

文章编号: 1000-7032(2026)03-0486-11

# 真空热蒸发制备高效钙钛矿发光二极管: 材料策略与界面工程优化

周 妍<sup>1,2,3</sup>, 王艳艳<sup>1,2,3\*</sup>, 师梓涵<sup>1,2,3</sup>, 何 黎<sup>1,2,3</sup>,  
任振伟<sup>1,2,3</sup>, 罗成招<sup>1,2,3</sup>

(1. 苏州大学光电科学与工程学院 苏州纳米科学技术协同创新中心, 江苏 苏州 215006;

2. 苏州大学 江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;

3. 苏州大学 江苏省柔性光电子与微纳制造重点实验室, 江苏 苏州 215006)

**摘要:** 钙钛矿发光二极管(PeLED)因其光谱可调、可溶液加工带来的潜在低成本潜力,被视为下一代高清显示技术中极具前景的候选者,在学术界与产业界均备受关注。目前,溶液旋涂法是实验室制备钙钛矿的常用的方法之一,但该方法面临高沸点有毒溶剂、结晶不均匀、大面积成膜差等瓶颈。相比之下,真空热蒸发法有效克服了上述困难:该方法无需使用溶剂、环境友好;蒸发厚度与速率控制精度高;且与有机发光二极管(OLED)产线相兼容,有望推动 PeLED 向大尺寸显示产业化迈进。本文首先归纳了三种真空热蒸发法的常用工艺方式,随后介绍了近年来红、绿、蓝三色高效 PeLED 在材料策略、界面优化、性能提升等方面的研究进展,最后展望了真空热蒸发法在商业化进程中面临的挑战与未来发展方向。

**关键词:** 钙钛矿发光二极管; 真空热蒸发; 制备工艺; 材料策略; 界面工程

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250230

CSTR: 32170.14.CJL.20250230

## Fabrication of High-efficiency Perovskite Light-emitting Diodes via Vacuum Thermal Evaporation: Material Strategies and Interface Engineering Optimization

ZHOU Yan<sup>1,2,3</sup>, WANG Yanyan<sup>1,2,3\*</sup>, SHI Zihan<sup>1,2,3</sup>, HE Li<sup>1,2,3</sup>,  
REN Zhenwei<sup>1,2,3</sup>, LUO Chengzhao<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Optoelectronic Science and Engineering & Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;

2. Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Soochow University, Suzhou 215006, China;

3. Jiangsu Key Lab of Flexible Optoelectronics and Micro-Nano Manufacturing, Soochow University, Suzhou 215006, China)

\* Corresponding Author, E-mail: yywang@suda.edu.cn

**Abstract:** Metal halide perovskite light-emitting diodes (PeLEDs) are attracting intense academic and industrial interest for next-generation high-definition displays because of their readily tunable emission and the cost advantages offered by solution processability. Spin-coating is currently the most widely used route to deposit perovskite films, yet it suffers from high-boiling toxic solvents, uncontrolled crystallization and poor large-area uniformity. Vacuum thermal evaporation circumvents these limitations: it is solvent-free, environmentally benign, allows angstrom-level thickness and rate control, and is fully compatible with existing organic light-emitting diodes (OLED) fabrication lines, making it the most promising technique for scaling PeLED to large-area panels. Here we review the three principal vacuum thermal evaporation protocols—single evaporation, sequential evaporation and co-evaporation—used to deposit perovskite films. We then summarize recent strategies and progress in achieving high-performance red,

green, and blue PeLEDs through compositional engineering, interface optimization, and device architecture design. Finally, we outline the remaining challenges and future research directions that must be addressed to commercialize vacuum thermal evaporation based PeLED technology.

**Keywords:** perovskite light-emitting diodes (PeLEDs); vacuum thermal evaporation; fabrication process; material strategy; interface engineering

## 1 引言

钙钛矿材料凭借其突出优势,如高载流子迁移率<sup>[1-2]</sup>、高荧光量子产率<sup>[3-4]</sup>、可调谐的发光光谱<sup>[5-6]</sup>、简单的制备工艺<sup>[7-9]</sup>等,已成为光电材料领域的新一代研究焦点。尤其值得关注的是钙钛矿材料成本低廉,为其未来产业化应用奠定了良好的基础。依托上述优势,钙钛矿材料在光电探测器<sup>[10-12]</sup>、太阳能电池<sup>[13-16]</sup>、发光二极管<sup>[17-21]</sup>等多个新兴领域展现出独特潜力。自从2014年溶液法制备的有机金属卤化物钙钛矿发光二极管首次<sup>[22]</sup>问世以来,经过十余年的发展,目前钙钛矿发光二极管(PeLED)的外量子效率(EQE)已达29.1%<sup>[23]</sup>(红光)、32.1%<sup>[24]</sup>(绿光)和26.4%<sup>[25]</sup>(蓝光)。尽管目前主流仍为溶液法制备钙钛矿薄膜,但该方法涉及有毒溶剂<sup>[26]</sup>,在大规模生产中面临严峻的挑战,限制了其向大面积产业化的推进。

