

**蓝光钙钛矿发光二极管：机遇与挑战**

段聪聪 程露 殷垚 朱琳

**Blue perovskite light-emitting diodes: opportunities and challenges**

Duan Cong-Cong Cheng Lu Yin Yao Zhu Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 158503 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190745

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190745>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

基于N型纳米晶硅氧电子注入层的钙钛矿发光二极管

Perovskite light-emitting diodes based on n-type nanocrystalline silicon oxide electron injection layer

物理学报. 2019, 68(12): 128103 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190258>

InGaN/GaN超晶格厚度对Si衬底GaN基蓝光发光二极管光电性能的影响

Influences of InGaN/GaN superlattice thickness on the electronic and optical properties of GaN based blue light-emitting diodes grown on Si substrates

物理学报. 2016, 65(7): 077801 <https://doi.org/10.7498/aps.65.077801>

等离子体表面处理对硅衬底GaN基蓝光发光二极管内置n型欧姆接触的影响

Effect of plasma surface treatment on embedded n-contact for GaN-based blue light-emitting diodes grown on Si substrate

物理学报. 2017, 66(4): 047801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.047801>

利用发光层梯度掺杂改善顶发射白光有机发光二极管光谱的稳定性

Improvement of the color-stability in top-emitting white organic light-emitting diodes by utilizing step-doping in emission layers

物理学报. 2015, 64(9): 097801 <https://doi.org/10.7498/aps.64.097801>

InGaN/GaN多量子阱结构发光二极管发光机理转变的低频电流噪声表征

Research on emission transition mechanisms of InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes using low-frequency current noise

物理学报. 2015, 64(5): 050701 <https://doi.org/10.7498/aps.64.050701>

蓝紫光发光二极管中的低频产生-复合噪声行为

Low-frequency generation-recombination noise behaviors of blue/violet-light-emitting diode

物理学报. 2019, 68(12): 128104 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190189>

专题：钙钛矿光电器件与物理

## 蓝光钙钛矿发光二极管：机遇与挑战\*

段聪聪 程露 殷垚<sup>†</sup> 朱琳<sup>‡</sup>

(南京工业大学先进材料研究院, 南京 210009)

(2019年5月17日收到; 2019年5月25日收到修改稿)

基于金属卤化物钙钛矿材料制备的发光二极管(LED)发展迅速,短短五年内,近红外、红光和绿光钙钛矿发光器件的外量子效率均超过了20%,在显示与照明领域展示出很好的应用前景.然而,蓝光钙钛矿LED的性能相对较差,制约了钙钛矿LED在全色显示领域的应用.目前,实现钙钛矿蓝光主要有两种方式,一种是基于卤素掺杂的组分工程,另一种是基于量子限域效应的维度调控.本文主要介绍了基于这两种方法的蓝光钙钛矿LED的发展历程,讨论了蓝光钙钛矿LED面临的主要问题,并对如何提升蓝光钙钛矿LED性能进行展望.

**关键词:** 钙钛矿发光二极管, 蓝光, 量子限域效应, 卤素掺杂

**PACS:** 85.60.Jb, 78.60.Fi, 81.07.Pr

**DOI:** 10.7498/aps.68.20190745

## 1 引言

金属卤化物钙钛矿材料具有荧光量子效率高(PLQE)、色纯度高、带隙易调等优点,在发光与显示领域展示了很好的应用前景<sup>[1-3]</sup>.早在1994年,Saito课题组就曾采用二维结构的(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>PbI<sub>4</sub>钙钛矿材料制备了发光二极管(LED)器件<sup>[4]</sup>,但是二维钙钛矿在室温下激子易猝灭导致器件需要在液氮条件下才能实现发光<sup>[5]</sup>.2014年,Tan等<sup>[2]</sup>报道了室温条件下工作的三维钙钛矿发光器件.虽然当时外量子效率(EQE)不足1%,但是随着对钙钛矿组分、薄膜质量和器件结构的优化,短短几年间,钙钛矿发光器件外量子效率取得了很大突破,近红外、红光和绿光钙钛矿LED的最高EQE均超过了20%<sup>[5-9]</sup>,外量子效率已经与商用的量子点LED和有机LED接近.

尽管钙钛矿发光器件取得了长足的进步,然而

在蓝光领域,钙钛矿LED存在效率低、光谱不稳定、寿命短等问题<sup>[10,11]</sup>,如何制备高效稳定的蓝光钙钛矿LED成为实现钙钛矿LED在全色显示领域应用的关键.目前,实现蓝光钙钛矿发光主要通过卤素掺杂的组分工程和基于量子限域效应的维度调控(图1)<sup>[10,12]</sup>,前者是通过氯溴掺杂的混合卤素实现钙钛矿蓝光发射,但是这种方法往往需要引入大量的氯元素,导致钙钛矿薄膜在电场作用下的相分离严重,器件发光效率和稳定性都较差;后者是在三维钙钛矿基础上,通过加入有机铵盐或者其他有机长链配体,形成层状的准二维钙钛矿或量子点,然而大量长链有机配体导致钙钛矿薄膜导电性差,器件的效率和亮度较低.因此,采用混合卤素的低维钙钛矿成为实现蓝光钙钛矿LED的主要手段.本文介绍了蓝光钙钛矿LED的发展历程,讨论了蓝光钙钛矿LED面对的问题与挑战,以及实现高性能蓝光钙钛矿LED的可能.

