XPOY-EQE-350-1100,广州 Xi 普光电科技有限公司)同时记录 QLED 的 J-V-L 曲线、EL 光谱和 EQE。见图 1。



Figure 1. Physical photo of the device being lit up
图 1. 器件点亮实物照片

3. 结果与讨论

3.1. 探究光提取层(EXL)折射率对器件性能的影响

3.1.1. 器件折射率差异造成器件出光损失原理

在顶发射 QLED 器件中，光提取层的作用是减少发光层和空气之间的折射率差异，以提高器件的光提取效率。光提取层通常是一种具有适当折射率的材料，它的引入有助于减少内部反射，并提高从器件中发射出来的光量。

光提取的原理是基于光学的折射和反射。在传统的器件结构中，发光层的折射率与周围介质(通常是空气)的折射率存在差异。这种折射率差异导致了在发光层和空气之间发生的全反射现象，使得一部分光无法逃逸而被束缚在器件内部。这些被束缚的光降低了器件的光提取效率，因为它们无法直接逃逸到外部环境中。由于折射率差异造成的器件光损失如图 2 所示。

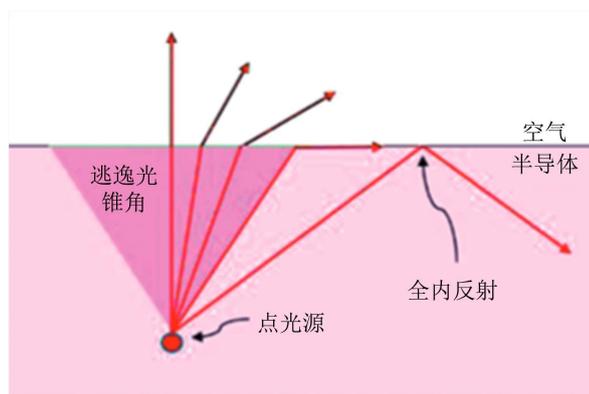


Figure 2. Schematic diagram of device light loss caused by refractive index difference [4]
图 2. 折射率差异造成器件出光损失示意图[4]

引入光提取层后，它的折射率与发光层的折射率相匹配或接近，从而减少了发光层和空气之间的折射率差异。这样一来，光在器件内部发生反射的可能性就大大降低了。相反，光更有可能穿过光提取层，进入到周围介质中。这样一来，被束缚在器件内部的光就有更多的机会被释放出来，提高了器件的光提

取效率。

数学上, 光提取层的作用可以通过折射率的匹配来描述。根据斯涅尔定律, 当光从一种介质进入到另一种折射率较高的介质时, 反射光的强度与入射角度和折射率之间的关系由以下公式给出:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{n_i}{n_t} \quad (1)$$

其中, θ_i 是入射角, θ_t 是折射角, n_i 是入射介质的折射率, n_t 是折射介质的折射率。当两种介质的折射率相匹配时, 例如光提取层和发光层之间, 折射率差异最小化, 从而减少了全反射的可能性, 增加了光逃逸的机会, 提高了器件的光提取效率。

3.1.2. 光提取层与发光层折射率的表征

本章首先选择了在 QLED 器件中常见的 MoO_3 、CBP。在 QLED 器件中, MoO_3 (三氧化钼) 通常作为 HIL (Hole Injection Layer, 空穴注入层) 使用, CBP (4,4'-二苯基联苯) 经常作为 HTL (Hole Transport Layer, 空穴传输层) 使用。 MoO_3 是一种具有较高折射率的半导体材料, 而发光层的折射率同样较大, 可以有效减少发光层和空气之间的折射率差异, 因此 MoO_3 适合作为光提取层, 同时 MoO_3 具有良好的光学透过性, 这意味着其可以允许大部分从发光层之间的光逃逸到外部环境中, 从而提高器件的出光效率。CBP 是一种有机材料, 相对 MoO_3 来说具有较低的折射率, 其与发光层之间的折射率差异同样较小, 作为光提取层同样可以减少发光层和空气之间的折射率差异, 进而减少了器件的出光损失, 提高了器件的光提取效率。这两种材料均可以通过蒸镀的方法制备在顶部电极之上。

CPL-145 为某 OLED 材料公司开发的一种专门用在顶发射 OLED 器件中的光提取层材料。该产品的优势在于可以通过热蒸发的方法制备, 工艺较简单, 可以与本文中所使用的顶部电极旋转蒸镀掩膜版适配。同时, 该产品的折射率较高, 有利于提高光取出效果, 并且该材料的膜相态稳定性高, 高温长时间耐热不结晶, 有利于提高产品寿命。

