

文章编号: 1000-7032(2024)04-0637-07

## 乙酸胍表面处理提高纯红光钙钛矿发光二极管性能

师明明<sup>1,2</sup>, 江 季<sup>1,2</sup>, 张兴旺<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院 半导体研究所, 半导体材料科学重点实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

**摘要:** 金属卤化物钙钛矿材料由于具有优异的光电性质可被用于制作发光二极管, 近年来备受关注。钙钛矿表面和钙钛矿/传输层的界面处存在大量的缺陷, 严重影响器件的性能和稳定性, 而对表/界面进行有效的钝化处理是减少界面缺陷、提升器件性能的可行途径。本文报道了一种在萃取剂中添加乙酸胍的表面处理策略, 可有效地减少钙钛矿层表面缺陷, 改善薄膜形貌, 进而将钙钛矿薄膜的荧光量子产率从 64% 提升到 79%。基于乙酸胍表面处理的钙钛矿薄膜制备的发光二极管, 最大效率可达 11.66%, 最大亮度达  $1285 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , 明显优于未处理的参考器件 ( $6.69\%$ ,  $689 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ), 同时也展现出更好的稳定性。该研究提供了一种有效的钙钛矿表面处理策略, 可以提高钙钛矿发光二极管的性能和稳定性。

**关键词:** 钙钛矿; 发光二极管; 表面处理; 准二维; 缺陷钝化

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230336

## Enhanced Performance of Pure-red Perovskite Light-emitting Diodes by Surface Modification with Guanidine Acetate

SHI Mingming<sup>1,2</sup>, JIANG Ji<sup>1,2</sup>, ZHANG Xingwang<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Lab of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding Author, E-mail: xwzhang@semi.ac.cn

**Abstract:** Metal-halide perovskite materials have attracted much attention in recent years due to their excellent optoelectronic properties, which can be used to fabricate light-emitting layers of light-emitting diodes. However, there are a large number of defects on the surface of perovskite and at the interface between the perovskite layer and the transport layer, which seriously affects the performance and stability of the device, and the surface/interface treatment has been proven to be an effective way to reduce the interface defects and improve the performance of the device. Therefore, a surface treatment strategy of adding guanidine acetate to the extractant was reported, which could effectively reduce the surface defects and improve the morphology of the perovskite film, thereby increasing the photoluminescence quantum yields of perovskite film from 64% to 79%. The maximum efficiency of the devices prepared based on the surface treatment of perovskite films can reach 11.66% and the maximum brightness exceeds  $1285 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , which is significantly better than that of the control devices ( $6.69\%$ ,  $689 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ), and also shows better stability. This study provides an effective perovskite surface treatment strategy to improve the performance and stability of perovskite light-emitting diodes.

**Key words:** perovskite; lighting-emitter diode; surface treatment; quasi-2D; defect passivation

收稿日期: 2023-12-30; 修订日期: 2024-01-18

基金项目: 中国科学院战略先导专项(XDB43000000)

Supported by Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences(XDB43000000)

## 1 引 言

金属卤化物钙钛矿因具有高荧光量子产率(PLQY)、宽色域、高发光纯度、带隙可调、高载流子迁移率等优点,非常适合制备面向照明和显示的发光二极管(LED),成为光电子领域的明星材料<sup>[1-5]</sup>。2014年,剑桥大学 Friend等<sup>[6]</sup>首次制备出室温下工作的钙钛矿LED(PeLED),实现了外量子效率(EQE)分别为0.76%的近红外与0.4%的绿光发射,开启了PeLED研究的先河。近年来,PeLED的性能飞速提升,绿光PeLED的效率已提升至30%<sup>[7]</sup>,红光PeLED的效率也达到25%以上<sup>[8]</sup>。但是,符合国际Rec. 2020标准的面向全彩显示应用的纯红光(发光波长630~640 nm)PeLED的效率和稳定性还有待提升。