\* 国家自然科学基金(批准号:21601085)和江苏省自然科学基金(批准号:BK20161008)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: iamyyin@njtech.edu.cn

<sup>‡</sup> 通信作者. E-mail: iamlzhu@njtech.edu.cn

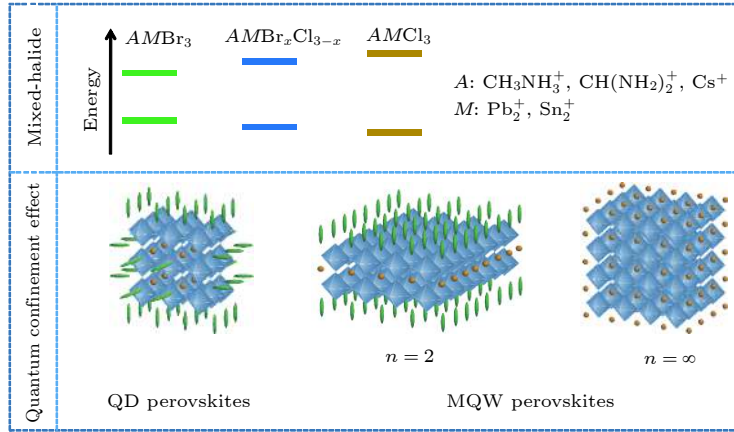


图 1 实现蓝光钙钛矿方法的示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the method to achieve blue perovskites.

## 2 蓝光钙钛矿发光器件的研究进展

### 2.1 三维氯溴掺杂的蓝光钙钛矿发光二极管

蓝光钙钛矿发光二极管性能总结如表 1<sup>[10–21]</sup> 所列. 最早有关钙钛矿蓝光的报道是基于三维钙钛矿的氯溴掺杂实现的. 三维钙钛矿的结构通式是  $AMX_3$ , 其中  $A$  和  $M$  是不等价的阳离子,  $X$  是阴离子, 目前研究火热的金属卤化物钙钛矿材料的  $A$  位主要是甲胺离子 ( $CH_3NH_3^+$ ,  $MA^+$ )、甲脒离子 ( $CH(NH_2)_2^+$ ,  $FA^+$ ) 或铯离子 ( $Cs^+$ ),  $M$  位主要是第 IV 主族的二价铅离子或锡离子 ( $Pb^{2+}$ ,  $Sn^{2+}$ ),  $X$  位主要是卤素离子 ( $Cl$ ,  $Br$ ,  $I$ ). 2015 年, Kumawat 等<sup>[13]</sup> 采用三维钙钛矿  $CH_3NH_3Pb(Br_{0.36}Cl_{0.64})_3$  获

得了发光峰位于 482 nm 的蓝光发光二极管, 虽然文章并未报道器件的效率和亮度, 但是基于当时三维氯溴掺杂钙钛矿的低薄膜覆盖率和高的缺陷密度, 实现器件的电致发光已实属不易. Sadhanala 等<sup>[12]</sup> 采用类似的方法 ( $CH_3NH_3Pb(Br_{0.4}Cl_{0.6})_3$ ) 也实现了发光峰位于约 480 nm 的钙钛矿蓝光器件, 然而由于三维混合卤素钙钛矿的低薄膜质量, 器件只有在液氮温度下才能发光. 随后, Kim 等<sup>[14]</sup> 通过使用 FA, MA 和 Cs 混合阳离子的三维钙钛矿  $Cs_{10}(MA_{0.17}FA_{0.83})_{(100-x)}PbBr_{1.5}Cl_{1.5}$ , 提高了传统三维钙钛矿薄膜的表面覆盖度, 并减少了缺陷, 最终实现发光峰为 475 nm、EQE 为 1.7%、亮度为 3567  $cd\cdot m^{-2}$  的蓝光器件 (图 2). 然而由于混合卤素三维钙钛矿在外加电场下会发生严重的相分离现象, 导致器件在电流密度为 3  $mA\cdot cm^{-2}$  条件下, 150 min

表 1 蓝光钙钛矿发光二极管研究进展

Table 1. Research progress of blue perovskite LEDs.

Perovskites	EL peak/nm	Peak EQE/%	Luminance/ $cd\cdot m^{-2}$	Ref.
$CH_3NH_3Pb(Br_{0.36}Cl_{0.64})_3$	482	—	1.7	[13]
$CH_3NH_3Pb(Br_{0.4}Cl_{0.6})_3$	~ 480	—	—	[12]
$Cs_{10}(MA_{0.17}FA_{0.83})_{(100-x)}PbCl_{1.5}Br_{1.5}$	475	1.7	3567	[14]
$CsPb(Cl/Br)_3$ QDs	455	0.07	742	[15]
$CsMn_yPb_{1-y}Br_xCl_{3-x}$ QDs	466	2.12	245	[16]
(4-PBA)- $CsPbBr_3$ MQWs	435, 466, 491	0.015	186	[10]
POEA- $CH_3NH_3PbBr_3$ MQWs	480, 494, 508	1.1	19.25	[17]
(IPA/PEA)-(MA/Cs) $PbBr_3$ MQWs	490	1.5	2480	[18]
PBA- $CsPbBr_{3-x}Cl_x$ MQWs	473/481	0.16/0.25	217/509	[20]
PEA- $CsPbBr_{2.1}Cl_{0.9}$ MQWs	480	5.7	3780	[11]
BA- $CsPb(Br/Cl)_3$ MQWs	465	2.4	962	[21]
PEA-(Rb/Cs) $PbBr_3$ MQWs	475	1.35	100.6	[19]