因为需要探究这三种材料与发光层 QD 的折射率匹配的情况, 从而进一步分析其对器件光提取的效果, 因此首先测试了 MoO_3 、CBP、CPL-145 这三种材料在 450 nm~650 nm 之间的折射率, 如图 3 所示。

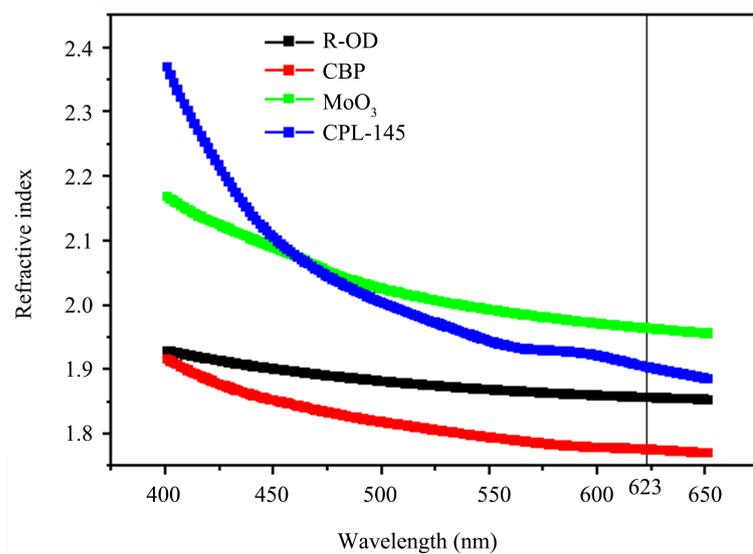


Figure 3. Diagram of refractive index of MoO_3 , CBP, CBL-145 and red light quantum dots as a function of wavelength

图 3. MoO_3 、CBP、CBL-145 和红光量子点折射率随着波长变化的函数图

本文中对材料折射率的测试是通过椭偏仪器测试的。

在使用椭偏仪测试材料的折射率时，需要考虑材料的厚度。这是因为椭偏仪通过测量入射光线经过材料后的偏振状态的变化来确定材料的折射率，而这种变化受材料厚度的影响。同时，使用椭偏仪测试材料的折射率时，需要将材料的消光系数设置为 0。消光系数描述了材料对光的吸收程度，但在本文中未涉及材料对光的吸收。因此，将材料的消光系数设置为 0 是合理的。这样的做法旨在简化实验并更准确地测量材料的折射率。

在对 R-QD 的测试过程中，本文将 R-QD 的厚度设置为 25 nm。在测试 MoO₃、CBP 和 CPL-145 这三种材料的折射率的过程中，将其厚度设置为 30 nm，这是因为 30 nm 是一种常见的选择。这个厚度下材料既足够薄以减少光的吸收，又足够厚，保证了椭偏仪的测量结果具有良好的稳定性。并且设置为相同的厚度可以使得测试结果更加可比。

通过对测试结果中四种材料的折射率观察可以发现：

1) 在 623 nm 波长下，R-QD 的折射率为 1.8556，CBP 的折射率为 1.77501，MoO₃ 的折射率为 1.9631，CPL-145 的折射率为 1.90334。

2) 在 623 nm (红光)处的折射率从大到小依次为 MoO₃、CPL-145、R-QD、CBP。

3) 从 MoO₃、CPL-145、CBP 这三种材料与 R-QD 的折射率差异的角度可以发现，MoO₃ 和 CBP 与 R-QD 的折射率差异较大，分别为 0.1075 和 0.08059，CPL-145 与 R-QD 的折射率差异不大，为 0.04774，CPL-145 与 R-QD 的差异为 MoO₃ 与 R-QD 差异的 44%，CPL-145 与 R-QD 的差异为 CBP 与 R-QD 差异的 59%。

