

文章编号: 1000-7032(2022)04-0598-10

量子点 LED 用于可见光通信的调制带宽研究进展

肖 华^{1,2*}, 陈万里³, 肖翔天³, 王 锐³, 王 恺^{3*}

(1. 广东海洋大学 电子与信息工程学院, 广东 湛江 524000;

2. 广东海洋大学深圳研究院 科技发展中心, 广东 深圳 518120;

3. 南方科技大学工学院 电子与电气工程系, 广东 深圳 518055)

摘要: 可见光通信(Visible light communication, VLC)作为无线通信领域中与无线射频通信互补的一种空间通信技术,近年来吸引了众多研究人员的关注。除了通信链路的电路设计、调制模式之外,调制带宽是照明光源能否实现高质量 VLC 的关键因素。区别于传统有机 LED、聚合物 LED 及以 GaN/InGaN 为代表的无机 LED 等照明光源,量子点 LED(QLED)具备响应速度快、色纯度好、发光效率高、可同时用于光致发光和电致发光等优势,是一种理想的用于可见光通信的固态光源器件。然而,目前对 QLED 用于 VLC 的调制带宽机理研究较少,尤其是针对多色 QLED 以及电致发光 QLED。本文从量子点的光转换机制出发,系统综述了不同 QLED 的调制机理,并对光致发光和电致发光 QLED 调制带宽的限制因素进行了总结和分析,为 QLED 在 VLC 中的应用提供了理论依据。

关键词: 可见光通信; 发光二极管; 量子点; 调制带宽

中图分类号: TN312⁺.8; TN929.12 **文献标识码:** A **DOI:** 10.37188/CJL.20220041

Progress on Modulation Bandwidth of Quantum-dot LED in Visible Light Communication

XIAO Hua^{1,2*}, CHEN Wan-li³, XIAO Xiang-tian³, WANG Rui³, WANG Kai^{3*}

(1. School of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. Technology Development Centre, Shenzhen Research Institute of Guangdong Ocean University, Shenzhen 518120, China;

3. Department of Electrical and Electronic Engineering, College of Engineering,

Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

* Corresponding Authors, E-mail: oliviahx@gdou.edu.cn; wangk@sustc.edu.cn

Abstract: As one of the wireless communication technologies, visible light communication (VLC) acts as a complement to radio frequency communication, and has attracted many researchers' attention in recent years. Except for electrical circuit designing and modulation mode designing in communication links, modulation bandwidth is one of the key factors to realize high-quality VLC. Different from traditional organic LEDs, polymer LEDs, and inorganic LEDs (such as GaN/InGaN LEDs), quantum-dot LEDs (QLEDs) show fast response, high color purity, high luminous efficiency, and they can realize photoluminescence and electroluminescence simultaneously. QLED is an ideal solid-state light source for VLC, however, literatures seldom report the mechanism of modulation bandwidth of QLED in VLC, especially the modulation bandwidth of multi-color QLED and electroluminescent QLED. Based on the light conversion mechanism of quantum dots, we systematically

收稿日期: 2022-02-04; 修订日期: 2022-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(61875082); 广东省教育厅青年创新人才项目(2020KQCX026)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China(61875082); Youth Talent Program by Education Department of Guangdong Province(2020KQCX026)

review the modulation mechanism of different QLEDs, and analyze the limitation of the modulation bandwidth of photoluminescence and electroluminescence QLEDs. This study lays the theoretical foundation for the application of QLEDs in VLC.

Key words: visible light communication; light-emitting diode; quantum dot; modulation bandwidth

1 引 言

可见光通信 (Visible light communication, VLC) 作为无线通信领域中与射频通信互补的一种空间通信技术,具有无需频谱认证、抗电磁干扰、安全性高、节能、通信设备成本较低等优点,并已在室内定位^[1]、水下探测^[2]、交通运输^[3-4]等领域广泛展开研究。VLC 中常用的调制方法有开关键控 (OOK)^[5-6]、正交频分复用 (OFDM)^[7-8]、离散多音调制 (DMT)^[9]、波分复用 (WDM)^[10]、脉冲振幅调制 (PAM)^[11]等。

由于通信调制频率远高于人眼对半导体光源闪烁的感知阈值,半导体光源可以同时实现照明和通信功能。光源调制特性的研究对实现照明和通信两用的白光光源有重要意义。有关不同光转换材料和通信光源的调制速度及响应时间,张屹林等做了详细的总结与分析^[12]。根据发光机理不同,具备调制特性的光源可分为有机和无机光源。其中,大功率发光二极管 (LED)、Micro-LED 等作为用于 VLC 的无机光源,具有量子效率高、尺寸小、稳定性好、响应速度快等优点,常用于激发光转换材料发光^[13]。大功率蓝光 LED 带宽约 3.5 ~ 4 MHz 左右, Micro-LED 的响应时间低至 0.2 ns,带宽约几百 MHz^[14-16]。为满足白光照明的要求,大功率蓝光 LED 常用荧光粉作为光转换材料。目前报道的采用大功率蓝光 LED 激发的方式测试所得的荧光粉带宽约从 115 kHz 到 1 MHz 不等^[17-18];除无机光源外,有机 LED (OLED) 和聚合物 LED (PLED) 被提出用作 VLC 的信号光源。与传统无机 LED 相比, OLED 与 PLED 具有溶液加工特性的优势,可用于制备柔性面光源;然而,有机发光材料较长的荧光寿命 (μs 量级) 限制了其在高频下的调制速度。多个研究表明, PLED 和 OLED 的带宽仅限于几百 kHz^[19-21]。通过预均衡^[22]、后均衡^[23]、模拟均衡器^[24]等电路设计方法可以有效提高 PLED 和 OLED 的调制速度。对此,迟楠、陈雄斌等课题组做了大量研究。