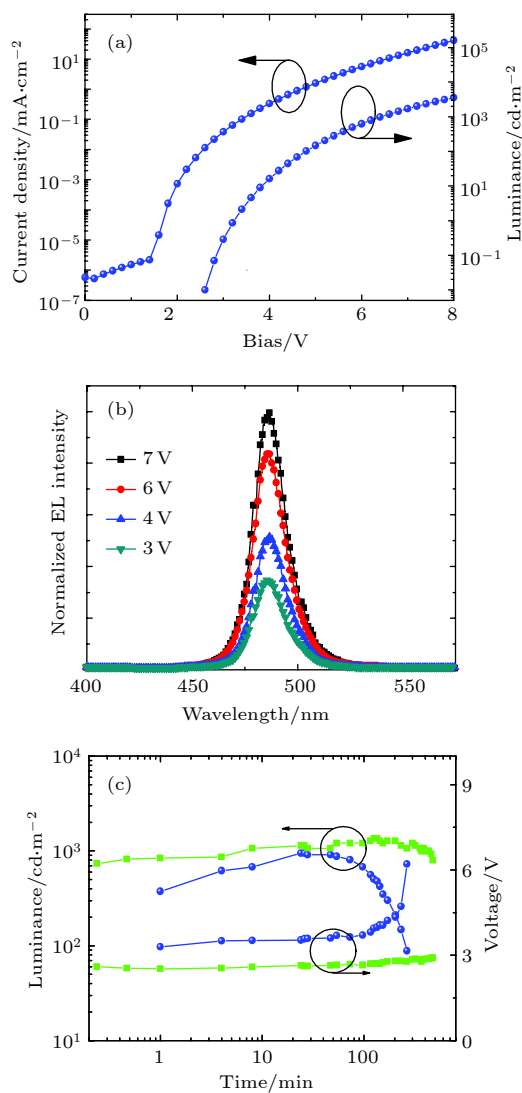


图2 三维蓝光钙钛矿 LED<sup>[14]</sup> (a) 电流密度-电压-亮度; (b) 不同电压下的电致发光 (EL) 光谱; (c) 器件稳定性  
 Fig. 2. Characterization of blue LEDs based on 3D perovskites<sup>[14]</sup>: (a) Current-voltage-luminance; (b) normalized electroluminescence (EL) spectra of device under various voltages; (c) lifetime characteristics of device.

内初始亮度从  $374.5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  降低到  $88.5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , 器件的稳定性远低于单卤素的绿光钙钛矿 LED.

## 2.2 量子点蓝光钙钛矿发光二极管

三维蓝光钙钛矿的优点是载流子迁移率高, 然而其本身较高的缺陷态密度以及存在的混合卤素相分离, 导致器件效率和稳定性都较差. 量子点 (QD) 钙钛矿是在三维钙钛矿的基础上沿某一方向 (如  $\langle 111 \rangle$  方向) 定向生长, 这层的晶胞既不能形成层状结构, 也不能形成链状结构, 而是形成和周围的有机胺阳离子通过氢键作用而连接的零维结

构. 量子点钙钛矿基于量子限域效应实现发光波长的蓝移, 通常具备很高的荧光量子效率, 但其合成过程一般需要加入油酸、长链有机胺等作为配体, 导致薄膜成膜性和导电性差. Song 等<sup>[15]</sup> 通过改进量子点合成方法, 提高其成膜质量, 首次使用全无机钙钛矿  $\text{CsPb}(\text{Cl}/\text{Br})_3$  量子点实现了发光峰为  $455 \text{ nm}$  的深蓝光器件, 器件的亮度为  $742 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , 但是最高 EQE 只有  $0.07\%$ , 并且启亮电压高达  $5.1 \text{ V}$ . Gangishetty 等<sup>[22]</sup> 发现在蓝光钙钛矿 LED 中, 空穴传输层会造成钙钛矿发光层载流子的猝灭, 并在  $\text{CsPbBr}_x\text{Cl}_{3-x}$  量子点的基础上, 采用 PEDOT:PSS/TFB/PFI 代替  $\text{NiO}_x$  空穴传输层, 在不影响钙钛矿晶体质量的前提下, 使发光峰位于  $469 \text{ nm}$  的蓝光器件 EQE 提高到  $0.5\%$  (图 3). 随后, 他们发现通过在钙钛矿纳米晶中掺杂 Mn, 可以进一步减少薄膜中的缺陷态, 从而提高其荧光量子效率, 将发光峰位于  $466 \text{ nm}$  的钙钛矿量子点器件的外量子效率提高到  $2.12\%$ , 亮度为  $245 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ <sup>[16]</sup>.