钙钛矿表面和钙钛矿/传输层界面不可避免地存在着诸多缺陷,而这些缺陷严重影响PeLED的发光效率和稳定性<sup>[9-11]</sup>。目前,已有很多研究致力于减少表面/界面缺陷,改善载流子注入,从而提升器件性能。Guo等<sup>[12]</sup>通过在PEDOT中添加硫氰酸铵钝化钙钛矿/空穴传输层界面的缺陷,从而将PeLED器件的效率从3.2%提升至14.7%;Wang<sup>[13]</sup>和Gu<sup>[14]</sup>等通过在空穴传输层和钙钛矿之间使用等离子体处理,钝化了界面缺陷,实现了高效的空穴注入,有效地提高了发光器件的性能;Zhang等<sup>[15]</sup>巧妙地开发了具有不同末端官能团的9,9-取代茚衍生物以实现全面钝化,即同时对钙钛矿上下表面进行处理,从而大大提高了器件性能和稳定性。

以上钝化策略被广泛地应用到绿光和蓝光钙钛矿发光二极管中,而其中大部分添加剂添加到卤素主要为I的红光二极管中没有明显作用,因此,寻找更多有效、适合红光钙钛矿的表/界面钝化剂对进一步提高纯红光PeLED的性能意义重大。本文提出一种简单有效的策略对钙钛矿薄膜进行表面处理,即在萃取剂中添加乙酸酐,萃取过程中,引入的乙酸酐有效改善了薄膜形貌,减少了表面缺陷,从而抑制了界面非辐射复合,改善载流子注入,并且提高了钙钛矿薄膜的PLQY,使得PeLED的外量子效率从6.69%提升到11.66%,最大亮度从689 cd·m<sup>-2</sup>提升到1285 cd·m<sup>-2</sup>,同时器件稳定性也得到了很大提升。

## 2 实 验

### 2.1 实验材料与溶液配制

二甲基亚砜(DMSO)、氟化锂(LiF)、碘化铅(PbI<sub>2</sub>)、溴化铅(PbBr<sub>2</sub>)、碘化铯(CsI)、氯苯(CB)从西格玛奥德里奇公司购买,苯乙胺碘(PEAI)、1-萘甲胺碘(NMAI)、三[2,4,6-三甲基-3-(3-吡啶基)苯基]硼烷(3TPYMB,3T)从西安日浴光能公司购买,聚[双(4-苯基)(4-丁基苯基)胺](poly-TPD)从1-Material公司购买。

poly-TPD为浓度10 mg/mL的氯苯溶液;钙钛矿溶液是通过将碘化铅、溴化铅、碘化铯、苯乙胺碘和1-萘甲胺碘分别按照0.19,0.21,0.3,0.32,0.08 mol/L的浓度混合后溶解于极性溶剂DMSO中,搅拌2 h,并用0.45 μm过滤器过滤后得到,最终钙钛矿组分为(PEA<sub>0.8</sub>NMA<sub>0.2</sub>)<sub>2</sub>-CsPb<sub>2</sub>(Br<sub>0.3</sub>I<sub>0.7</sub>)<sub>7</sub>。实验中用到的萃取剂为乙酸乙酯,乙酸酐溶解于乙酸乙酯中通过萃取引入钙钛矿表面。

### 2.2 制备方法

本实验所用的衬底为氧化铟锡(ITO)。首先,将购买的ITO衬底依次使用清洗剂、水、丙酮、异丙醇超声清洗各30 min(两次)后用氮气吹干,之后在紫外臭氧清洗机中处理40 min。随后将聚乙撑二氧噻吩-聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS)水溶液过滤后以7000 r·min<sup>-1</sup>的速度旋涂在清洁处理的ITO衬底上,旋涂时间为40 s,并在160 °C下退火15 min;然后将ITO移至充满氮气的手套箱中,在ITO/PEDOT:PSS上以5000 r·min<sup>-1</sup>的速度旋涂poly-TPD,旋涂时间为40 s,并在150 °C下退火20 min;接下来在poly-TPD上以8000 r·min<sup>-1</sup>的转速旋涂上述制备的钙钛矿前驱体溶液,旋涂时间为70 s,在旋涂开始后的第12 s快速滴加乙酸乙酯反溶剂进行萃取,旋涂完毕后在80 °C下退火10 min;最后使用热蒸发技术依次蒸发40 nm厚的3T、1 nm厚的LiF和100 nm厚的Al。通过在上述萃取过程中使用2.1节中所述的添加乙酸酐的萃取剂萃取得到表面处理的钙钛矿薄膜和器件。