与有机染料类似,胶体量子点也满足溶液加工的要求;然而,量子点发光具有更短的响应时间、更高的色纯度、波长连续可调性、以及其可见光和近红外 (NIR) 体系材料对水氧的稳定性^[25]。从 20 世纪 80 年代末“量子点”概念的提出开始,量子点技术发展至今,已广泛应用于新型柔性显示器件、照明光源、太阳能电池、生物检测等领域^[26]。其中, CdSe 量子点的响应时间可低至 10 ns,量子产率几乎达到 100%,荧光半峰宽 (FWHM) 可达到 20 ~ 30 nm^[27]。CdSe 量子点 LED (QLED) 的亮度可达 $10^5 \sim 10^6 \text{ cd/m}^2$,高于固态照明中 $10^3 \sim 10^4 \text{ cd/m}^2$ 的标准以及显示领域中 $10^2 \sim 10^3 \text{ cd/m}^2$ 的标准,可用于实现宽色域、快速响应、高稳定性的光源^[28]。

QLED 作为一种固态光源器件,已在显示、照明、通信等多个领域展开研究。其中,有关 QLED 的照明性能已经有较多研究,但是结合 QLED 照明和调制特性的研究却较少报道。本文从量子点的光转换机制出发,对 CdSe QLED 发光特性和调制带宽的关系进行了详细研究,总结与分析了 QLED 光源在 VLC 中的应用前景、面临的困境以及解决方案。

2 QLED 发光和调制机理

2.1 QLED 发光机理

根据发光机理不同, QLED 分为光致发光 QLED (QLED_p) 和电致发光 QLED (QLED_e)。其中, QLED_p 通常采用蓝光 LED 激发量子点发出长波长光 (如红光和黄光)。以 YAG: Ce³⁺ 荧光粉与 CdSe/ZnS 量子点分别作为黄色和红色光转换材料为例,其 QLED_p 器件结构及其对应单色光发射光谱如图 1(a)、(b) 所示^[29]。对 QLED_p 来说,当电子吸收光能跃迁到导带时,价带相应产生空穴。在量子点内部,由于电子与空穴之间存在库仑力,电子与空穴以激子的形式结合。其中的电子在受到外界微扰后以一定几率回到基态,并与空穴结合,发射光能。

相比 QLED_p, QLED_E 的特点包括可使用溶液加工和柔性打印方式制作以及采用电注入方式直接进行光电转换等。以文献 [30] 中采用的 QLED_E 的器件结构为例, 图 1 (c)、(d) 描述了 CdSe/ZnS QLED_E 的器件结构和能级结构示意图。由于 QLED_E 中的发光过程包括载流子注入、传输、复合和发光, 典型的 QLED_E 由三文治结构组

成。电子和空穴分别从阴极和阳极注入器件内部, 并由电荷传输层进行传输, 最终在有源层(量子点层)内部进行复合发光。量子内部狭窄空间产生的库仑力迫使导带中的电子和价带中的空穴进行结合, 并以激子的形式形成电子-空穴对。激子的寿命有限, 当激子回归基态时, 以发光的形式释放能量。

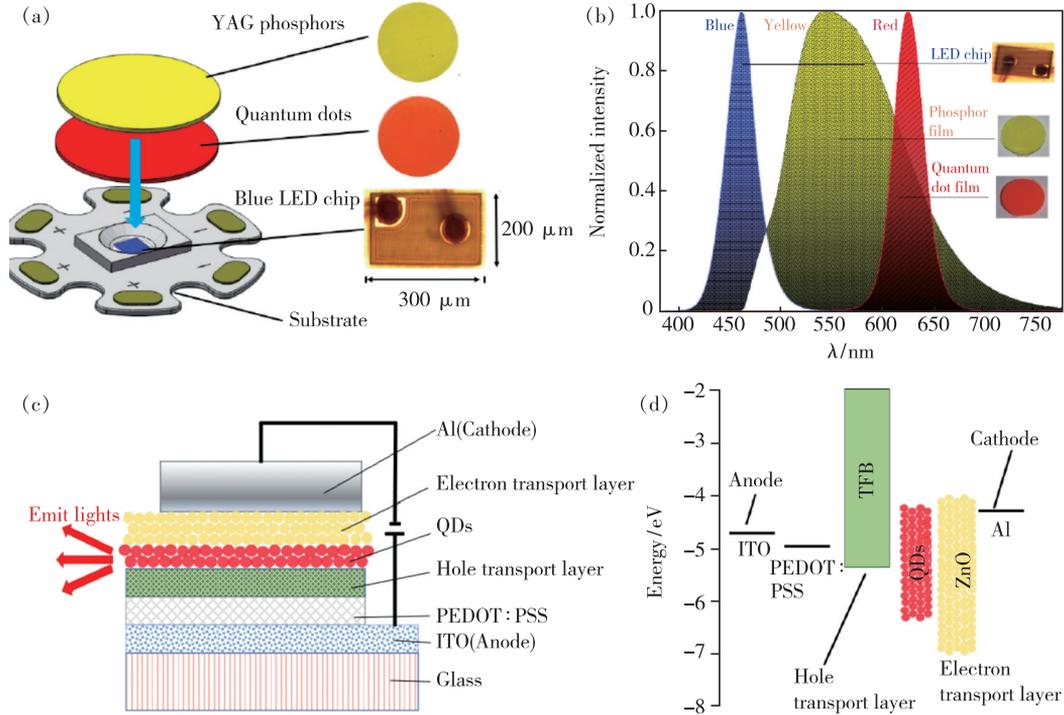


图 1 (a) 多色 QLED_p 器件结构示意图; (b) QLED_p 中不同单色光发射光谱; (c) QLED_E 器件结构示意图; (d) QLED_E 能级结构示意图^[29-30]。

Fig. 1 (a) Schematic diagram of packaging structure of multichromatic QLED_p. (b) Monochromatic emission spectra of different colors in QLED_p. (c) Packaging structure of QLED_E. (d) Energy level diagram of QLED_E^[29-30].