将这三种器件制备成器件之后，其亮度与偏置电压的关系、电流效率与偏置电压的关系如图 4 所示。

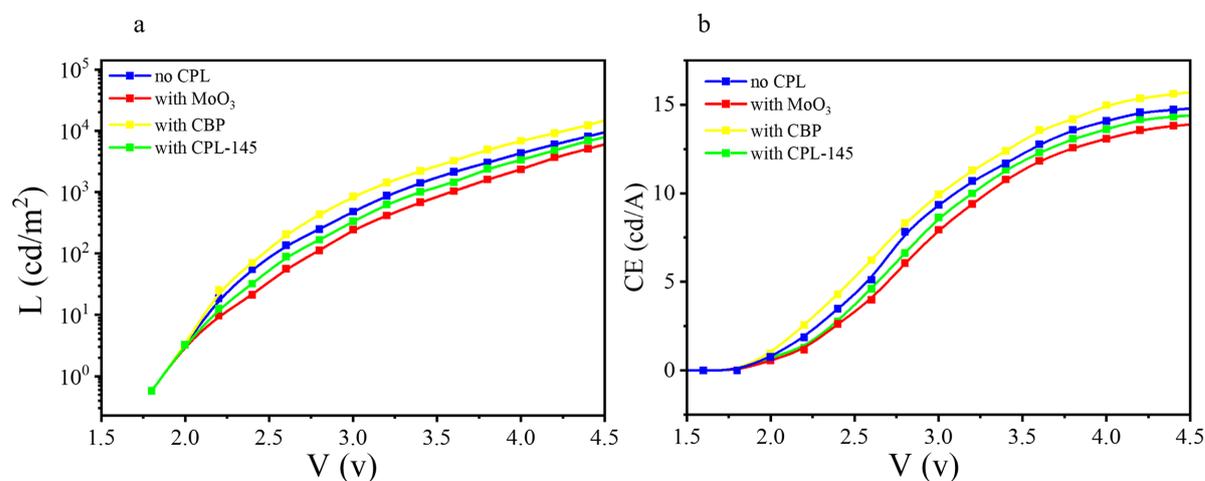


Figure 4. (a) Diagram of device light intensity as a function of voltage; (b) Diagram of device current efficiency as a function of voltage

图 4. (a) 器件出光强度随电压变化的函数图；(b) 器件电流效率随电压变化的函数图

从图 4 可见，器件亮度和电流效率符合一致的规律，性能由高到低依次为使用 CBP 作为光提取层、没有使用光提取层、使用 CPL-145 作为光提取层、使用 MoO₃ 作为光提取层。使用 CBP 作为光提取层相较于没有使用光提取层有了亮度和电流效率的提升，电流效率从 14.8 cd/A 提升到 15.9 cd/A。这是因为 CBP 的折射率较量子点发光层折射率小，这减少了发光层与空气之间的折射率差异，而且发光层和 CBP 之间的折射率差异较小，这同样减少了发光层和顶部电极之间的折射率差异，进而提高了器件的出光强度和电流效率。使用 CPL-145 作为光提取层相较于没有使用光提取层有了亮度和电流效率的降低，电流

效率从 14.8 cd/A 降低到 13.6 cd/A。这是因为 CPL-145 的折射率大于量子点发光层的折射率，虽然 CPL-145 与量子点发光层之间的折射率差异较小，但是其与空气之间的折射率差异较大，因此 CPL-145 的引入反而增加了光子逃逸出器件的难度，器件的亮度和电流效率便降低了。使用 MoO₃ 作为光提取层相较于没有使用光提取层同样有了亮度和电流效率的降低，电流效率从 14.8 cd/A 降低到 12.9 cd/A。这同样是因为 MoO₃ 的折射率大于量子点发光层的折射率，其与空气之间的折射率差异同样比较大，因此 MoO₃ 的引入同样增加了光子逃逸出器件的难度，器件的亮度和电流效率降低了。