相比之下,真空热蒸发法无需使用有毒溶剂且不受材料溶解度的限制,是一种环境友好的制备方法,在多层器件<sup>[27-29]</sup>的构建和像素图案化<sup>[30-32]</sup>方面独具优势。此外,该方法所制备的薄膜表面致密且均匀,杂质含量低,在工业级大面积显示面板的制造中具备明显的竞争力<sup>[33-34]</sup>。同时,通过精确控制各种前驱体的蒸发速率<sup>[35]</sup>、蒸发温度<sup>[36]</sup>及膜层厚度<sup>[37]</sup>,能够提高薄膜质量,在大规模制备中展现出高重复性。因此,采用真空热蒸发法制备PeLED被认为是推动显示技术实现产业规模化的重要途径,华中科技大学唐江教授和罗家俊副教授团队在该领域取得了一系列突破性进展<sup>[38-39]</sup>。

然而,当前采用真空热蒸发法制备PeLED仍然面临两大技术瓶颈<sup>[40-43]</sup>。首先,光致发光量子产率(PLQY)受限。由于部分材料在高温下容易分解、或材料分子之间反应不完全,导致钙钛矿晶体结构受损,薄膜在生长过程中形成低质量的多晶结构,造成非辐射复合以及陷阱辅助复合,PLQY大幅下降。其次,载流子注入不平衡是限制器件性能提升的主要瓶颈之一。这一问题的根本原因在于晶

体生长环境的差异,真空热蒸发过程中产生的高焓值和高动能加速了晶粒成核与生长,导致形成的晶粒尺寸大小不一,薄膜缺陷密度高,进而造成表面粗糙,影响电荷注入平衡并导致漏电流增大,最终制约器件效率。尽管如此,真空热蒸发法在钙钛矿光伏电池的制备中已取得显著进展,其能量转换效率(PCE)已经超过20%<sup>[44-45]</sup>,表明该方法在制备高质量薄膜方面具有巨大潜力,也为真空热蒸发法制备PeLED提供了技术可行性支撑。

本文围绕真空热蒸发法制备钙钛矿薄膜展开,系统介绍了真空热蒸发的方法及近年来的研究进展,并提出钙钛矿薄膜PLQY及器件EQE增强面临的瓶颈问题与改进策略,最后展望了钙钛矿真空热蒸发工艺的前景和挑战。

## 2 真空热蒸发工艺分类与薄膜生长机理

真空热蒸发技术通过物理气相沉积实现钙钛矿薄膜制备,其核心挑战在于多组分协同输运与化学计量比精准调控。根据蒸发源配置与沉积策略,主流工艺可分为三类:单源蒸发法、顺序蒸发法与多源共蒸发法。这些方法在材料热稳定性、组分分布梯度及结晶动力学调控上差异显著,直接决定薄膜质量与缺陷密度。关于真空热蒸发工艺及薄膜生长机理的详细内容可参见补充文件。

## 3 真空热蒸发制备PeLED研究进展

本小节聚焦发光层钙钛矿薄膜PLQY提升与PeLED性能优化,系统综述真空热蒸发技术在三色器件中的研究进展。重点从材料组分设计、界面钝化策略、器件物理调控三个层面,剖析当前PLQY与EQE面临的瓶颈,并讨论其协同优化路径。

### 3.1 真空热蒸发绿光PeLED

绿光PeLED多采用金属卤化物型钙钛矿材料,如CsPbBr<sub>3</sub>。前期对蒸镀钙钛矿的研究主要集中于蒸发速率、厚度调控、后退火等薄膜关键蒸镀工艺方面,但这些改进后获得的钙钛矿薄膜仍存

在较差的光致发光, 激子易解离为自由载流子, 导致辐射复合效率下降, 制约薄膜发光性能<sup>[46-49]</sup>, 使得该领域研究发展缓慢。

Liao 等首次报道了基于真空热蒸发法制备的绿光 PeLED<sup>[50]</sup>, 重点探究不同 CsBr 与 PbBr<sub>2</sub> 量比的影响。2021 年, Tang 等通过双源蒸发法制备 90 cm<sup>2</sup> 的大面积钙钛矿薄膜, 发现过量的 CsBr 能将零维结构的 Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub> 加入到 CsPbBr<sub>3</sub> 薄膜中, 形成 Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub>/CsPbBr<sub>3</sub> 核壳结构, 如图 1(a)~(c) 所示。该结构使 CsPbBr<sub>3</sub> 的电子和空穴在空间上受到 Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub> 的限制, 这种空间限域策略可抑制钙钛矿中的非辐射复合, 在未引入外来有机添加剂的条件下, PLQY 仍可达到 40.8% 并成功制备外量子效率 EQE 为 8% 的全真空热蒸发 PeLED<sup>[51]</sup>。零维 Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub> 的引入确实能钝化一部分缺陷, 提

高器件效率。然而, Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub> 是非导电的大带隙相, 不利于钙钛矿载流子的传输。为此, 2025 年, Myoung 等针对三维 CsPbBr<sub>3</sub> 中引入零维 Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub> 存在导电性差的问题, 引入了可促进载流子注入的复合功能添加剂双[2-[(氧)二苯基膦]苯基]醚 (DPEPO)。其中, DPEPO 作为添加剂直接引入钙钛矿体系中, 并通过顺序蒸发法制备具有零维 Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub> 的导电型优异的钙钛矿薄膜, 如图 1(d) 所示。如图 1(e) 所示, DPEPO 所含膦氧基团与钙钛矿晶体内未配位铅离子发生键合, 起到钝化缺陷与限制晶粒生长的双重作用。此外, DPEPO 分子在晶界处减少了电荷并密度和  $\pi$ - $\pi$  堆积, 从而促进了电荷载流子的传输能力。该器件在 100 cd·m<sup>-2</sup> 下的估算  $T_{50}$  达 191 h, 为现有热蒸发 PeLED 中的最高值, 如图 1(f) 所示<sup>[52]</sup>。