3 QLED 用于 VLC 的调制带宽

3.1 QLED_p 调制带宽

白光 LED 在 VLC 中的带宽与光转换材料的发光特性有关。当信号发生器产生的电信号以正弦波的形式发送到 LED 芯片后, LED 芯片通过电光转换过程将光信号发射并传送至 QLED_p 的光转换材料, 从而使短波长光(如蓝光)的发光波长产生斯托克斯位移, 转换成长波长光(如红光)。转化光对应光强可表示为入射光强($I_{in}(t)$)与光转换材料脉冲信号响应($h(t)$)的卷积。因为光转换材料可以看作线性时不变系统, $h(t)$ 可以描述为荧光寿命的一阶拟合曲线($I_0 \exp(-t'/\tau)$), 其中 I_0 是初始光强, τ 是光转换材料的平均荧光

寿命, t' 是时间变量^[31]。依据白光 LED 初始光强与光转换材料频率响应函数的卷积运算规则, 输出的转换光强($I_{out}(t)$)可表示为如下形式:

$$I_{out}(t) = I_{in}(t) * h(t) = \int_0^{\infty} I_{in}(t') h(t-t') dt', \quad (1)$$

其中 t 和 t' 在卷积运算中代表时间变量的初始位移以及时间变量。白光 LED 中, 交流和直流电耦合的总光强可表示为直流信号(U)以及信号发生器产生的交流信号($V \sin \omega t$)的总和。根据公式 (1), 可推导出输出光强的函数表达式如下:

$$I_{out}(t) = I_{in}(t) \left[U + \frac{V\tau}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \sin(\omega t - \varphi) \right], \quad (2)$$

其中 ω 是角频率, φ 是相位角。根据公式(2), 白光 LED 交流电分量的传递函数幅值可表示为输出光电压与输入光电压之比, 并最终可用公式 $1/\sqrt{1+\omega^2\tau^2}$ 进行描述^[27]。通过该公式计算的光转换材料的频率响应可表示为

$$R_{\text{fre}} = 10\lg\left(\frac{1}{1+2\pi f^2\tau^2}\right), \quad (3)$$

当 $R_{\text{fre}} = -3 \text{ dB}$ 时, 可算得对应的带宽 $f_{3\text{-dB}} = 1/2\pi\tau$ 。该公式与传统的 LED 芯片带宽计算公式类似, 并在 Xiao 等的研究中证实了量子点光转换材料带宽计算公式与带宽实验测试结果的一致性^[32]。相比仅涉及单种光转换材料的白光 LED, 多种光转换材料叠加所产生的频率响应可表示为不同光转换材料频率响应的乘积。

白光 LED 照明过程中对电流、光转换材料参数(如厚度、浓度等)的调节, 会导致 QLED_p 照明光谱、不同颜色分量的比重产生改变, 从而影响 QLED_p 的总带宽^[30]。多色 QLED_p 的带宽可根据白光中不同成分发射光所占比例以及不同成分发射光对应的频率响应曲线计算获得。图 2(a) 描述了蓝光 LED 激发 CdSe/ZnS 量子点以及 YAG:Ce³⁺ 荧光粉所得三色光对应的单色光频响曲线, 以及荧光粉、量子点以及蓝光 LED 芯片的 3 dB 带宽。其混光所得多色白光的频率响应可表示为

不同发光材质的频率响应与其所占发射光功率比例乘积的加权值, 如下所示:

$$R_{\text{fre}} = M_{\text{LED}}R_{\text{LED}}(f) + M_{\text{ph}}R_{\text{ph}}(f) + M_{\text{QD}}R_{\text{QD}}(f), \quad (4)$$

其中, M_{LED} 、 M_{ph} 、 M_{QD} 为 LED 芯片、荧光粉、量子点发射光功率的比例, $R_{\text{LED}}(f)$ 、 $R_{\text{ph}}(f)$ 、 $R_{\text{QD}}(f)$ 为 LED 芯片、荧光粉、量子点的频率响应函数。图 2(b) 描述了通过公式(4) 计算所得多色 QLED_p 的调制带宽(红色点状曲线)和实际测试所得的调制带宽(黑色散点)的一致性, 并揭示了白光 LED 带宽与相关色温之间的非线性关系^[29]。

对于量子点材料的调制特性, 目前测得的溶液状态的 CdSe/ZnS 量子点响应时间约 10 ns, 测试带宽约 15.5 MHz; 通过烘烤、固化工艺做成固态片状的 CdSe/ZnS 量子点响应时间约 55 ns, 测试带宽约 4 MHz, 其原因是固化过程中量子点团聚导致的非辐射复合几率增加^[33-34]。在目前报道的用于 VLC 的 II-VI 族量子点材料中, CdSe/ZnS 量子点的光致发光带宽约为 2.5 ~ 15 MHz^[15,30], 其电致发光带宽约为 2.5 ~ 10 MHz^[30,35]; 钙钛矿量子点以及碳量子点的光致发光带宽约 120 ~ 491 MHz 左右(测试光源为激光光源)^[36-37]。其中, 电致发光钙钛矿量子点的稳定性问题以及碳点的聚集问题仍有待解决。

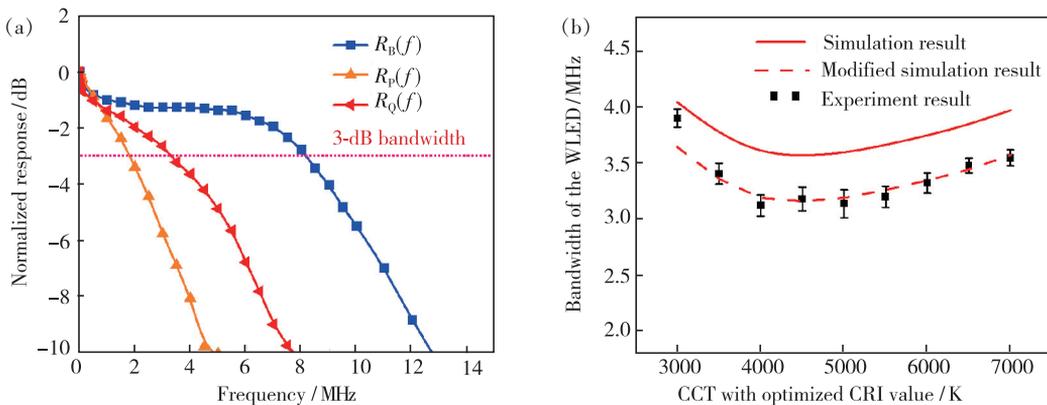


图 2 (a) 蓝光 LED、荧光粉、量子点的频率响应曲线; (b) 不同相关色温 (CCT) 下 QLED_p 带宽变化及其拟合曲线^[29]。
Fig. 2 (a) Frequency response curve of blue LED, phosphors, and quantum dots. (b) Bandwidth of QLED_p under different CCT values^[29].