为了进一步提升光提取层的光提取能力，分别将 CBP 的厚度设置为 30 nm、35 nm、40 nm，器件性能如下图 5 所示。

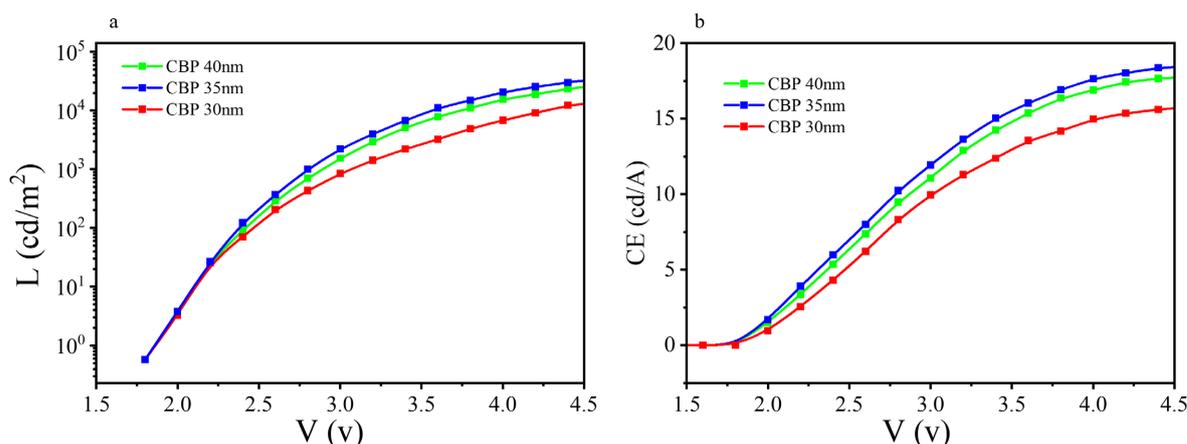


Figure 5. (a) Diagram of device light intensity as a function of voltage under different thicknesses of CBP; (b) Diagram of device current efficiency as a function of voltage under different thicknesses of CBP

图 5. (a) 不同厚度 CBP 下器件出光强度随电压变化的函数图; (b) 不同厚度 CBP 下器件电流效率随电压变化的函数图

从上图中可以发现，器件亮度由大到小依次为，CBP 为 35 nm，CBP 为 40 nm，CBP 为 30 nm。CBP 为 35 nm 时，电流效率为 17.9 cd/A，相较于 CBP 为 30 nm 时的 15.9 cd/A 有了明显的提升。这是因为随着 CBP 厚度的增加，其与量子点发光层之间的折射率差异逐渐缩小，器件内部被限制住的光子被极大地提取出器件，提升了器件的电流效率。

3.2. 探究光散射层(SCL)粗糙度对器件性能的影响

通过在顶部电极覆盖一层 CBP 减少了功能层与顶部电极之间由于折射率差异造成的光损失，使得器件的效率从 14.8 cd/A 提升到 17.9 cd/A。

虽然，顶发射器件所独有的微腔效应增强了器件的出光强度，但是其又带来了出光角度依赖的问题。

使用纳米颗粒来减弱器件出光角度依赖性的方法涉及了光的散射理论，当光线遇到介质的界面或杂质时，会发生散射现象，而当散射体的尺寸比光波小时，散射效应会更加明显[5]。若散射体的尺寸远小于光的波长时，传统的光学理论会失效，此时光的散射行为进入了亚波长散射效应之中，亚波长散射效应同样可以起到光的散射作用。

现在 ZnO [6]纳米颗粒被用作 QLED 器件的电子传输层材料，WO₃ [7]纳米颗粒被用作 QLED 器件的空穴注入层材料。这两种纳米材料的颗粒大小均为几纳米级别，可以用作顶部电极的光提取层。本文首先将 ZnO 纳米颗粒和 WO₃ 纳米颗粒通过旋涂的方法成膜于顶部电极 CBP 层之上。CBP、ZnO/CBP 和 WO₃/CBP 的表面形貌如下图 6 所示。

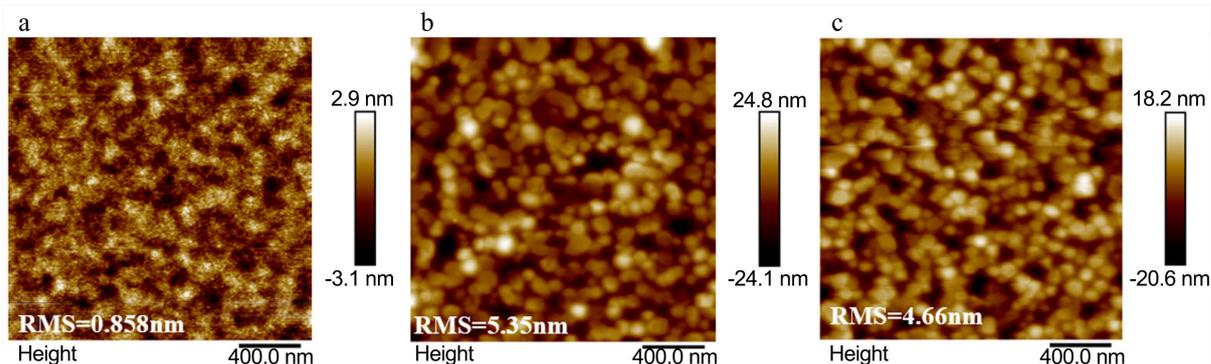


Figure 6. AFM images of (a) CBP, (b) ZnO nanoparticles, and (c) WO₃ nanoparticles