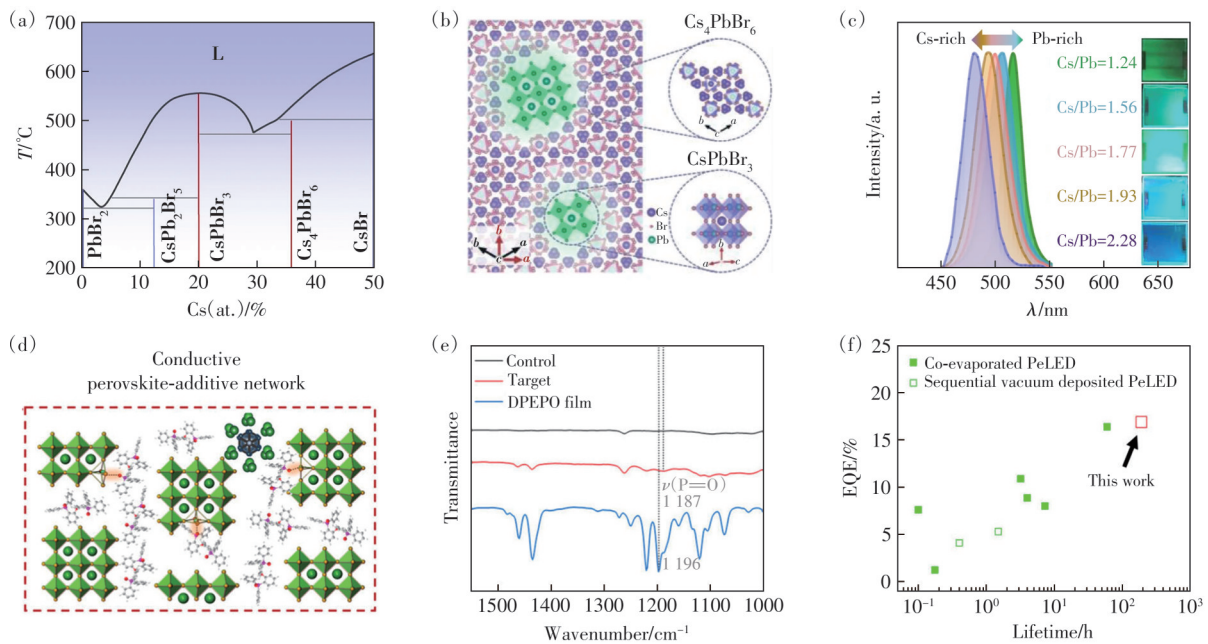


图 1 (a) CsBr-PbBr<sub>2</sub> 二元体系相图<sup>[51]</sup>; (b) CsPbBr<sub>3</sub> 嵌入 Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub> 矩阵示意图<sup>[51]</sup>; (c) 不同 Cs/Pb 比的 CsPbBr<sub>3</sub> 薄膜的 PL 光谱<sup>[51]</sup>; (d) 含 DPEPO 导电添加剂的钙钛矿薄膜示意图<sup>[52]</sup>; (e) 原始和添加 DPEPO 的钙钛矿薄膜红外光谱<sup>[52]</sup>; (f) 器件与现有热蒸发 PeLED 的  $T_{50}$  值对比<sup>[52]</sup>

Fig.1 (a) Phase diagram of CsBr-PbBr<sub>2</sub> binary system<sup>[51]</sup>. (b) Schematic of CsPbBr<sub>3</sub> embedded in the Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub> matrix<sup>[51]</sup>. (c) PL of CsPbBr<sub>3</sub> films with different Cs/Pb ratios<sup>[51]</sup>. (d) Schematic of perovskite films containing DPEPO conductive additive<sup>[52]</sup>. (e) FTIR spectra of pristine and DPEPO-added perovskites<sup>[52]</sup>. (f) Comparison of  $T_{50}$  lifetime between the fabricated device and existing thermally evaporated PeLED<sup>[52]</sup>

除了优化 Cs/Pb 比例引入 Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub> 相以钝化非辐射复合外, 还可以通过使用大体积的铵盐来获得准二维 (quasi-2D) 钙钛矿结构。quasi-2D 的钙钛矿结构可以看作是具有很大的激子结合能的多量子阱结构, 同时, 由于大体积的有机阳离子的疏水性, 使 quasi-2D 钙钛矿具有良好的稳定性<sup>[53-57]</sup>。

关于真空热蒸发制备绿光钙钛矿过程中准二维结构调控及钝化机理的介绍详情可参见补充文件。

由于真空热蒸发法制备的钙钛矿薄膜易产生未配位离子缺陷<sup>[51,58]</sup>, 特别是未结合的 Pb<sup>2+</sup> 会俘获电子-空穴对, 进而产生非辐射复合过程<sup>[59]</sup>。因