3.2 QLED_E 调制带宽

与光致发光器件不同, QLED_E 的带宽受到 RC 常数以及器件载流子寿命的共同影响^[38]。其中, RC 常数(t_{RC})为描述光电子器件充放电的时间常数, 取决于 QLED_E 的等效电路结构, 即取决

于各功能层因涂覆工艺不同产生的接触电阻、不同能级之间产生的电荷累积等因素; 而器件载流子寿命取决于功能层的传输性能以及载流子复合的时间, 即取决于各功能层厚度、介电常数、迁移率等因素。

为研究 QLED_E 中 RC 常数以及载流子寿命对调制带宽的影响,文献[30]中针对 ITO/PEDOT:PSS/TFB/QD/ZnO/Al 结构的 QLED_E 展开了发光面积以及驱动电流对带宽的影响机制研究。受 RC 常数限制的调制带宽(B_{RC})可表示为 $B_{RC} = 1/2\pi t_{RC}$ ^[39]。受载流子寿命(τ)限制的调制带宽(B_τ)可表示为 $B_\tau = 1/2\pi\tau$,其中 $\tau = \sqrt{ed/JB}$, e 为电子电量, d 为发光层厚度, B 为复

合系数, J 为电流密度,电流密度 J 和电子浓度呈正相关关系^[40-41]。如图 3 所示,对比不同电流下用 B_{RC} 、 B_τ 计算所得数据以及实验测量所得带宽,发现在小电流下,三者带宽几乎相同;然而在电流超过约 10 mA 之后, B_{RC} 呈现陡峭的增长趋势,而 B_τ 与测试所得带宽几乎重合,且都远小于 B_{RC} 计算所得带宽值以及量子点本身的带宽值 15.5 MHz。

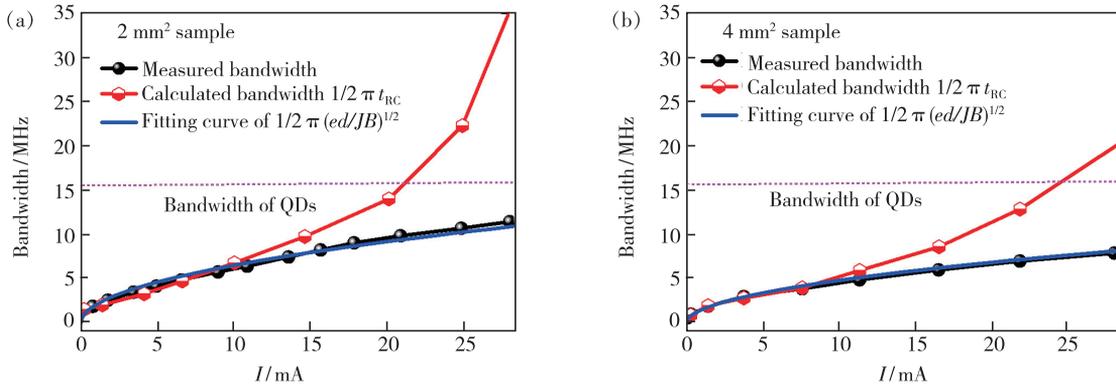


图 3 (a) 2 mm² QLED_E 测试所得频率响应曲线、计算所得 B_{RC} 以及拟合所得 B_τ ; (b) 4 mm² QLED_E 测试所得频率响应曲线、计算所得 B_{RC} 以及拟合所得 B_τ ^[30]。

Fig. 3 Measured bandwidth, calculated bandwidth of B_{RC} , and fitting curve of B_τ for 2 mm² QLED_E (a) and 4 mm² QLED_E (b).

实验结果表明,在电流较小的时候,用 B_{RC} 来描述 QLED_E 带宽是可取的,而大电流下限制带宽的因素不再是 RC 常数,而是 τ 。在相同驱动电流下,小面积的 QLED_E 的 RC 常数较低,因此小面积样品的 B_{RC} 较高。小面积 QLED_E 的带宽在大电流下同样受载流子寿命的影响,但其带宽测量值比大面积 QLED_E 要高。根据公式 $\tau = \sqrt{ed/JB}$, 决定小面积 QLED_E 带宽较高的关键因素是小面积 QLED_E 的电流密度 J 要高于大面积 QLED_E 的电流密度 J 。

有源层的载流子寿命 τ 代表复合发生前载流子在量子点层中的平均存在时间,反映了空穴和电子的复合过程。目前测量载流子寿命的方法普遍使用开路电压测试法^[42] 以及光致发光测试法^[43];然而,其计算结果仅反映整个器件的载流子寿命,并非有源层载流子寿命。基于目前已有 OLED 的等效电路不适用于评估 QLED_E 频率响应和推测 QLED_E 带宽的现状,利用一个能真实反映 QLED_E 不同层功能物理结构的等效电路,可用于推导器件有源层载流子寿命^[44-45]。

如图 4(a)、(b) 所示,根据能级结构的特点,

QLED_E 可等效为:(1) 有源层和空穴注入层的注入电荷引起的电容以及电阻的并联电路,(2) 其他物理层产生体电阻的串联。QLED_E 的传递函数 $Q(\omega)$ 可以表示为出射光功率 $P_{OUT}(\omega)$ 和输入电压 $U_{IN}(\omega)$ 的比值,即 $Q(\omega) = P_{OUT}(\omega)/U_{IN}(\omega)$ 。 $Q(\omega)$ 由两部分组成,一部分是等效电路相关的传递函数,即

$$H(\omega) = \frac{U_{QD}(\omega)}{U_{IN}(\omega)}, \quad (5)$$

一部分是有源层电光转换的传递函数,即

$$F(\omega) = \frac{P_{OUT}(\omega)}{U_{QD}(\omega)}, \quad (6)$$

$H(\omega)$ 描述了 QLED_E 器件两端电压到有源层两端电压的变化过程, $F(\omega)$ 描述了有源层电压转化为电功率再变为光功率的传递函数。 $H(\omega)$ 和 $F(\omega)$ 可结合文献调研和测量器件参数的方法进行计算。通过扣除测试所得 $Q(\omega)$ 中计算所得 $H(\omega)$ 的成分,再对离散数据进行拟合,可得到不同驱动电流下 $F(\omega)$ 的拟合曲线。根据拟合的频率响应曲线以及频率响应曲线对应的函数形式 $1/\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}$, 可计算得到不同电流的载流子寿命 τ , 其计算过程如图 4(c) ~ (f) 所示。