## 2.3 多量子阱蓝光钙钛矿发光二极管

除了量子点钙钛矿, 在三维钙钛矿基础上引入大尺寸有机阳离子, 通过控制两种具有不同半径尺寸的阳离子与金属卤化阴离子的组分比例, 可以构建具有多量子阱结构 (MQW) 的准二维层状钙钛矿<sup>[23-25]</sup>. 这种准二维钙钛矿是利用溶液自组装方法形成的, 具有自然的多量子阱结构和较好的成膜性, 量子阱宽由钙钛矿结构中的无机框架层数决定, 并且宽带隙量子阱到窄带隙量子阱间可实现有效的能量转移, 可提高发光区域激发态浓度、抑制缺陷态导致的非辐射复合, 是实现蓝光钙钛矿 LED 的有效策略. 2016 年, Cheng 等<sup>[10]</sup> 通过在  $\text{CsPbBr}_3$  中添加苯丁胺溴 (4-PBABr) 首次制备了具有多量子阱结构的单卤素天蓝光钙钛矿器件 (发光主峰位于  $491 \text{ nm}$ ), 并获得了  $0.0015\%$  的 EQE 和  $186 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  的亮度. 随后, Chen 等<sup>[17]</sup> 通过在  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  中引入苯氧乙胺 (POEA) 将发光主峰位于  $494 \text{ nm}$  的天蓝光钙钛矿 LED 的 EQE 提高到  $1.1\%$ . 但是由于钙钛矿多量子阱间未实现有效的能量转移, 器件仍存在多个发光峰, 导致器件在工作条件下发光光谱不稳定. 2018 年, Xing 等<sup>[18]</sup> 采用苯乙胺 (PEA) 和异丙胺 (IPA) 双

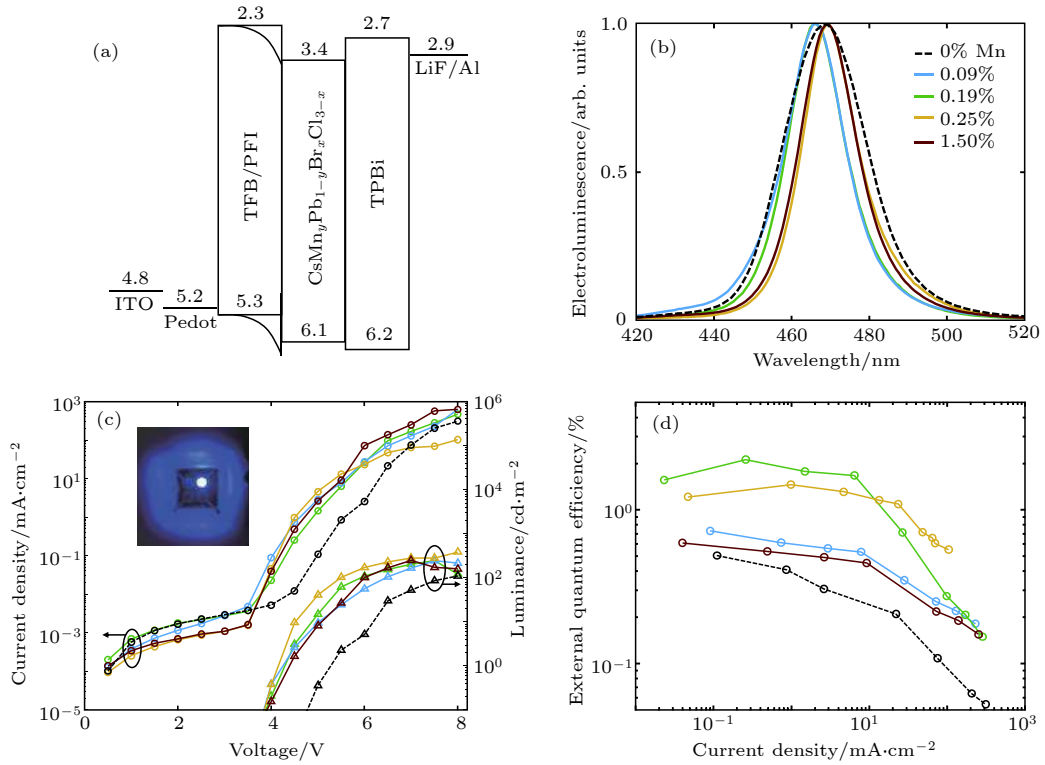


图 3 量子点蓝光钙钛矿 LED<sup>[16]</sup> (a) 器件能级结构图; (b) EL 光谱; (c) 电流密度-电压-亮度; (d) EQE-电流密度

Fig. 3. Characterization of blue LEDs fabricated with nanocrystals of varying Mn content<sup>[16]</sup>: (a) Device structure; (b) normalized EL spectra; (c) current-voltage-luminance; (d) external quantum efficiency (EQE)-current density.