图 6. (a) CBP、(b) ZnO 纳米颗粒和(c) WO₃ 纳米颗粒的 AFM 图

如图 6 所示，将 CBP 成膜于顶部电极上之后，由于该种材料蒸镀过程中膜相态稳定，因此其表面粗糙度较低，表面平整性高，但是将 ZnO 纳米颗粒旋涂在 CBP 上之后其粗糙度为 5.35 nm，将 WO₃ 旋涂在 CBP 上之后其表面粗糙度为 4.66 nm。

之后，本文分别对不使用顶部光散射层、使用 ZnO 纳米颗粒为顶部光散射层、WO₃ 纳米颗粒为顶部光散射层的器件进行性能测试。在测试的过程中，本文采用了测试盒测试和积分球测试对比的方法来表征器件出光角度敏感性的问题。

这是因为测试盒仅测量器件垂直方向的出光，受限于测试面积，超出测试盒接收面积的光子没有被完全测试到。而积分球则能够完全接收器件各个角度的出光，因此，如果测试盒测得的垂直方向光的强度减弱，而使用积分球测得的器件出光强度和电流效率没有大的变化，那么说明器件垂直角度的出光减弱，而其他角度的出光得到了加强。测试盒和积分球对光的测试原理如图 7 所示。

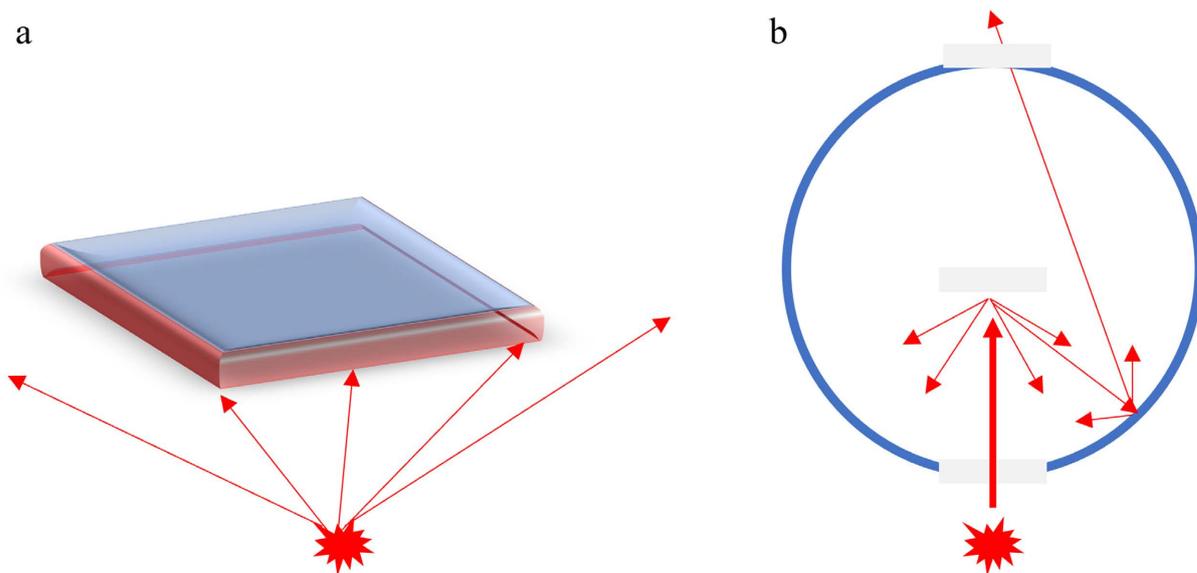


Figure 7. (a) Schematic diagram of the light output of the test box receiving device; (b) Schematic diagram of the light output of the integrating sphere receiving device