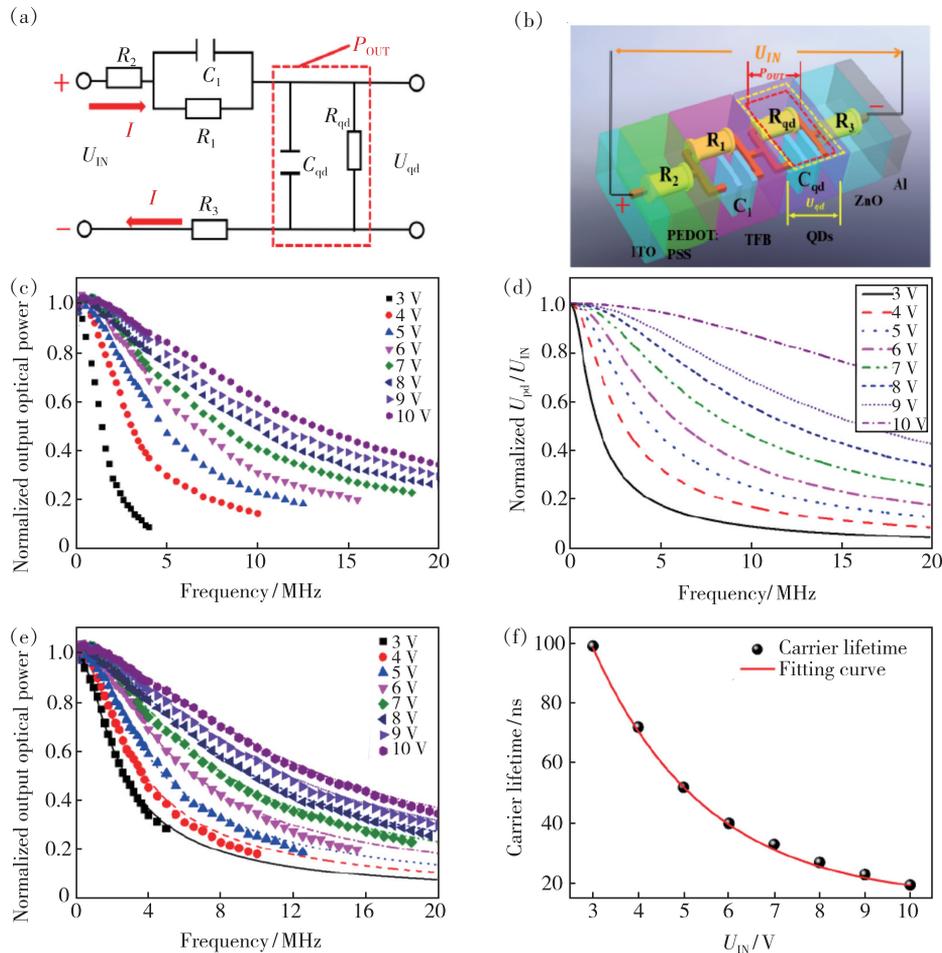


图 4 (a) QLED_E 等效电路模型; (b) QLED_E 中功能层与等效电路的对应关系示意图; (c) 测试所得频率响应 $Q(\omega)$; (d) 根据等效电路计算所得频率响应 $H(\omega)$; (e) 计算所得有源层频率响应 $F(\omega)$ 及根据 $1/\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}$ 拟合曲线; (f) 计算所得载流子寿命及其在不同电压下的拟合曲线^[45]。

Fig. 4 (a) The equivalent circuit of QLED_E. (b) The correspondence between the circuit components and physical layers of QLED_E. (c) Measured frequency response of the QLED_E, $Q(\omega)$. (d) Calculated frequency response of the equivalent circuit, $H(\omega)$. (e) Calculated $F(\omega)$ and fitting curves with $F(\omega) = 1/\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}$. (f) Calculated carrier lifetime values under different U_{IN} values and the corresponding fitting curve^[45].

材料层种类与厚度等参数的选取可同时影响 QLED_E 的发光和调制特性。文献[46]尝试使用 PVK、poly-TPD、TFB 等常用的空穴传输层材料进行发光性能和调制特性对比,发现在以 ZnO 作为电子传输层的 QLED 结构中(与文献[30]所用 QLED 结构相同)使用 PVK 作为空穴传输层会得到较高发光效率以及较低带宽,如图 5(a)、(b)所示。一方面,这是由于 PVK 的导带能级与量子点的价带能级较为匹配,空穴能较顺利进入量子点内部进行复合;另一方面,经计算,基于 PVK 材料的 QLED_E 具备较高的电场常数和较高开启电压,导致其电阻值和电容值较高。与图 3 中基于 TFB 材料的 QLED_E 不同,基于 PVK 材料的 QLED_E,

其 RC 常数对应的带宽计算值 B_{RC} 与其带宽测试的实际值一致,说明其带宽在不同电流下仅受限于 RC 常数。

空穴传输层的厚度在适中的情况下(如 25 nm)可以较大程度提高器件外量子效率(EQE)及亮度,而器件带宽与空穴传输层材料厚度成负相关关系,如图 5(c)、(d)所示。LiF 层厚度对器件发光和带宽的影响可以参考空穴传输层的研究结论:在适中的厚度(如 1 nm)条件下,器件的外量子效率和亮度最高,而器件带宽仅在 LiF 厚度为零的情况下有最高值,如图 5(e)、(f)所示。根据香农定理(Shannon Theory),QLED_E 的发光光强和带宽同时对通信的传输速率产生影响^[47]。然