此,引入合适的钝化剂显得尤为重要,这不仅有助于优化钙钛矿的结晶过程,还能有效降低其表面的缺陷密度。2023年,Tang等通过引入三苯基氧化膦(TPPO)来钝化缺陷,该添加剂一方面与未配位的铅离子结合,降低反应活性,减缓结晶速率;另一方面,可作为表面配体来约束晶体生长,增强载流子复合。其中,TPPO通过多源共蒸发方式与钙钛矿前驱体同步蒸发,实现对钙钛矿的内部掺杂。最终,如图2(a)~(c)所示,采用三源共蒸法制备出EQE为16.4%的全真空热蒸发PeLED<sup>[38]</sup>。2021年,Shin等提出在钙钛矿层和空穴传输层之间插入一层单独的聚乙烯氧化物(PEO)钝化层,

来提高器件效率。鉴于PEO和PbBr<sub>2</sub>的Pb<sup>2+</sup>的强路易斯碱结合作用,可减少钙钛矿的非辐射缺陷,研究中还在PEO中加入MgCl<sub>2</sub>来提高导电性。其中,PEO作为独立的钝化层通过旋涂方式沉积在基底上,随后通过双源共蒸制备钙钛矿层,如图2(d)~(f)所示。除了对钙钛矿下界面进行钝化,还可以对钙钛矿上界面进行修饰<sup>[60]</sup>。Bi等在2020年使用顺序蒸发法多次连续沉积PbBr<sub>2</sub>和CsBr反应生成钙钛矿层,通过在钙钛矿层上旋涂一层超薄的苯乙胺溴化物(PEABr),成功钝化了薄膜中的非辐射复合缺陷,提升了辐射复合效率,并同步调控了空穴和电子传输,如图2(g)~(i)所示<sup>[61]</sup>。

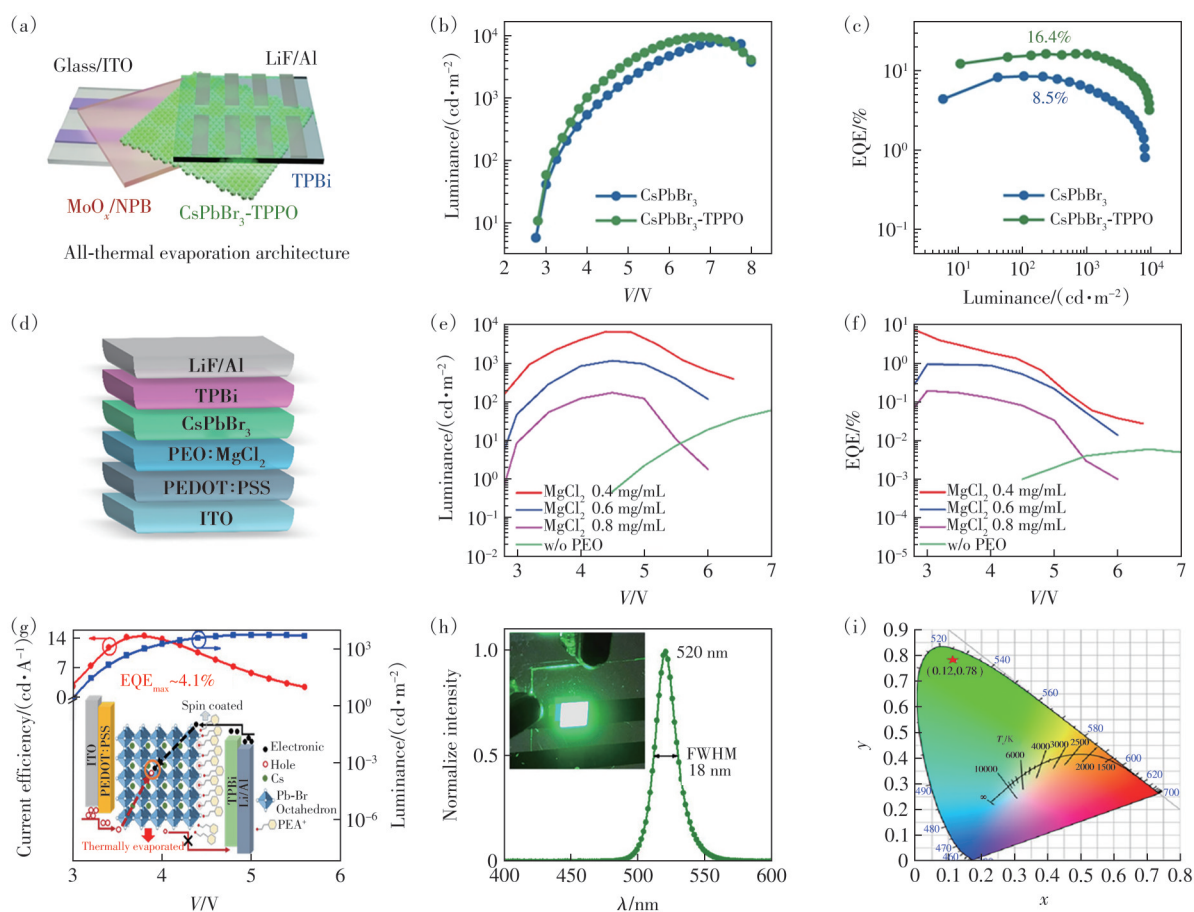


图2 (a)引入TPPO到CsPbBr<sub>3</sub>中的PeLED的器件结构<sup>[38]</sup>; (b)EQE-电压曲线<sup>[38]</sup>; (c)EQE-亮度曲线<sup>[38]</sup>; (d)引入钝化层PEO:MgCl<sub>2</sub>的PeLED的器件结构<sup>[60]</sup>; (e)亮度-电压曲线<sup>[60]</sup>; (f)EQE-电压曲线<sup>[60]</sup>; (g)引入钝化层PEABr的PeLED的器件结构<sup>[61]</sup>; (h)EL光谱<sup>[61]</sup>; (i)CIE色坐标<sup>[61]</sup>