### 2.3 样品表征

钙钛矿薄膜的X射线衍射(XRD)谱以Cu Kα为X射线源,在Rigaku D/max 2500H衍射仪上测得;扫描电镜(SEM)图像是使用配备场发射枪的FEI NanoSEM650系统获得;使用Cary 5000光谱

仪在双光束模式下测量紫外-可见吸收光谱(UV-Vis);使用爱丁堡FLS1000光谱仪在室温和环境空气中采集稳态光致发光(PL)光谱和瞬态PL(TRPL),分别使用氙灯发出的360 nm紫外光和375 nm激光器作为激发光;钙钛矿薄膜的PLQY使用光焱科技LQE-50-PL测量系统,采用368 nm LED作为激发光;器件的EQE、电流密度-电压-亮度( $J-V-L$ )曲线、电致发光、CIE坐标图及稳定性测量均采用集成了积分球和光电倍增管的光焱LQE-50-EL系统测试得到,其最低可测试亮度低至 $10^{-4}$  cd·m $^{-2}$ 。所有电学测试均在室温和环境空气中进行,器件均未封装。

### 3 结果与讨论

为了探究乙酸胍对钙钛矿上表面的影响,我们使用未添加和添加乙酸胍的萃取剂对钙钛矿进

行萃取,分别制备了不同的钙钛矿薄膜和PeLED器件,从而进行比较研究。鉴于钙钛矿薄膜的质量对PeLED器件的性能有很大影响,我们对未添加和添加乙酸胍的萃取剂萃取得到的薄膜进行了SEM测试,结果如图1所示。可以看到,其结构形态大致相同,但是可以明显观察到未添加乙酸胍的钙钛矿薄膜(图1(a))存在很多细小的针孔缺陷,这些针孔在器件的电致发光过程中会产生很大的漏电流,从而影响器件的性能;而相比于参考样品,添加适量( $5\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ )乙酸胍的薄膜(图1(b))孔洞数量明显减少,同时孔洞尺寸也有所减小,具有更好的薄膜形貌,有利于我们制备高性能的LED器件。而添加更多的乙酸胍( $10\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ )之后,薄膜中产生了很多较小的孔洞,我们推测这是因为过多的乙酸胍影响了钙钛矿的结晶过程,导致形貌更差(图1(c))。