图 7. (a) 测试盒接收器件出光原理图；(b) 积分球接收器件出光原理图

使用测试盒对器件的电压 - 亮度特性和电压 - 电流效率特性进行测试的结果如下图 8 所示。

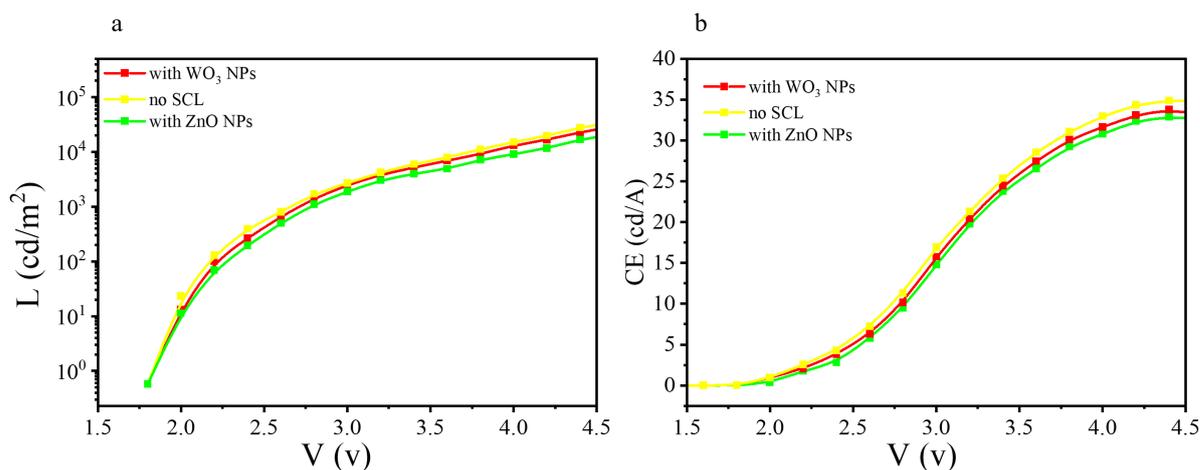


Figure 8. (a) Diagram of light intensity as a function of voltage of devices with different light scattering layers measured using a test box; (b) Diagram of current efficiency as a function of voltage of devices with different light scattering layers measured using a test box

图 8. (a) 使用测试盒测试得到不同光散射层器件出光强度随电压变化的函数图; (b) 使用测试盒测试得到不同光散射层器件电流效率随电压变化的函数图

图 8(a)中, 黄色线代表了标准样品, 没有采用光散射层结构, 可以看到, 当增加 WO_3 纳米颗粒的光散射层后, 亮度有略微的增加, 而采用 ZnO 纳米颗粒的器件表现出亮度的衰减。在 CE 中有类似的表现。进一步使用积分球对器件的性能进行测试, 如下图 9 所示。

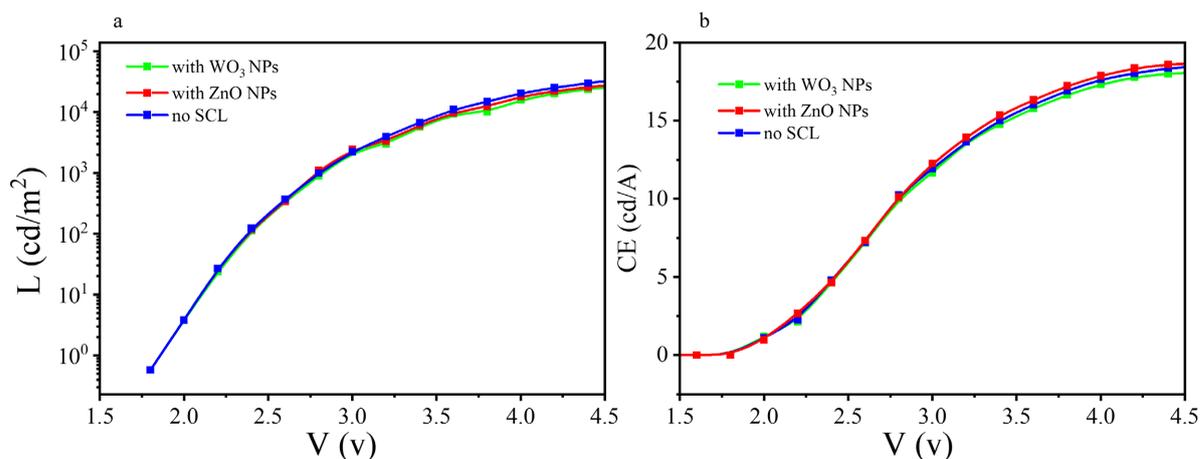


Figure 9. (a) Diagram of light intensity as a function of voltage of devices with different light scattering layers measured using integrating sphere; (b) Diagram of current efficiency as a function of voltage of devices with different light scattering layers measured using integrating sphere