Fig.2 (a) Device structure of PeLED with incorporation of TPPO<sup>[38]</sup>. (b) EQE-voltage curve<sup>[38]</sup>. (c) EQE-luminance curve<sup>[38]</sup>. (d) Device structure of PeLED with the passivation layer PEO:MgCl<sub>2</sub><sup>[60]</sup>. (e) Luminance-voltage curve<sup>[60]</sup>. (f) EQE-voltage curve<sup>[60]</sup>. (g) Device structure of PeLED with the passivation layer PEABr<sup>[61]</sup>. (h) EL spectrum<sup>[61]</sup>. (i) CIE color coordinates<sup>[61]</sup>

### 3.2 真空热蒸发红光PeLED

红光PeLED通常采用单卤素钙钛矿材料,如MAPbI<sub>3</sub>、FAPbI<sub>3</sub>,由于真空沉积的红光发光材料

光物理性能差,且PbI<sub>2</sub>的键离解能低于PbBr<sub>2</sub>,蒸发时PbI<sub>2</sub>更易分解成Pb和I<sub>2</sub>气体,使得碘基钙钛矿的卤素空位缺陷密度显著高于溴基钙钛矿,光

电性能也随之下降。因此,目前真空热蒸镀红光 PeLED 的效率远低于绿光器件,核心瓶颈仍在于结晶质量差、离子迁移严重及缺陷密度高。现有研究主要聚焦于降低红光钙钛矿层的缺陷密度,并通过优化界面层来改善器件性能。

在钙钛矿层的研究方面,2018年,Bolink 等采用双源共蒸制备 MAPbI<sub>3</sub> 钙钛矿薄膜,研究了过量 MAI 对真空沉积 MAPbI<sub>3</sub> 薄膜制备的影响。结果发现 MAI 和 PbI<sub>2</sub> 的量比为 1:1 时 MAPbI<sub>3</sub> 薄膜存在大量陷阱态,而过量的 MAI 使薄膜表面上形成大块状的非晶结构,将其归因于 quasi-2D 钙钛矿的形成,该结构能有效地钝化缺陷,减少陷阱态密度<sup>[62]</sup>。2022年,Bruno 等运用双源蒸发法制备出厚度梯度变化的钙钛矿薄膜,如图 3(a)所示。在不

同厚度 MAPbI<sub>3</sub> 薄膜载流子动力学差异对比中,发现厚度越大,载流子寿命越长;此外,用醋酸钾 (MAI+KAc) 溶液处理后的 MAPbI<sub>3</sub> 薄膜不会影响载流子寿命和陷阱密度,但能够略微提升载流子迁移率<sup>[63]</sup>。2025年,Tang 等选择氟修饰的氧化膦添加剂 1-二苯基磷酸基-2-氟苯氧化膦 (2-F-TPPO),采用三源共蒸发法制备 2-F-TPPO 掺杂的 CsPbBr<sub>2</sub> 钙钛矿薄膜,如图 3(b)所示。其中,2-F-TPPO 作为添加剂通过三源共蒸发与钙钛矿前驱体同步蒸发,实现对薄膜内部的直接掺杂。研究表明,2-F-TPPO 能增强 P=O, 双键与 Pb<sup>2+</sup> 的配位能力,调控钙钛矿结晶。添加 2-F-TPPO 后钙钛矿晶粒变得更小,并提高了表面覆盖率。掺杂 2-F-TPPO 的器件 EQE 达 12.6%<sup>[64]</sup>,远超此前报道。

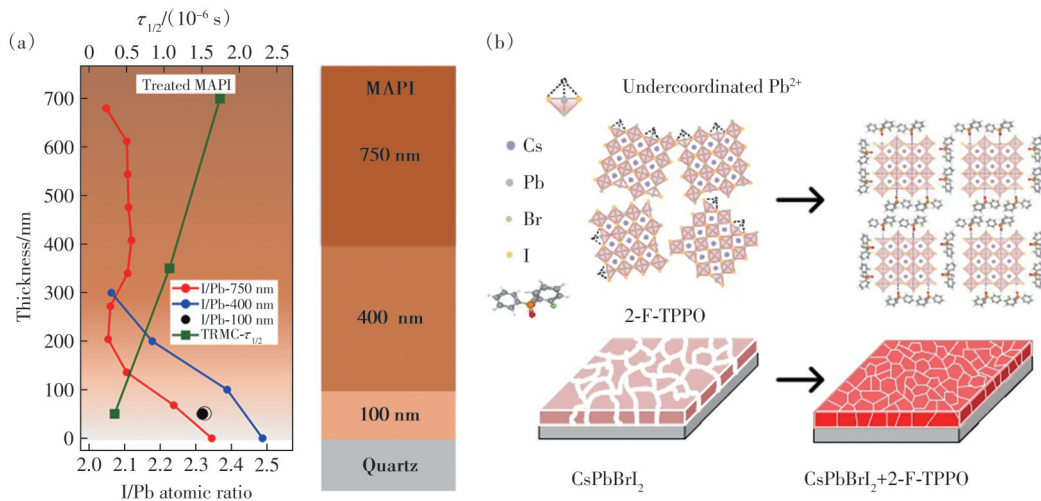


图 3 (a) MAPbI<sub>3</sub> 蒸发沉积过程中 I/Pb 原子比随厚度的纵向分布<sup>[63]</sup>; (b) 钙钛矿与 2-F-TPPO 相互作用机理示意图, 2-F-TPPO 作为缺陷钝化剂调控结晶过程<sup>[64]</sup>