而,上述研究结果显示 QLED_E 的光强和带宽在一定条件下呈现相互制约的关系,即并非亮度越高

带宽越高。因此,在 VLC 的光源设计中需要寻找光源发光特性和调制特性的均衡条件。

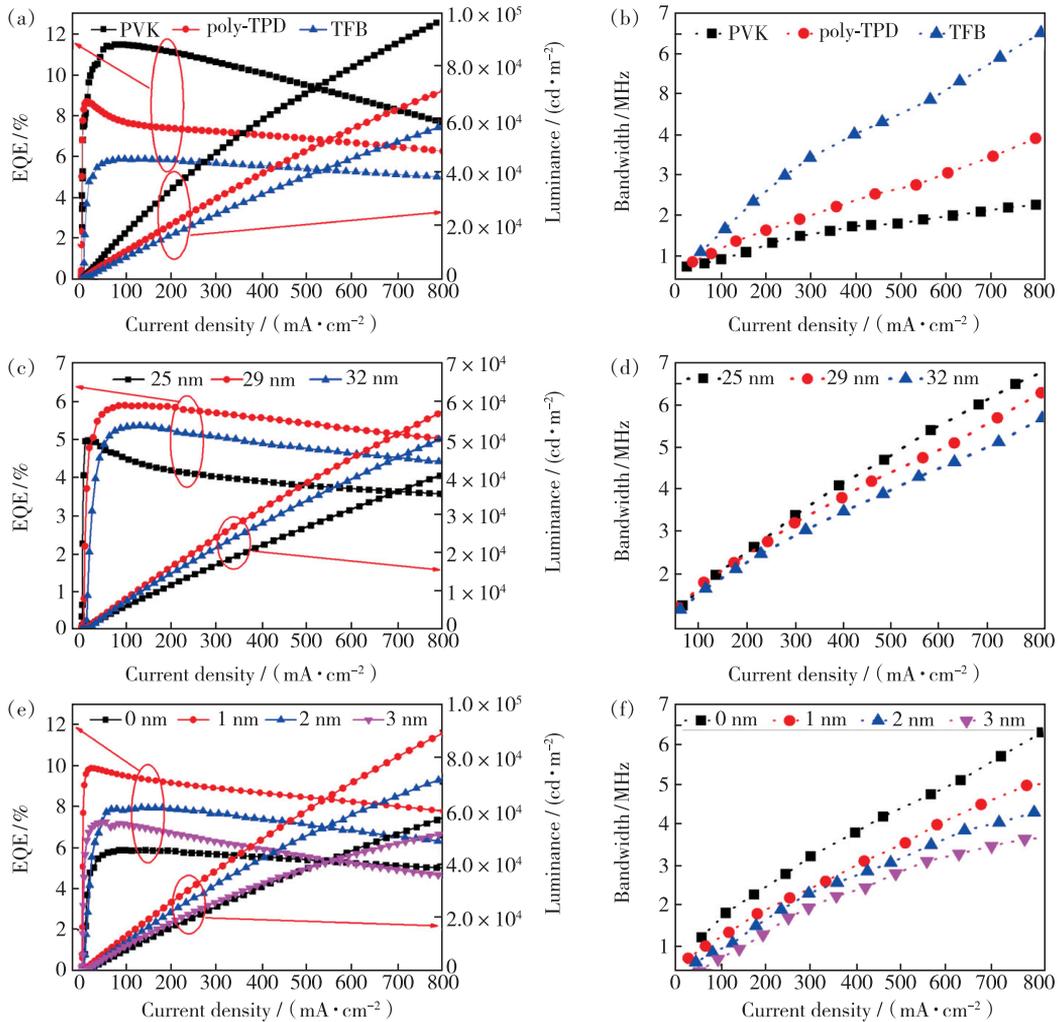


图 5 (a)PVK、poly-TPD、TFB 作为空穴传输层的 QLED_E 所得 EQE 以及亮度;(b)PVK、poly-TPD、TFB 作为空穴传输层的 QLED_E 所得带宽;(c)TFB 作为空穴传输层的 QLED_E 在不同 TFB 厚度下所得 EQE 以及亮度;(d)TFB 作为空穴传输层的 QLED_E 在不同 TFB 厚度下所得带宽;(e)TFB 作为空穴传输层的 QLED_E 在不同 LiF 厚度下所得 EQE 以及亮度;(f)TFB 作为空穴传输层 QLED_E 在不同 LiF 厚度下所得带宽^[46]。

Fig. 5 Characteristics of EQE and luminance(a), bandwidth(b) of three QLED_E samples(PVK QLED_E , poly-TPD QLED_E , and TFB QLED_E) measured at different current densities. Characteristics of EQE and luminance(c), bandwidth(d) of three TFB QLED_E samples with different HTL thicknesses measured at different current densities. Characteristics of EQE and luminance(e), bandwidth(f) of four TFB QLED_E samples with different LiF thicknesses measured at different current densities.

3.3 QLED 调制特性及其应用前景

相比 QLED_P 和 QLED_E 的调制特性, QLED_P 的带宽受到发光芯片以及发光材料响应时间的限制, QLED_E 的带宽受到 RC 常数以及载流子寿命的局限。在持续提高器件驱动电流的情况下, QLED_P 和 QLED_E 的带宽都限制于其最终能承受的电流密度。对 QLED_P 来说,提高带宽的途径包括采用高带宽的激发光源以及通过减少量子点内

部和表面缺陷的方法提高量子点的响应速度。对 QLED_E 来说,有几种提高带宽的途径:(1)通过提高载流子浓度来提高 QLED_E 可承受的工作电流密度,对带宽的提高有直接作用;(2)缩小发光单元的面积可有效降低 QLED_E 的 RC 常数,对部分 RC 常数限制的 QLED_E 带宽的提高有直接作用;(3)在工艺条件允许的范围内降低 QLED_E 的厚度,可缩短器件载流子的传输时间,提高带宽;

(4)从张宇等团队对量子点材料的研究进展来看,量子点材料的表面处理^[48]、溶剂选择^[49]、核壳结构调整^[50]以及量子点的配体修饰^[51]等方面对材料的响应时间进行改善,是进一步提高 QLED 带宽的有效手段。得益于 QLED 快速响应、波长连续可调、高稳定性、柔性制造特性等优点,QLED 未来或在柔性屏通信、智慧照明、水下探测等照明-显示-通信结合的交叉领域有广泛的应用前景。

4 结 论

本文从量子点的光转换机理出发,系统综述了 QLED_p 和 QLED_e 的发光与调制机理,以及单色、多色 QLED_p 用于 VLC 的调制带宽计算方法。QLED_p 的总带宽取决于其不同颜色分量对带宽的贡献。光转换材料的调制带宽决定于其频率响

应曲线,并最终受到光转换材料响应时间的限制。对于 RC 常数较小的 QLED_e,其调制带宽在低电流下容易受到 RC 常数的限制,然而在高电流下易受到载流子寿命的限制;对于 RC 常数较大的 QLED_e,其调制带宽仅受到 RC 常数的限制。有源层载流子寿命可通过建立等效电路的方法进行推导。其次,针对 QLED 发光特性和调制特性在一定条件下相互制约的现象,可从材料能级结构的匹配、量子点内部缺陷的改进以及量子点表面的修饰等方面进行改善。本研究指出了 QLED 用于 VLC 的可行性,并对 QLED_p 和 QLED_e 与可见光通信技术的融合提供了理论依据。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220041>.