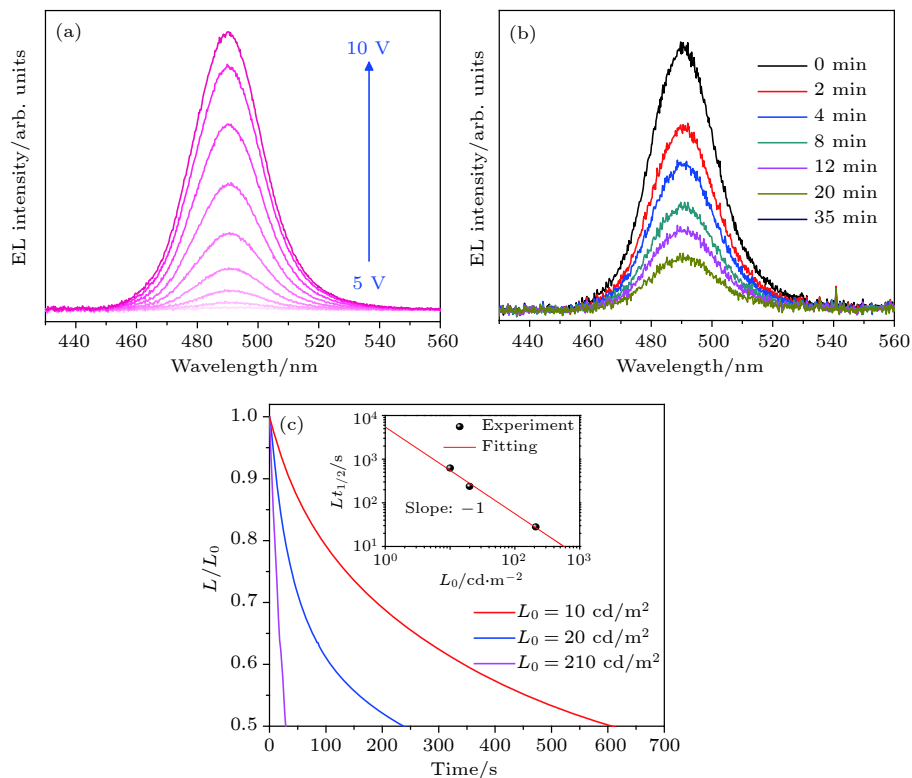


图 4 单卤素多量子阱天蓝光钙钛矿 LED<sup>[18]</sup> (a) 不同电压下的 EL 光谱; (b) 连续工作条件下的 EL 光谱; (c) 不同初始亮度条件下器件的寿命

Fig. 4. Characterization of blue LEDs based on single-halide MQW perovskites<sup>[18]</sup>: (a) EL spectra of perovskite LEDs operating under different voltages; (b) EL spectra of device operating with various exposure time; (c) lifetime measurement of devices at different initial luminance.



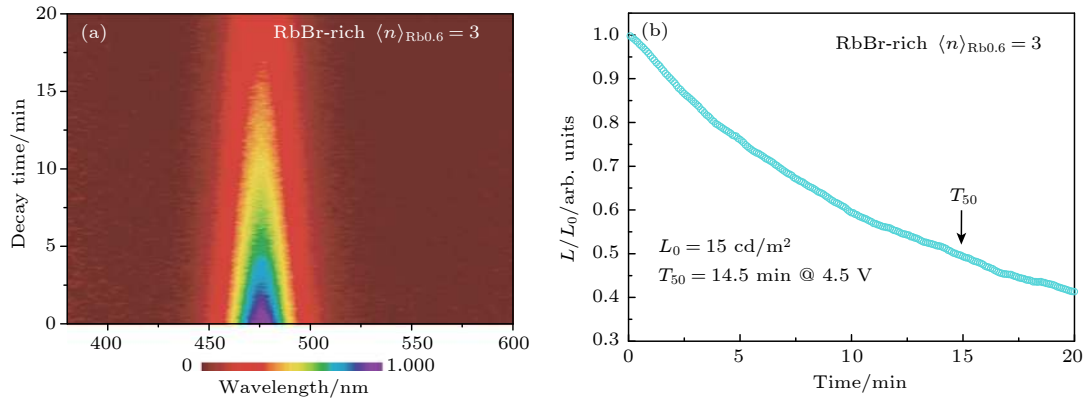


图 5 光谱稳定的单卤素多量子阱蓝光钙钛矿 LED<sup>[19]</sup> (a) 在 4.5 V 电压连续工作条件下器件的 EL 光谱; (b) 4.5 V 电压连续工作条件下器件的稳定性

Fig. 5. Spectra stable blue LED based on single-halide MQW perovskites<sup>[19]</sup>: (a) EL spectrum under a constant applied voltage of 4.5 V as a function of time; (b) lifetime of device at a constant voltage of 4.5 V.