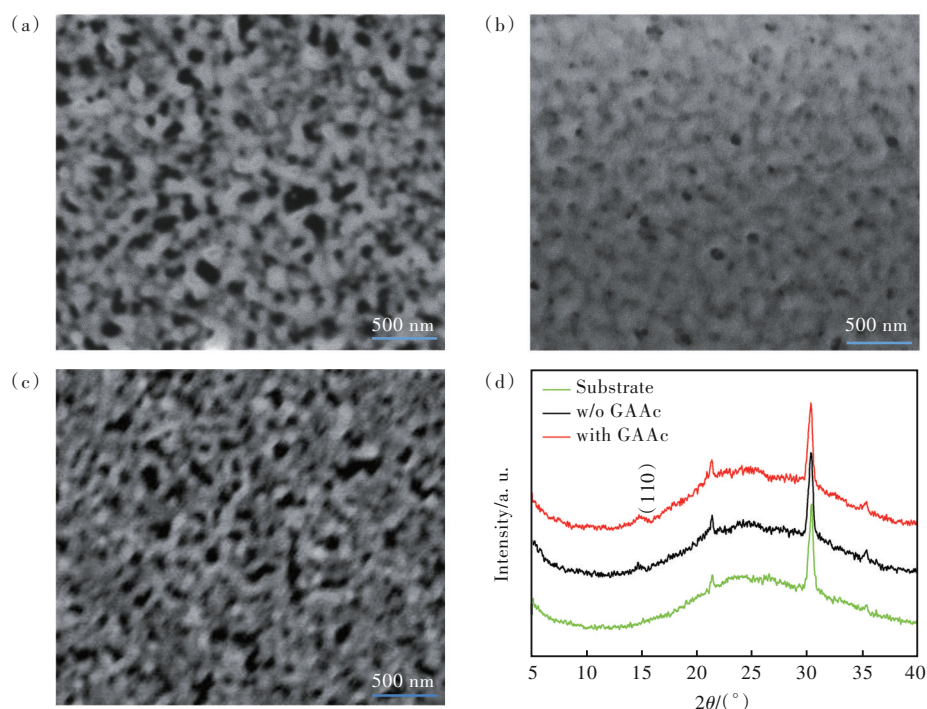


图1 未添加乙酸胍(a)、添加5 mg/mL(b)和10 mg/mL(c)乙酸胍的钙钛矿薄膜的SEM图像;(d)两种钙钛矿薄膜的XRD谱

Fig.1 The SEM images of perovskite films without (a), with 5 mg/mL(b) and with 10 mg/mL(c) guanidine acetate. (d) XRD pattern of perovskite films

为了探究使用乙酸胍进行表面处理对钙钛矿薄膜结构的影响,我们对制备的钙钛矿薄膜进行了XRD测量,如图1(d)所示。可以观察到,不论是否添加乙酸胍,钙钛矿薄膜都存在基本相同的衍射峰,即在 $14.72^\circ$ 附近的XRD衍射峰,根据文献报道,该衍射峰对应着钙钛矿的(110)面<sup>[16-17]</sup>,说

明乙酸胍引入与否不影响钙钛矿的结构。同时我们发现,添加了乙酸胍的钙钛矿薄膜,其衍射峰更强,显示出更高的晶体质量,表明添加乙酸胍有利于钙钛矿薄膜结晶质量的提升,这对制备高性能的发光器件大有裨益。另外,与参考样品相比,使用添加乙酸胍的萃取剂萃取得到的钙钛矿薄膜,

其衍射峰的半高宽略大,说明形成的晶粒更小,有利于对载流子的限制,从而实现高性能的PeLED。

以上结果表明,使用添加乙酸胍的萃取剂制备的钙钛矿薄膜更平滑致密、晶体质量更好、晶粒更小,从而有利于制备高性能的PeLED。

PeLED作为发光器件,其发光层的光学性质对器件性能影响也很大,因此我们对制备的钙钛矿薄膜进行了光学表征。钙钛矿薄膜的PL和UV-Vis光谱如图2(a)、(b)所示。从PL谱中可以看到使用未添加与添加乙酸胍的萃取剂制备的钙钛矿薄膜的发光峰位保持一致,均位于632 nm。同时,从UV-Vis谱中也可以观察到两种薄膜的带边吸收均位于645 nm左右,并在520 nm附近存在一个吸收峰,对应于准二维中 $n=1$ 相的吸收峰,这一低维相的峰在PL谱中也可以观察到,表明使用

添加乙酸胍的萃取剂不会影响准二维钙钛矿的相分布和发光波长。

我们使用TRPL分析了未添加/添加乙酸胍制备的钙钛矿薄膜的电荷载流子复合动力学,如图2(c)所示;采用三指数衰减拟合TRPL曲线,拟合结果如表1所示。可以发现添加乙酸胍制备的薄膜具有更长的载流子寿命(9.25 ns),明显高于未添加乙酸胍的钙钛矿薄膜(7.76 ns),这意味在添加乙酸胍之后,钙钛矿薄膜中的缺陷密度有所减少,即乙酸胍对钙钛矿上表面进行了有效的缺陷钝化。为了进一步验证这一猜想,我们对两种钙钛矿薄膜进行了PLQY测试,如图2(d)所示,添加乙酸胍制备的钙钛矿薄膜PLQY达到了79%,远远超过未添加乙酸胍的薄膜(64%),说明乙酸胍表面处理确实减少了钙钛矿薄膜表面缺陷,从而改善其发光性能。