参 考 文 献:

- [1] LE TRAN M, KIM S. Joint power allocation and orientation for uniform illuminance in indoor visible light communication [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(20):28575-28587.
- [2] JIANG H Y, QIU H B, HE N, et al. Performance of spatial diversity DCO-OFDM in a weak turbulence underwater visible light communication channel [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2020, 38(8):2271-2277.
- [3] CHENG L, VIRIYASITAVAT W, BODAN M, et al. Comparison of radio frequency and visible light propagation channels for vehicular communications [J]. *IEEE Access*, 2017, 6:2634-2644.
- [4] 张颖, 雷亚茹, 黄朝军. 车载可见光通信系统工作区间的研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(17):1706002-1-8.
ZHANG Y, LEI Y R, HUANG C J. Working range of vehicle-mounted visible light communication system [J]. *Laser Optoelectron. Progress*, 2021, 58(17):1706002-1-8. (in Chinese)
- [5] FAHS B, CHOWDHURY A J, HELLA M M. A 12-m 2.5-Gb/s lighting compatible integrated receiver for OOK visible light communication links [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2016, 34(16):3768-3775.
- [6] 王志斌, 董伟, 任英, 等. 可见光通信中的白光 LED 非线性噪声分析 [J]. *发光学报*, 2018, 39(5):745-750.
WANG Z B, DONG W, REN Y, et al. Nonlinear noise analysis about white LED in visible light communication [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018, 39(5):745-750. (in Chinese)
- [7] TIAN C W, LI Y T, YE W L, et al. Performance study of an OFDM visible light communication system based on white LED array [J]. *Optoelectron. Lett.*, 2012, 7(6):454-457.
- [8] 贾科军, 魏少博, 蔺莹, 等. 可见光通信预编码光正交频分复用系统的研究 [J]. *光学学报*, 2021, 41(17):1706004-1-8.
JIA K J, WEI S B, LIN Y, et al. Research on precoding optical orthogonal frequency division multiplexing system in visible light communication [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2021, 41(17):1706004-1-8. (in Chinese)
- [9] ZHENG Z, LIU L, HU W W. Accuracy of ranging based on DMT visible light communication for indoor positioning [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2017, 29(8):679-682.
- [10] LIN W Y, CHEN C Y, LU H H, et al. 10 m/500 Mbps WDM visible light communication systems [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(9):9919-9924.
- [11] HUANG N, WANG J B, WANG J Y, et al. PAM sequence design for dimmable visible light communication [J]. *Opt.*

- Commun.*, 2017, 384:130-136.
- [12] ZHANG Y L, WANG L, WANG K, *et al.* Recent advances in the hardware of visible light communication [J]. *IEEE Access*, 2019, 7:91093-91104.
- [13] ZHANG H Q, YANG A Y, FENG L H, *et al.* Gb/s real-time visible light communication system based on white LEDs using T-bridge cascaded pre-equalization circuit [J]. *IEEE Photonics J.*, 2018, 10(2):7901807-1-7.
- [14] CHAO L, XU Z Y, CHAO Y, *et al.* Experimental demonstration of clipping noise mitigation for OFDM-based underwater optical wireless communications [C]. *Asia Communications and Photonics Conference, Guangzhou*, 2017:1-3.
- [15] XIAO X T, TANG H D, ZHANG T Q, *et al.* Improving the modulation bandwidth of LED by CdSe/ZnS quantum dots for visible light communication [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(19):21577-21586.
- [16] XIE E Y, HE X Y, ISLIM M S, *et al.* High-speed visible light communication based on a III-nitride series-biased micro-LED array [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2019, 37(4):1180-1186.
- [17] YE H C, LIU Y L, CHOW C W. Real-time white-light phosphor-LED visible light communication(VLC) with compact size [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(22):26192-26197.
- [18] BINH P H, HUNG N T. High-speed visible light communications using ZnSe-based white light emitting diode [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2016, 28(18):1948-1951.
- [19] THAI P Q. Real-time 138-kb/s transmission using OLED with 7-kHz modulation bandwidth [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2015, 27(24):2571-2574.
- [20] HAIGH P A, BAUSI F, GHASSEMLOOY Z, *et al.* Visible light communications; real time 10 Mb/s link with a low bandwidth polymer light-emitting diode [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(3):2830-2838.
- [21] CHALESHTORI Z N, ZVANOVEC S, GHASSEMLOOY Z, *et al.* Coverage of a shopping mall with flexible OLED-based visible light communications [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(7):10015-10026.
- [22] LI H L, CHEN X B, GUO J Q, *et al.* A 550 Mbit/s real-time visible light communication system based on phosphorescent white light LED for practical high-speed low-complexity application [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(22):27203-27213.
- [23] ZHAO Y H, ZOU P, HE Z X, *et al.* Low spatial complexity adaptive artificial neural network post-equalization algorithms in MIMO visible light communication systems [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(20):32728-32738.
- [24] LI H L, ZHANG Y N, CHEN X B, *et al.* 682 Mbit/s phosphorescent white LED visible light communications utilizing analog equalized 16QAM-OFDM modulation without blue filter [J]. *Opt. Commun.*, 2015, 354:107-111.
- [25] ZHANG X W, LIN T, ZHANG P, *et al.* Tunable quantum dot arrays as efficient sensitizers for enhanced near-infrared electroluminescence of erbium ions [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(8):4138-4146.
- [26] WANG J Y, MENG H M, CHEN J, *et al.* Quantum dot-based lateral flow test strips for highly sensitive detection of the tetanus antibody [J]. *ACS Omega*, 2019, 4(4):6789-6795.
- [27] PU C D, PENG X G. To battle surface traps on CdSe/CdS core/shell nanocrystals; shell isolation *versus* surface treatment [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2016, 138(26):8134-8142.
- [28] SONG J J, WANG O Y, SHEN H B, *et al.* Over 30% external quantum efficiency light-emitting diodes by engineering quantum dot-assisted energy level match for hole transport layer [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29:1808377-1-9.
- [29] XIAO H, XIAO X T, WANG K, *et al.* Optimization of illumination performance of trichromatic white light-emitting diode and characterization of its modulation bandwidth for communication applications [J]. *IEEE Photonics J.*, 2018, 10(5):8201511-1-11.
- [30] XIAO H, XIAO X T, WU D, *et al.* Effects of injection current on the modulation bandwidths of quantum-dot light-emitting diodes [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2019, 66(11):4805-4810.
- [31] LAKOWICZ J R. *Principles of Fluorescence Spectroscopy* [M]. New York: Plenum Press, 1983.
- [32] XIAO X T, XIAO H, LIU H C, *et al.* Modeling and analysis for modulation of light-conversion materials in visible light communication [J]. *IEEE Photonics J.*, 2019, 11(5):8201113-1-13.
- [33] BANSAL A K, ANTOLINI F, SAJJAD M T, *et al.* Photophysical and structural characterisation of *in situ* formed quantum dots [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2014, 16(20):9556-9564.
- [34] ZHANG F J, WANG S J, WANG L, *et al.* Super color purity green quantum dot light-emitting diodes fabricated by using CdSe/CdS nanoplatelets [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(24):12182-12188.