Fig.3 (a) The longitudinal distribution of the I/Pb atomic ratio in the MAPbI<sub>3</sub> evaporation deposition process with thickness<sup>[63]</sup>. (b) Schematic diagram of the interaction mechanism between perovskite and 2-F-TPPO, where 2-F-TPPO acts as a defect passivator to regulate the crystallization process<sup>[64]</sup>

除了对钙钛矿发光层进行调控外,研究者们也关注钙钛矿界面层的设计与优化,以进一步提升器件性能,关于真空热蒸发制备红光钙钛矿界面层的研究及钝化机理的详细介绍可参见补充文件。

### 3.3 真空热蒸发蓝光 PeLED

关于真空热蒸发 CsPbBr<sub>3</sub> 的研究报道较多<sup>[46,51]</sup>,但针对 CsPbBr<sub>x</sub>Cl<sub>3-x</sub> 的蓝光 PeLED 研究较少。蓝光 PeLED 的主要问题包括材料选择较少、发光效率低、稳定性差、缺陷密度高。真空热蒸发 CsPbCl<sub>3</sub> 作为钙钛矿发光层存在缺陷密度高的问题,导致严重的非辐射复合和低的蓝光发光效率。

为获得理想的 CsPbCl<sub>3</sub> 钙钛矿薄膜,2019年,

Tang 等采用双源共蒸发法制备全无机蓝光钙钛矿,并设计了一种高通量的组合方法,能够快速找到最佳的 Cl/Br 比和 Cs/Pb 比。他们将 CsCl 和 PbBr<sub>2</sub> 同时沉积在非旋转衬底上,沿 CsCl-PbBr<sub>2</sub> 源方向形成 CsCl/PbBr<sub>2</sub> 比值梯度,如图 4(a)~(c)所示,衬底离 CsCl 源越近,衬底上沉积的 CsCl 越多,钙钛矿薄膜发出的 PL 越蓝越强<sup>[65]</sup>。如上文所述传统制备蓝光钙钛矿是通过双源共蒸 CsCl 和 PbBr<sub>2</sub>,但这种方法的缺点是只能调节 Cs/Pb 比,Br/Cl 比被迫同时变化,不匹配的 Br/Cl 比导致钙钛矿薄膜带隙过大从而产生非常高的缺陷密度。针对 CsPbBr<sub>x</sub>Cl<sub>3-x</sub> 蓝光钙钛矿缺陷密度较高的问题,