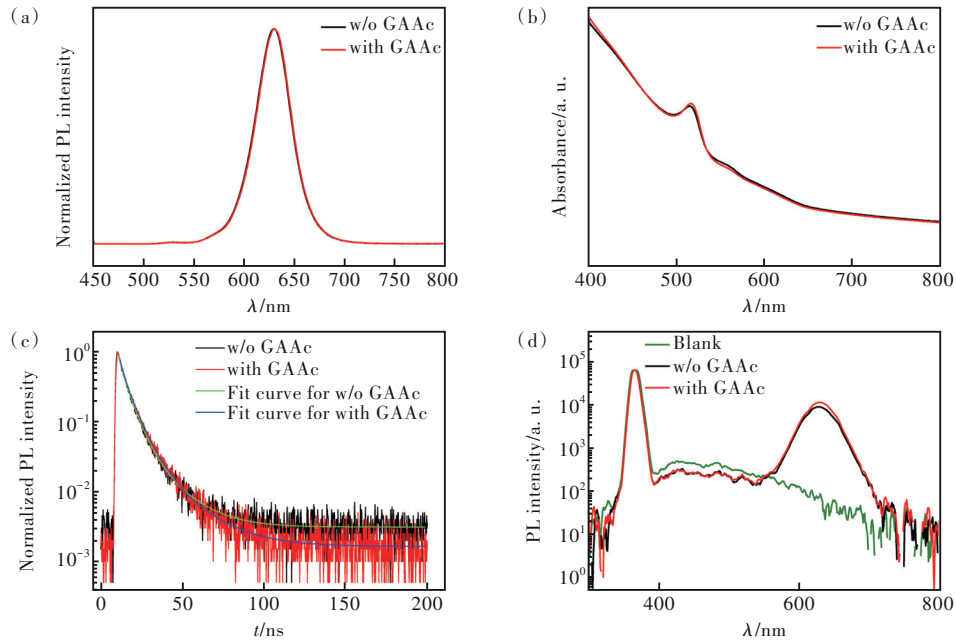


图2 钙钛矿薄膜的PL谱(a)、UV-Vis谱(b)、TRPL曲线(c)和PLQY曲线(d)

Fig.2 The PL spectra(a), UV-Vis spectra(b), TRPL(c) and PLQY(d) of perovskite films

表1 TRPL数据拟合结果

Tab. 1 The fitting results of TRPL

	$A$	$\tau_1/\text{ns}$	$B$	$\tau_2/\text{ns}$	$C$	$\tau_3/\text{ns}$	$\tau_{\text{ave}}/\text{ns}$
w/o GAAc	0.73	5.47	0.24	2.03	0.09	15.65	7.76
with GAAc	0.65	3.83	0.33	10.00	0.007	43.37	9.25

我们基于上述两种钙钛矿薄膜制备了PeLED,器件结构如图3(a)所示。我们采用PEDOT:PSS-Na和Poly-TPD作为空穴传输层,3T作为电子传输层;其中空穴传输层厚度约为30 nm,钙钛矿层厚度约为50 nm,电子传输层厚度约为40 nm。图

3(b)、(c)分别给出了器件的EL光谱和CIE坐标,可以发现我们制备的PeLED的EL发光波长在635 nm,CIE坐标为(0.691,0.309),与Rec. 2020标准中纯红光的坐标(0.708,0.292)非常接近,说明我们成功制备了纯红光PeLED。