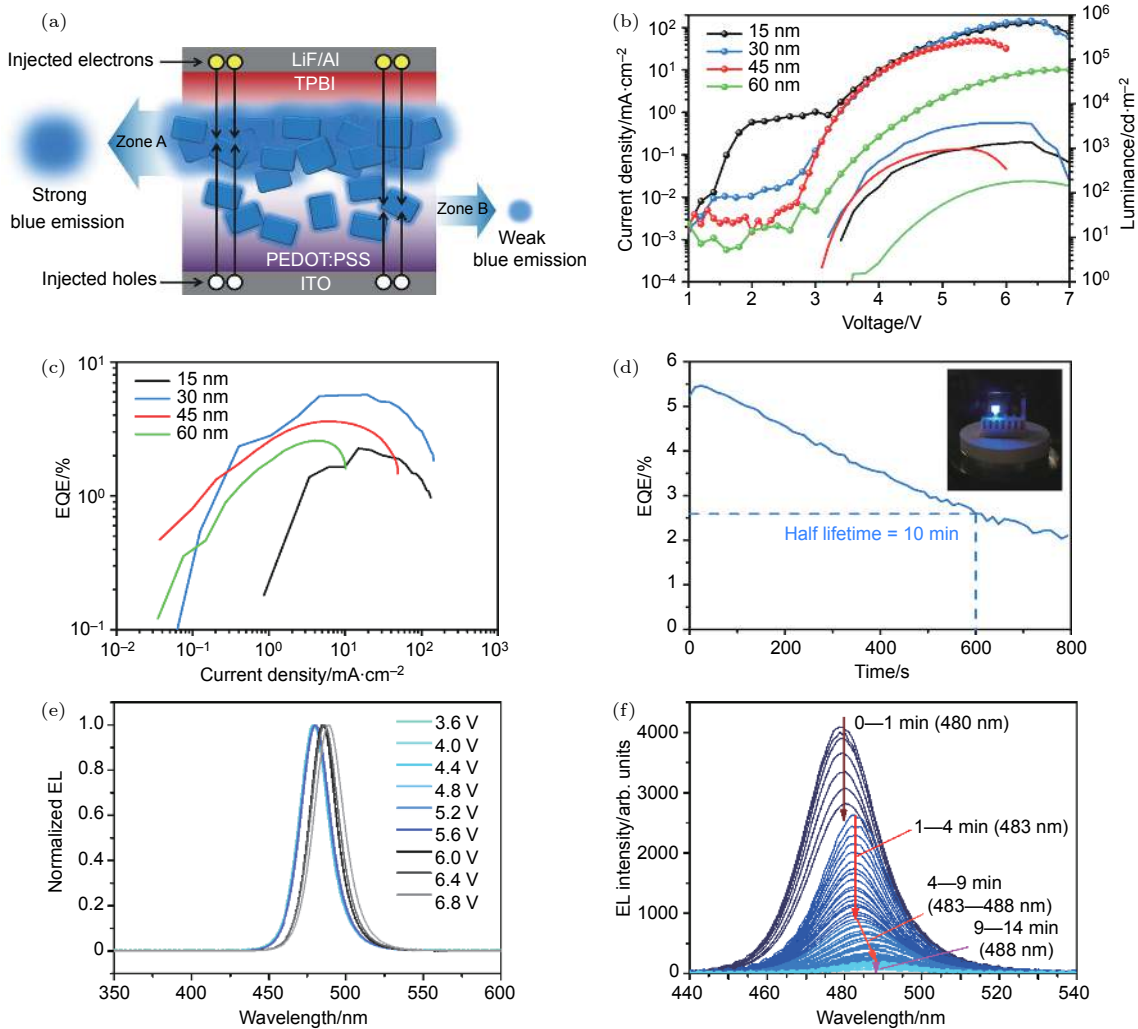


图 6 混合卤素多量子阱蓝光钙钛矿 LED (a) 发光区域调控示意图; (b) 不同 PEDOT:PSS 厚度器件的电流密度-电压-亮度; (c) 不同 PEDOT:PSS 厚度器件的 EQE-电流密度; (d) 4.4 V 电压连续工作条件下器件的稳定性; (e) 不同电压下器件的 EL 光谱; (f) 4.4 V 电压连续工作条件下器件的 EL 光谱<sup>[11]</sup>

Fig. 6. Characterization of blue LEDs based on mixed-halide MQW perovskites: (a) Schematic diagram of the modulation of recombination zone position; (b) current-voltage-luminance; (c) characterization of EQE versus current density; (d) lifetime of device at a constant voltage of 4.4 V; (e) initial EL spectrum under different applied voltages; (f) EL spectrum under a constant applied voltage of 4.4 V as a function of time<sup>[11]</sup>.

大尺寸阳离子调控单卤素钙钛矿的多量子阱结构,有效提高了其能量转移效率,将 490 nm 天蓝光器件 EQE 提高到 1.5%,亮度达到  $2480 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ,并且器件具有较好的稳定性,在 5—10 V 不同电压下连续工作 35 min 后,器件的电致发光光谱未发生明显变化(图 4).然而器件的稳定性依然较差,在  $10 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  初始亮度下,器件半衰期只有 10 min.

虽然具有多量子阱结构的单卤素钙钛矿 LED 已经实现了蓝光钙钛矿 LED 性能的提升,并且在连续工作条件下发光光谱相对稳定,但是器件的发光峰主要位于天蓝光范围,要实现发光峰小于 480 nm 的蓝光需要引入大量有机阳离子,这会导致器件亮度的降低. Jiang 等<sup>[19]</sup>发现采用 Rb 代替部分 Cs,可以进一步使单卤素多量子阱钙钛矿发光峰蓝移,并且可减少薄膜中的缺陷,使蓝光钙钛矿薄膜的 PLQE 达到 82%,最终将发光峰位于 475 nm 器件的 EQE 提高到 1.35%. 并且 Rb-Cs 合金相可以使器件具有较好的稳定性,在 4.5 V 电压连续工作条件下(初始亮度为  $15 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ),半衰期可达到 14.5 min,并且发光光谱基本不变(图 5)<sup>[19]</sup>.

此外,2018 年, Wang 等<sup>[20]</sup>在多量子阱钙钛矿的基础上,基于氯溴混合卤素的协同作用,通过引入少量氯元素,在获得相同发光波长时减少有机长链配体,实现了从 504 nm 绿光到 470 nm 蓝光发光波长的连续可调,并且发光峰位于 481 和 473 nm 器件的 EQE 分别可以达到 0.25% 和 0.16%. 2019 年, Vashishtha 等<sup>[21]</sup>采用类似方法将 465 nm 的蓝光器件的 EQE 和亮度分别提高到 2.4% 和  $962 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ . 最近, Li 等<sup>[11]</sup>通过调控多量子阱钙钛矿的材料组分,获得了高 PLQE 的蓝光钙钛矿薄膜,将发光峰位于 480 nm 器件的最大 EQE 提高到 3.6%. 他们通过进一步改变空穴传输层 PEDOT:PSS 的厚度来调整载流子复合区域,使器件的 EQE 和亮度达到 5.7% 和  $3780 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ,如图 6 所示.但是他们同时也发现在多量子阱钙钛矿中引入混合卤素后,器件的稳定性仍然较差,在 4.4 V 电压下半衰期只有 10 min,并且会造成器件发光光谱红移.当外加电压从 3.6 V 增加到 5.6 V 时,器件发光光谱保持不变,增加到 6 V 时,器件发光光谱会红移 8 nm.此外,他们发现在 4.4 V 连续工作条件下,在初始 1 min 内,发光峰位于 480 nm,此后发光峰逐渐红移到 488 nm,这主要

是由混合卤素钙钛矿的相分离造成的<sup>[26]</sup>.