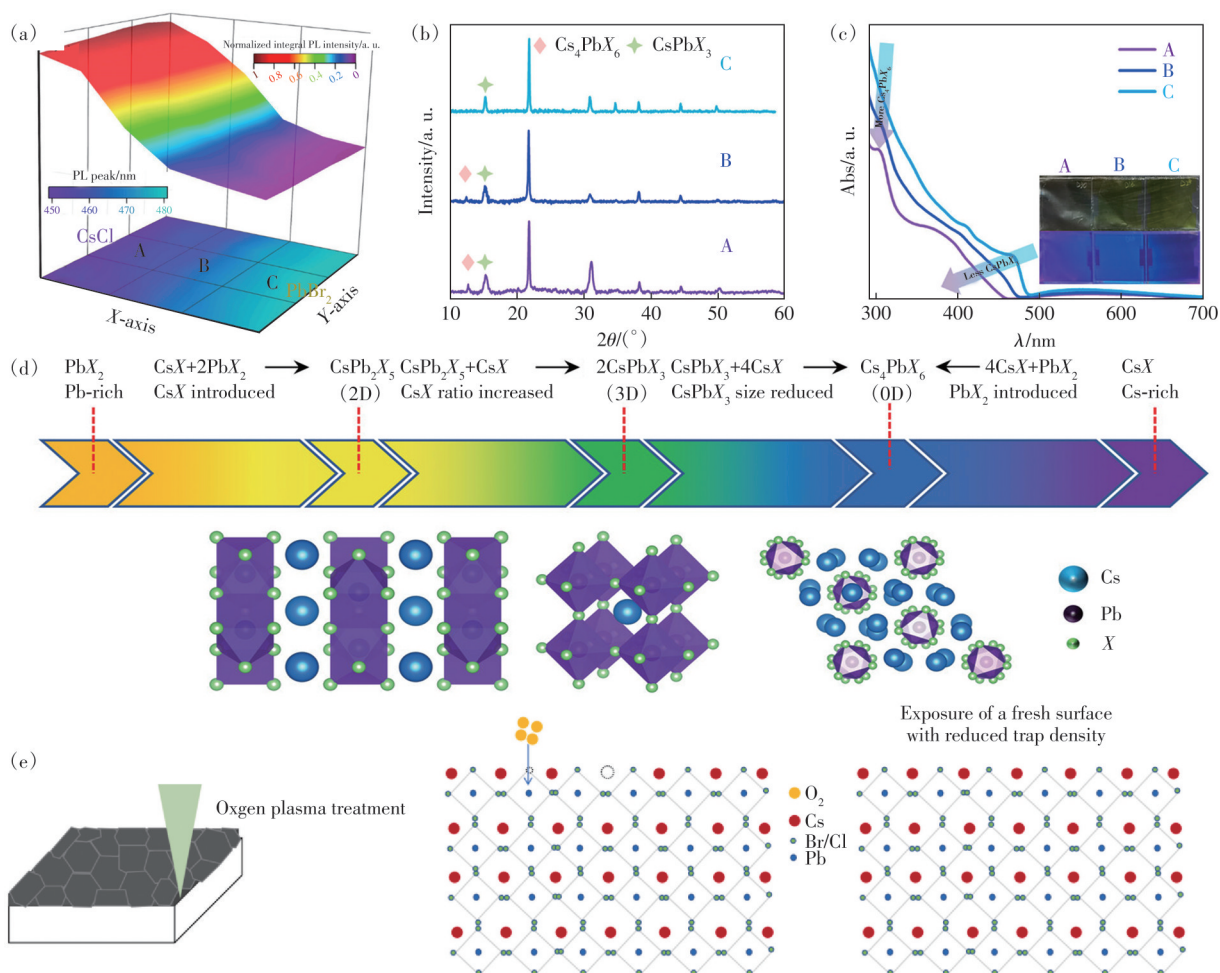


图4 (a)采用高通量组合方法双源共蒸制备钙钛矿的PL空间强度示意图<sup>[65]</sup>; (b)采用高通量组合方法双源共蒸制备钙钛矿的不同位置XRD图谱<sup>[65]</sup>; (c)采用高通量组合方法双源共蒸制备钙钛矿的不同位置吸收光谱<sup>[65]</sup>; (d)Cs/Pb比不同时对应的Cs-Pb-X的相位演化图<sup>[66]</sup>; (e)氧等离子体处理(OPT)CsPbCl<sub>2</sub>Br表面示意图,用于消除表面缺陷并暴露富铅表面<sup>[67]</sup>

Fig.4 (a) Schematic diagram of the spatial intensity of PL using the high-throughput combination method with dual-source co-evaporation<sup>[65]</sup>. (b) XRD patterns acquired at different positions using the high-throughput combination method with dual-source co-evaporation<sup>[65]</sup>. (c) Absorption spectra acquired at different positions using the high-throughput combination method with dual-source co-evaporation<sup>[65]</sup>. (d) Phase evolution diagrams of Cs-Pb-X corresponding to different Cs/Pb ratios<sup>[66]</sup>. (e) Scheme of oxygen plasma treatment (OPT) for CsPbCl<sub>2</sub>Br surface to remove surface defects and expose lead rich surface<sup>[67]</sup>

2024年, Wang等采用三源共蒸发法构建双相发射蓝光钙钛矿 \$\text{CsPbBr}\_x\text{Cl}\_{3-x}\$ 与 \$\text{Cs}\_4\text{PbBr}\_x\text{Cl}\_{6-x}\$。如图4(d)所示,引入CsBr作为第三个蒸发源即可自由调节Cs/Pb/Br/Cl比,将 \$\text{Cs}\_4\text{PbBr}\_x\text{Cl}\_{6-x}\$ 相引入到 \$\text{CsPbBr}\_x\text{Cl}\_{3-x}\$ 钙钛矿中间体中,适量 \$\text{Cs}\_4\text{PbBr}\_x\text{Cl}\_{6-x}\$ 相的钝化和量子约束效应使钙钛矿薄膜的非辐射复合被明显抑制,从而增强辐射复合,最终制备出488 nm的蓝光PeLED, EQE达4.6%<sup>[66]</sup>,比传统双源共蒸发制备的PeLED<sup>[65]</sup>的EQE高出10倍。2024年, Yin等开发了一种氧等离子体处理策略,如图4(e)所示。该策略是将氧气激发成活性氧原子,

与钙钛矿表面未配对的铅离子结合成强P=O键,从而做到表面缺陷钝化并阻止离子迁移,氧原子也进一步同钙钛矿表面结合,形成带保护功能的富氧层,加强其稳定性。通过该策略蒸发制备的 \$\text{CsPbBrCl}\_2\$ 的器件实现了在443 nm处高色纯度的深蓝光发射<sup>[67]</sup>。同年, Yin等针对蓝光钙钛矿的稳定性问题,首次采用 \$\text{PbBr}\_2\$、CsBr和溴化铷(RbBr)三源共蒸发法制备不同Cs/Rb比的蓝光钙钛矿薄膜,引入RbBr后 \$\text{Rb}^+\$ 对 \$\text{Cs}^+\$ 的部分取代导致钙钛矿的晶格收缩,解决了混合卤化物中的相分离问题,提升了离子迁移的活化能,有效提升了钙钛矿的