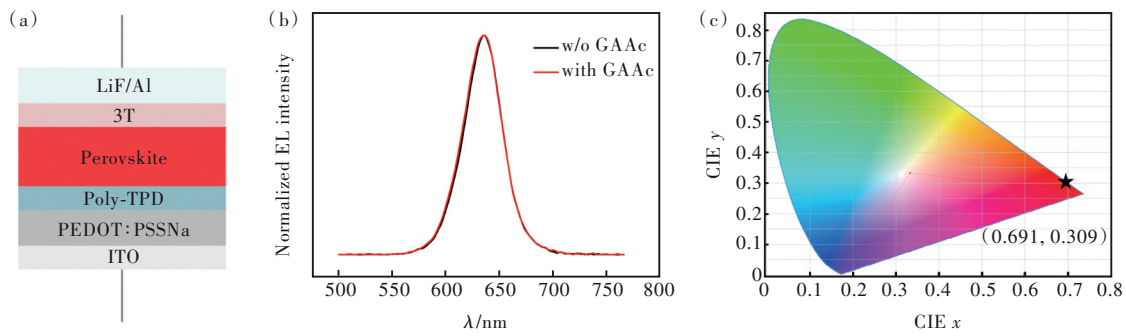


图 3 (a)器件结构图;(b)器件EL光谱;(c)器件发光的CIE坐标

Fig.3 The structure(a), EL spectra(b) and CIE coordinate(c) of the PeLEDs

我们进一步测量了器件的电学性能,如图 4 所示。从图 4(a)的  $J$ - $V$  曲线可以看出,在引入乙酸胍表面处理后,在未开启前器件的漏电流有所减小,而高偏压下电流增大,前者有利于提高 PeLED 的外量子效率,后者有利于其亮度的提升。因此,乙酸胍的引入不仅使器件的外量子效率有所提升,亮度也大大增加(图 4(b)、(c))。另外,我们还对不同浓度乙酸胍表面处理的器件进行了测试,未添加乙酸胍与乙酸胍的浓度分别为 1, 2.5, 5, 7.5, 10  $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$  时,器件的最大 EQE 分别为 6.69%、7.67%、9.59%、11.66%、9.68%、9.26%(图 5(a)),最大亮度分别为 689, 721, 1 195, 1 285, 901, 920  $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 5(b))。可以看出,在萃取剂中添加 1~10  $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$  的乙酸胍,器件性能有着不

同程度的提升,其中添加 5  $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$  乙酸胍的器件性能最好,外量子效率可以达到 11.66%,远远超过不使用乙酸胍的器件(6.69%),亮度也从不到 700  $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$  增加到接近 1 300  $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 。这一结果表明,使用乙酸胍进行表面处理不仅能够改善薄膜形貌和性质,还可以使发光器件的性能得到显著提升。乙酸胍的结构如图 4(a)中插图所示,我们认为适量的乙酸胍不仅可以减少薄膜中的孔洞,乙酸离子中的  $\text{C}=\text{O}$  可以和未配位的 Pb 结合从而钝化部分 I 空位,而胍离子可以填补部分 Cs 空位缺陷。但是,过多的乙酸胍会影响钙钛矿结晶,不利于形成高质量的薄膜(图 1(c)),器件结果也表明乙酸胍的最佳添加量为 5  $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。为了验证这种策略的可重复性,我们对两种条件下制备的 20 个器件的

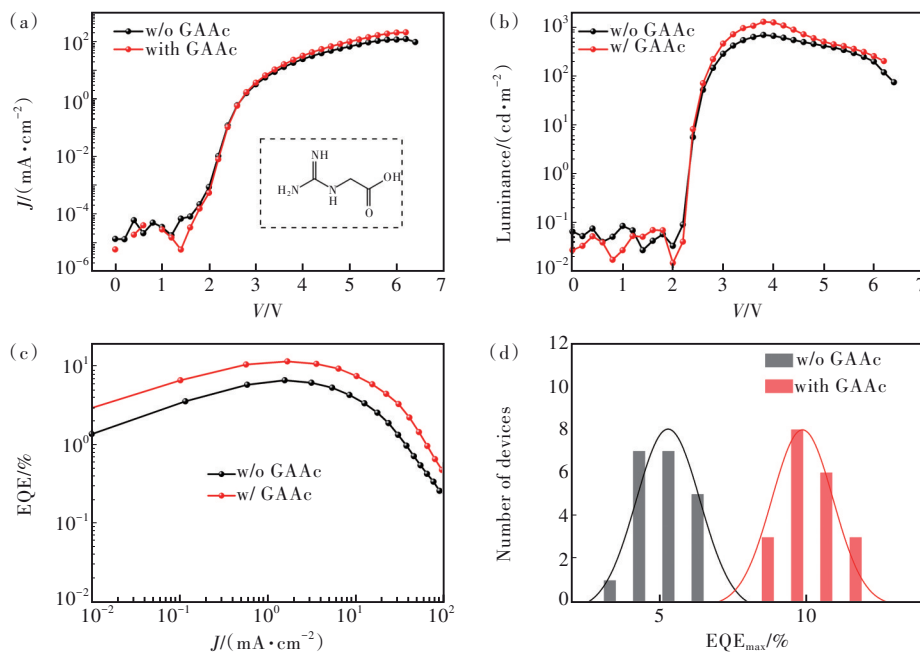


图 4 (a)器件的  $J$ - $V$  曲线,插图为乙酸胍结构;(b) $L$ - $V$  曲线;(c)EQE- $J$  曲线;(d)器件的 EQE 统计数据