### 3 总结与展望

蓝光钙钛矿发光二极管是实现钙钛矿 LED 在全色显示领域应用的关键之一,如何通过能带调控实现高性能的蓝光钙钛矿 LED 成为亟待解决的问题.本文回顾了蓝光钙钛矿 LED 在效率、亮度和稳定性方面的研究进展,分析了制约蓝光器件发展的主要因素.结合氯溴掺杂混合卤素和量子限域效应的方法是目前实现发光峰小于 480 nm 的器件的有效手段,很有潜力实现高性能的蓝光 LED.然而混合卤素钙钛矿的相分离以及薄膜中较多缺陷导致的离子迁移,造成器件在工作条件下发光光谱出现红移、效率衰减迅速,成为制约器件性能提升的主要因素.我们认为蓝光钙钛矿 LED 将来的研究方向有:

1) 近年来,通过在钙钛矿材料中引入有机分子形成多量子阱结构,钙钛矿 LED 的稳定性得到明显提高,近红外钙钛矿 LED 的寿命已经可以从几分钟提高到几十小时<sup>[23,27]</sup>.然而对蓝光多量子阱钙钛矿 LED 来说,如何平衡量子阱结构和混合卤素对钙钛矿能带的调控是进一步提高器件性能的关键;

2) 不稳定的晶格结构以及薄膜中的缺陷是造成钙钛矿稳定性差的主要原因<sup>[28-30]</sup>,引入添加剂和表面处理等手段可进一步提高蓝光钙钛矿 LED 的稳定性;

3) 非铅蓝光钙钛矿在保持着和铅基钙钛矿相似晶体结构的基础上,展现出优异的光学性能及良好的空气和光稳定性<sup>[31,32]</sup>,如果能进一步提高其薄膜的成膜质量,在蓝光发光器件上将有很大的应用前景.

### 参考文献

- [1] Deschler F, Price M, Pathak S, Klintberg L E, Jarausch D D, Higler R, Hüttner S, Leijtens T, Stranks S D, Snaith H J, Atatüre M, Phillips R T, Friend R H 2014 *J. Phys. Chem. Lett.* **5** 1421
- [2] Tan Z K, Moghaddam R S, Lai M L, Docampo P, Higler R, Deschler F, Price M, Sadhanala A, Pazos L M, Credgington D, Hanusch F, Bein T, Snaith H J, Friend R H 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 687
- [3] Wang J, Wang N, Jin Y, Si J, Tan Z K, Du H, Cheng L, Dai X, Bai S, He H, Ye Z, Lai M L, Friend R H, Huang W 2015 *Adv. Mater.* **27** 2311