- [35] XIAO H, WANG R, GUI H, *et al.* 4 Mb/s under a 3 m transmission distance using a quantum dot light-emitting diode and NRZ-OOK modulation [J]. *Opt. Lett.*, 2020, 45(6):1297-1300.
- [36] DURSUN I, CHEN C, PARIDA M, *et al.* Perovskite nanocrystals as a color converter for visible light communication [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(7):1150-1156.
- [37] ZHOU Z J, TIAN P F, LIU X Y, *et al.* Hydrogen peroxide-treated carbon dot phosphor with a bathochromic-shifted, aggregation-enhanced emission for light-emitting devices and visible light communication [J]. *Adv. Sci.*, 2018, 5(8):1800369-1-8.
- [38] HUANG Y, GUO Z Y, HUANG H Y, *et al.* Influence of current density and capacitance on the bandwidth of VLC LED [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2018, 30(9):773-776.
- [39] ZHU C Y, FENG L F, WANG C D, *et al.* Negative capacitance in light-emitting devices [J]. *Solid-State Electronics*, 2009, 53(3):324-328.
- [40] SAUL R H. Recent advances in the performance and reliability of InGaAsP LED's for lightwave communication systems [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1983, 30(4):285-295.
- [41] 张福林, 林旭, 廖欣, 等. InGaN 蓝光 LED 量子效率与注入电流的关系研究 [J]. *光电子·激光*, 2009, 20(11):1442-1445.
ZHANG F L, LIN X, LIAO X, *et al.* Investigation on the injected current dependence of InGaN blue LED's quantum efficiency [J]. *J. Optoelectron. · Laser*, 2009, 20(11):1442-1445. (in Chinese)
- [42] HENRY C H, LEVINE B F, LOGAN R A, *et al.* Minority carrier lifetime and luminescence efficiency of 1.3 μm InGaAsP-InP double heterostructure layers [J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1983, 19(6):905-912.
- [43] ARAFAT Y, MOHAMMEDY M F, HASSAN M M S. Optical and other measurement techniques of carrier lifetime in semiconductors [J]. *Int. J. Optoelectron. Eng.*, 2012, 2(2):5-11.
- [44] BERLEB S, BRÜTTING W, PAASCH G. Interfacial charges in organic hetero-layer light emitting diodes probed by capacitance-voltage measurements [J]. *Synth. Met.*, 2001, 122(1):37-39.
- [45] XIAO H, WANG K, WANG R, *et al.* Equivalent circuit of quantum-dot LED and acquisition of carrier lifetime in active layer [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2020, 41(1):87-90.
- [46] XIAO H, WANG R, WANG K, *et al.* Trade-offs between illumination and modulation performances of quantum-dot LED [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2020, 32(12):726-729.
- [47] 田媛. 信道模型的研究与应用 [J]. *大连大学学报*, 2017, 38(6):19-24.
TIAN Y. The study and application of information channel model [J]. *J. Dalian Univ.*, 2017, 38(6):19-24. (in Chinese)
- [48] ZHANG X Y, SUN C, ZHANG Y, *et al.* Bright perovskite nanocrystal films for efficient light-emitting devices [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2016, 7(22):4602-4610.
- [49] GENERALOV R, KAVALIAUSKIENE S, WESTRØM S, *et al.* Entrapment in phospholipid vesicles quenches photoactivity of quantum dots [J]. *Int. J. Nanomedicine*, 2011, 6:1875-1888.
- [50] CHEN C, ZHANG P F, GAO G H, *et al.* Near-infrared-emitting two-dimensional codes based on lattice-strained core/(doped) shell quantum dots with long fluorescence lifetime [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(36):6313-6317.
- [51] LU M, GUO J, SUN S Q, *et al.* Surface ligand engineering-assisted CsPbI₃ quantum dots enable bright and efficient red light-emitting diodes with a top-emitting structure [J]. *Chem. Eng. J.*, 2020, 404:126563-1-7.



肖华(1989-),女,湖南邵阳人,博士,讲师,2020年于中国香港城市大学获得博士学位,主要从事半导体发光器件、可见光通信、纳米材料、光电器件失效分析等方面的研究。

E-mail: oliviahx@gdou.edu.cn



王恺(1983-),男,浙江余姚人,博士,南方科技大学长聘副教授,博士生导师,2011年于华中科技大学获得博士学位,主要从事量子点显示与量子点光电器件的研究。

E-mail: wangk@sustech.edu.cn