Fig.4 (a)-(d) Current density-voltage ( $J$ - $V$ ) (the inset is structure of guanidine acetate), luminance-voltage ( $L$ - $V$ ) and external quantum efficiency-current density (EQE- $J$ ) curve, histogram of peak EQEs of PeLEDs without and with guanidine acetate

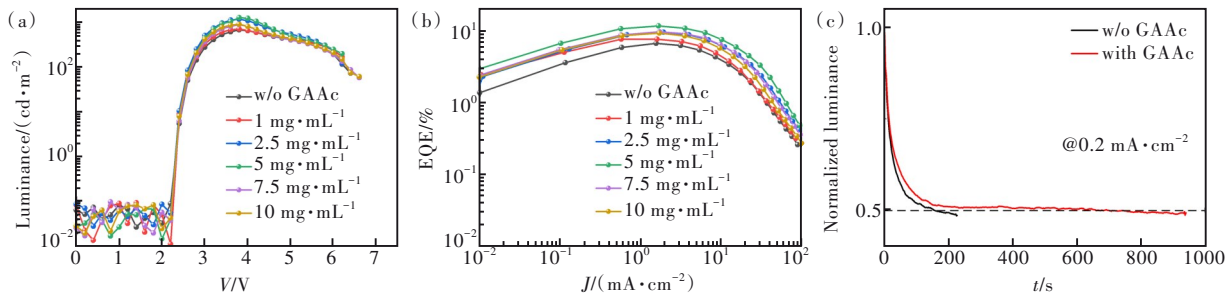


图5 添加不同浓度乙酸胍器件的 $L$ - $V$ (a)和 $EQE$ - $J$ (b)曲线;(c)未添加和添加乙酸胍器件的亮度随时间衰减曲线

Fig.5 The  $L$ - $V$ (a) and  $EQE$ - $J$ (b) curves of PeLEDs with different concentration of guanidine acetate. (c) The luminance-time ( $L$ - $t$ ) curve of PeLEDs without and with guanidine acetate

$EQE$ 分布进行了统计,结果如图4(d)所示,添加乙酸胍的器件显示出更高的平均效率(9.763%),而未添加乙酸胍的器件的平均效率仅为5.315%。

最后,我们测试了器件的操作稳定性。在初始亮度为 $100 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 、恒定电流(两种器件都在 $0.2 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 附近)条件下,经过乙酸胍表面处理的器件,其 $T_{50}$ 寿命(器件亮度衰减至初始亮度一半所需的时间)为653 s,是未用乙酸胍表面处理的器件的三倍多(186 s)。这表明乙酸胍处理钙钛矿表面不仅可以改善器件的性能,还对器件的稳定性有很大提升,进一步显示乙酸胍表面处理是一种提高PeLED性能和稳定性的有效策略。

## 4 结 论

我们通过在萃取剂中添加乙酸胍对钙钛矿

薄膜进行表面处理,在不改变钙钛矿发光波长的前提下,改善了薄膜形貌,提升了晶体质量,进而减少了钙钛矿/传输层的界面缺陷,增加了钙钛矿薄膜的PL寿命,提高了薄膜的荧光量子产率。在此基础上制备的PeLED外量子效率从6.69%提升到11.66%,最大亮度从 $689 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 提升到 $1285 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ,同时器件的稳定性也得到了明显改善。上述结果表明,使用乙酸胍对钙钛矿进行表面处理有利于提高薄膜质量,减少表面缺陷,是一种提升PeLED性能和稳定性的有效方法。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230336>.