- [4] Era M, Morimoto S, Tsutsui T, Saito S 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 676
- [5] Lin K, Xing J, Quan L N, Arquer F P G de, Gong X, Lu J, Xie L, Zhao W, Zhang D, Yan C, Li W, Liu X, Lu Y, Kirman J, Sargent E H, Xiong Q, Wei Z 2018 *Nature* **562** 245
- [6] Cao Y, Wang N, Tian H, Guo J, Wei Y, Chen H, Miao Y, Zou W, Pan K, He Y, Cao H, Ke Y, Xu M, Wang Y, Yang M, Du K, Fu Z, Kong D, Dai D, Jin Y, Li G, Li H, Peng Q, Wang J, Huang W 2018 *Nature* **562** 249
- [7] Chiba T, Hayashi Y, Ebe H, Hoshi K, Sato J, Sato S, Pu Y J, Ohisa S, Kido J 2018 *Nat. Photon.* **12** 681
- [8] Zhao B, Bai S, Kim V, Lamboll R, Shivanna R, Auras F, Richter J M, Yang L, Dai L, Alsari M, She X J, Liang L, Zhang J, Lilliu S, Gao P, Snaith H J, Wang J, Greenham N C, Friend R H, Di D 2018 *Nat. Photon.* **12** 783
- [9] Xu W, Hu Q, Bai S, Bao C, Miao Y, Yuan Z, Borzda T, Barker A J, Tyukalova E, Hu Z, Kawecki M, Wang H, Yan Z, Liu X, Shi X, Uvdal K, Fahlman M, Zhang W, Duchamp M, Liu J M, Petrozza A, Wang J, Liu L M, Huang W, Gao F 2019 *Nat. Photon.* **13** 418
- [10] Cheng L, Cao Y, Ge R, Wei Y Q, Wang N N, Wang J P, Huang W 2017 *Chin. Chem. Lett.* **28** 29
- [11] Li Z, Chen Z, Yang Y, Xue Q, Yip H L, Cao Y 2019 *Nat. Commun.* **10** 1027
- [12] Sadhanala A, Ahmad S, Zhao B, Giesbrecht N, Pearce P M, Deschler F, Hoye R L Z, Gödel K C, Bein T, Docampo P, Dutton S E, de Volder M F L, Friend R H 2015 *Nano Lett.* **15** 6095
- [13] Kumawat N K, Dey A, Kumar A, Gopinathan S P, Narasimhan K L, Kabra D 2015 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **7** 13119
- [14] Kim H P, Kim J, Kim B S, Kim H M, Kim J, Yusoff A R bin M, Jang J, Nazeeruddin M K 2017 *Adv. Opt. Mater.* **5** 1600920
- [15] Song J, Li J, Li X, Xu L, Dong Y, Zeng H 2015 *Adv. Mater.* **27** 7162
- [16] Hou S, Gangishetty M K, Quan Q, Congreve D N 2018 *Joule* **2** 2421
- [17] Chen Z, Zhang C, Jiang X F, Liu M, Xia R, Shi T, Chen D, Xue Q, Zhao Y J, Su S, Yip H L, Cao Y 2017 *Adv. Mater.* **29** 1603157
- [18] Xing J, Zhao Y, Askerka M, Quan L N, Gong X, Zhao W, Zhao J, Tan H, Long G, Gao L, Yang Z, Voznyy O, Tang J, Lu Z H, Xiong Q, Sargent E H 2018 *Nat. Commun.* **9** 3541
- [19] Jiang Y, Qin C, Cui M, He T, Liu K, Huang Y, Luo M, Zhang L, Xu H, Li S, Wei J, Liu Z, Wang H, Kim G H, Yuan M, Chen J 2019 *Nat. Commun.* **10** 1868
- [20] Wang K H, Peng Y, Ge J, Jiang S, Zhu B S, Yao J, Yin Y C, Yang J N, Zhang Q, Yao H B 2019 *ACS Photon.* **6** 667
- [21] Vashishtha P, Ng M, Shivarudraiah S B, Halpert J E 2019 *Chem. Mater.* **31** 83
- [22] Gangishetty M K, Hou S, Quan Q, Congreve D N 2018 *Adv. Mater.* **30** 1706226
- [23] Wang N, Cheng L, Ge R, Zhang S, Miao Y, Zou W, Yi C, Sun Y, Cao Y, Yang R, Wei Y, Guo Q, Ke Y, Yu M, Jin Y, Liu Y, Ding Q, Di D, Yang L, Xing G, Tian H, Jin C, Gao F, Friend R H, Wang J, Huang W 2016 *Nat. Photon.* **10** 699
- [24] Sun Y, Zhang L, Wang N, Zhang S, Cao Y, Miao Y, Xu M, Zhang H, Li H, Yi C, Wang J, Huang W 2018 *npj Flexible Electron.* **2** 12
- [25] Zou W, Li R, Zhang S, Liu Y, Wang N, Cao Y, Miao Y, Xu M, Guo Q, Di D, Zhang L, Yi C, Gao F, Friend R H, Wang J, Huang W 2018 *Nat. Commun.* **9** 608
- [26] Li G, Rivarola F W R, Davis N J L K, Bai S, Jellicoe T C, de la Peña F, Hou S, Ducati C, Gao F, Friend R H, Greenham N C, Tan Z K 2016 *Adv. Mater.* **28** 3528
- [27] Yang M, Wang N, Zhang S, Zou W, He Y, Wei Y, Xu M, Wang J, Huang W 2018 *J. Phys. Chem. Lett.* **9** 2038
- [28] Ke Y, Wang N, Kong D, Cao Y, He Y, Zhu L, Wang Y, Xue C, Peng Q, Gao F, Huang W, Wang J 2019 *J. Phys. Chem. Lett.* **10** 380
- [29] Wang F, Geng W, Zhou Y, Fang H H, Tong C J, Loi M A, Liu L M, Zhao N 2016 *Adv. Mater.* **28** 9986
- [30] Li C, Guerrero A, Huettner S, Bisquert J 2018 *Nat. Commun.* **9** 5113
- [31] Zhang J, Yang Y, Deng H, Farooq U, Yang X, Khan J, Tang J, Song H 2017 *ACS Nano* **11** 9294
- [32] Jun T, Sim K, Iimura S, Sasase M, Kamioka H, Kim J, Hosono H 2018 *Adv. Mater.* **30** 1804547



SPECIAL TOPIC—Perovskite optoelectronic devices and physics

Blue perovskite light-emitting diodes:  
opportunities and challenges\*

Duan Cong-Cong   Cheng Lu   Yin Yao<sup>†</sup>   Zhu Lin<sup>‡</sup>

(*Institute of Advanced Materials (IAM), Nanjing Tech University (NanjingTech), Nanjing 210009, China*)

( Received 17 May 2019; revised manuscript received 25 May 2019 )

**Abstract**

The great progress of light-emitting diodes (LEDs) has been made based on perovskites, and the external quantum efficiency of near infrared, red and green devices have reached  $> 20\%$ , exhibiting their great potential applications in lighting and displays. However, the performance of blue perovskite LEDs is very poor, thus limiting their applications in the field of full-color displays. The blue perovskite LEDs can be achieved through mixed halides or quantum confinement effect. In this paper, we review the research progress of blue perovskite LEDs based on these two strategies, discuss the challenges to achieve high-performance perovskite LEDs and present our perspectives.

**Keywords:** perovskite light-emitting diodes, blue, quantum confinement effect, halogen doping

**PACS:** 85.60.Jb, 78.60.Fi, 81.07.Pr

**DOI:** [10.7498/aps.68.20190745](https://doi.org/10.7498/aps.68.20190745)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 21601085) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20161008).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [iamyyin@njtech.edu.cn](mailto:iamyin@njtech.edu.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [iamlzhu@njtech.edu.cn](mailto:iamlzhu@njtech.edu.cn)