图 9. (a) 使用积分球测试得到不同光散射层器件出光强度随电压变化的函数图; (b) 使用积分球测试得到不同光散射层器件电流效率随电压变化的函数图

图 9 中, 红色代表了无 SCL 的标准样品的亮度曲线, 采用 WO_3 纳米颗粒作为 SCL 后, 亮度略有增加, 该结果与图 8 一致, 表明采用 WO_3 纳米颗粒作为 SCL 确实轻微地提升了器件的出光强度。这可能是由于 WO_3 的折射率加强了光提取效率。而 ZnO 纳米颗粒作为 SCL 时, 积分球测得亮度几乎没有变化, 与测试盒测得亮度下降形成鲜明对比。积分球结果表明, ZnO 没有改变光提取效率, 而测试盒结果表明 ZnO 纳米颗粒的散射作用, 减弱了垂直发光的强度, 从而使得出光强度随角度变化不敏感。

4. 总结

总而言之, 本文对顶发射 QLED 中的顶电极提出了新的优化策略。

1) 通过折射率调控, 筛选了不同折射率的光提取材料, 研究了折射率与光提取效率的相关关系。选择与量子点发光层折射率相匹配的光提取材料, 并通过调节其厚度进一步提升器件的出光强度。通过多种折射率材料的筛选, 发现与 R-QD 折射率相近的 CBP 可以显著提升器件性能, 通过优化厚度, 将 CE 从 14.8 cd/A 提高到 17.9 cd/A。

2) 顶发射微腔改变了光的角度分布, 通过筛选光散射层材料, 研究了光散射纳米颗粒的粒径对光场角度分布的影响。采用纳米颗粒 WO_3 和 ZnO 作为光散射层材料, 通过对测试盒和积分球测试亮度结果这一层面的表征, 发现具有更大粗糙度的 ZnO 能够很好地散射出光, 减弱了由微腔引起的垂直发光增强的现象, 使得出光的角度分布更均匀。同时, 我们发现在 CBP 上沉积 WO_3 还可以进一步地提高出光效率, 这可能与 WO_3 的折射率和散射效果有关。

参考文献

- [1] Feng, J., Li, D., Lu, Z., *et al.* (2021) P-114: Performance Improvement of Top-Emitting Blue Quantum Dot Light-Emitting Diodes by an Organic Capping Layer. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, **52**, 1312-1314. <https://doi.org/10.1002/sdtp.14943>
- [2] Lee, C.Y., Kuo, Y.P., Chen, P.Y., *et al.* (2019) Influence of Annealing Temperature on Weak-Cavity Top-Emission Red Quantum Dot Light Emitting Diode. *Nanomaterials (Basel)*, **9**, 14-15. <https://doi.org/10.3390/nano9111639>
- [3] Li, D., Feng, J., Zhu, Y., *et al.* (2021) Enhanced Efficiency of Top-Emission InP-Based Green Quantum Dot Light-Emitting Diodes with Optimized Angular Distribution. *Nano Research*, **14**, 4243-4249. <https://doi.org/10.1007/s12274-021-3596-4>
- [4] 杨启鸣, 钱福丽, 苟国汝, 等. 覆盖层对顶发射白光微型 OLED 性能的影响研究[J]. 红外技术, 2023, 45(3): 303-307.
- [5] Lee, T., Lee, M., Kim, K., *et al.* (2024) Angle Independent Top Emitting Quantum Dot Light Emitting Diodes Using a Solution Processed Subwavelength Scattering Capping Layer. *Advanced Optical Materials*, **36**, 31-33. <https://doi.org/10.1002/adom.202302509>
- [6] Qian, L., Zheng, Y., Xue, J.G., *et al.* (2011) Stable and Efficient Quantum-Dot Light-Emitting Diodes Based on Solution-Processed Multilayer Structures. *Nature Photonics*, **5**, 543-548. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.171>
- [7] Kim, H.S., Lee, D., Kim, B., *et al.* (2022) Improved Performance of Quantum Dot Light-Emitting Diodes by Introducing WO_3 Hole Injection Layers. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, **735**, 51-60. <https://doi.org/10.1080/15421406.2021.1972228>