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] FAKHARUDDIN A, GANGISHETTY M K, ABDI-JALEBI M, *et al.* Perovskite light-emitting diodes [J]. *Nat. Electron.*, 2022, 5(4): 203-216.
- [ 2 ] 柳贺夫, 刘岳峰, 冯晶. 气相沉积全无机钙钛矿传输层和发光层提高红光钙钛矿发光二极管性能 [J]. *发光学报*, 2023, 44(5): 873-880.  
LIU H F, LIU Y F, FENG J. Vapor deposition of all inorganic perovskite transport layer and emission layer to improve performance of red perovskite light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(5): 873-880. (in Chinese)
- [ 3 ] 卜世啸, 葛子义. 钙钛矿发光二极管的研究进展 [J]. *液晶与显示*, 2021, 36(1): 105-112.  
BU S X, GE Z Y. Research progress of perovskite light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2021, 36(1): 105-112. (in Chinese)
- [ 4 ] 尹勇明, 孟鸿. 量子点、钙钛矿色转换全彩显示应用研究进展 [J]. *发光学报*, 2021, 42(4): 419-447.  
YIN Y M, MENG H. Progress of quantum dots and perovskite as color conversion materials for full-color display [J]. *J. Lumin.*, 2021, 42(4): 419-447. (in Chinese)
- [ 5 ] KIM J S, HEO J M, PARK G S, *et al.* Ultra-bright, efficient and stable perovskite light-emitting diodes [J]. *Nature*, 2022, 611(7937): 688-694.
- [ 6 ] TAN Z K, MOGHADDAM R S, LAI M L, *et al.* Bright light-emitting diodes based on organometal halide perovskite [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2014, 9(9): 687-692.
- [ 7 ] BAI W H, XUAN T T, ZHAO H Y, *et al.* Perovskite light-emitting diodes with an external quantum efficiency exceeding

- 30% [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(39): 2302283.
- [ 8 ] JIANG J, CHU Z M, YIN Z G, *et al.* Red perovskite light-emitting diodes with efficiency exceeding 25% realized by co-spacer cations [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(36): 2204460.
- [ 9 ] WALSH A, SCANLON D O, CHEN S Y, *et al.* Self-regulation mechanism for charged point defects in hybrid halide perovskites [J]. *Angew. Chem.*, 2015, 127(6): 1811-1814.
- [ 10 ] RAN C X, XU J T, GAO W Y, *et al.* Defects in metal triiodide perovskite materials towards high-performance solar cells: origin, impact, characterization, and engineering [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2018, 47(12): 4581-4610.
- [ 11 ] HU T J, LI D Y, SHAN Q S, *et al.* Defect behaviors in perovskite light-emitting diodes [J]. *ACS Mater. Lett.*, 2021, 3(12): 1702-1728.
- [ 12 ] GUO M L, LU Y, Cai X Y, *et al.* Interface engineering improves the performance of green perovskite light-emitting diodes [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2022, 10(8): 2998-3005.
- [ 13 ] WANG H R, YUAN H, YU J H, *et al.* Boosting the efficiency of NiO<sub>x</sub>-based perovskite light-emitting diodes by interface engineering [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(47): 53528-53536.
- [ 14 ] GU L H, WEN K C, PENG Q M, *et al.* Surface-plasmon-enhanced perovskite light-emitting diodes [J]. *Small*, 2020, 16(30): 2001861.
- [ 15 ] ZHANG D Z, FU Y X, WU W P, *et al.* Comprehensive passivation for high-performance quasi-2D perovskite LEDs [J]. *Small*, 2023, 19(11): 2206927.
- [ 16 ] ZHANG J B, ZHANG T K, MA Z Z, *et al.* A multifunctional “halide-equivalent” anion enabling efficient CsPb(Br/I)<sub>3</sub> nanocrystals pure-red light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 23% [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(8): 2209002.
- [ 17 ] ZHENG J X, YUE G C, ZHOU Z A, *et al.* Phase transition induced thermal reversible luminescent of perovskite quantum dots fibers [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(32): 2300607.



师明明(1999-),男,山西临汾人,硕士研究生,2021年于南开大学获得学士学位,主要从事钙钛矿发光器件的制备和性质研究。

E-mail: mmshi@semi.ac.cn



张兴旺(1972-),男,安徽怀宁人,博士,研究员,博士生导师,1999年于兰州大学获得博士学位,主要从事宽带隙半导体材料、二维原子晶体材料与器件、半导体光电材料与器件的研究。

E-mail: xwzhang@semi.ac.cn