稳定性<sup>[68]</sup>。

为获得高性能蓝光钙钛矿,可借鉴 quasi-2D 钙钛矿相较于三维钙钛矿的优势:量子阱的存在使准二维钙钛矿中激子的结合能力很强,有利于载流子从低  $n$  相向大  $n$  相迁移,实现高效辐射复合并提升 PLQY。然而 quasi-2D 钙钛矿普遍含有多种低  $n$  相,由于相分布不均匀,能量更易在低  $n$  相处聚集,能量传递受阻而导致器件性能不佳<sup>[69-72]</sup>。2024年,Tang 等针对 quasi-2D 钙钛矿相分布不均的问题,采用 CsBr、PbCl<sub>2</sub> 和有机铵离子三源共蒸发法,通过引入大阳离子 PEABr 并对比了 4-氟苯乙基溴化铵 (p-F-PEABr),如图 5(a)~(b)所示,研究发现 PEA<sup>+</sup> 可抑制钙钛矿低  $n$  相形成,可改善

quasi-2D 钙钛矿相分布,加速能量转移;而 p-F-PEA<sup>+</sup> 则会导致钙钛矿膜中出现更多的低  $n$  相,导致 quasi-2D 薄膜中能量传递不足<sup>[73]</sup>。2025年,Wang 等通过苯乙基氯化铵 (PEACl) 和溴化胍 (GABr) 协同后处理的策略,形成二维/三维异质结改善蓝光 PeLED 性能。如图 5(c) 所示,他们首先采用 Pb-Br<sub>2</sub>、CsBr 和 CsCl 三源共蒸发法制备蓝光钙钛矿,并旋涂一层 PEACl 将 quasi-2D 相引入到三维钙钛矿中,PEACl 中的部分 Cl 转移到 CsPbBr<sub>x</sub>Cl<sub>3-x</sub> 钙钛矿中起到填补卤化物空位、降低卤素缺陷的作用。为进一步提高薄膜质量,随后采用单源蒸发法沉积一层 GABr,以填充经 PEACl 处理后薄膜中的空隙,从而有效改善薄膜的致密性与整体质量<sup>[2]</sup>。

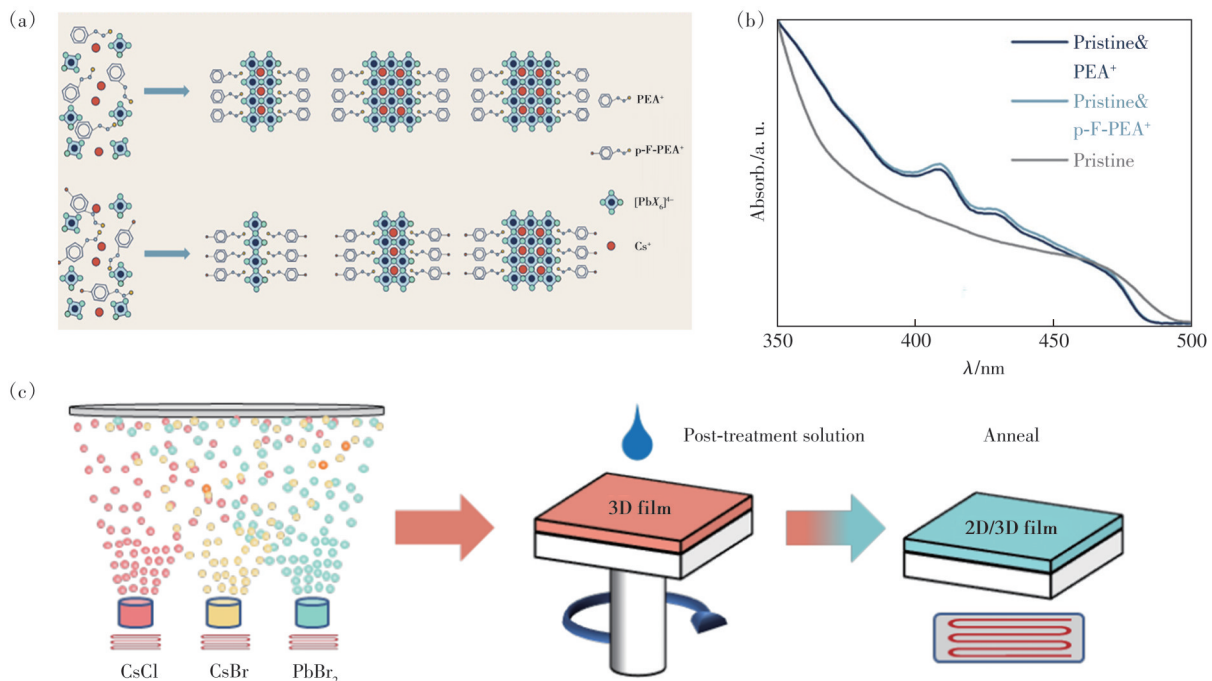


图 5 (a)PEA<sup>+</sup>/对位氟 PEA 掺杂 quasi-2D 薄膜的结晶过程对比<sup>[73]</sup>; (b)PEA<sup>+</sup>/对位氟 PEA 掺杂 quasi-2D 薄膜吸收光谱<sup>[73]</sup>; (c) 二维/三维异质结工艺流程示意图<sup>[2]</sup>

Fig.5 (a) Comparison of the crystallization process for PEA<sup>+</sup>/p-F-PEA<sup>+</sup> doped quasi-2D films<sup>[73]</sup>. (b) Absorption spectra of quasi-2D films doped with PEA<sup>+</sup>/p-F-PEA<sup>+</sup><sup>[73]</sup>. (c) Two-dimensional/three-dimensional heterojunction process flow diagram<sup>[2]</sup>

关于真空热蒸发制备蓝光钙钛矿过程中钝化策略及机理的详细介绍请参见补充文件。此外,表 S1 还总结了近年来真空热蒸发 PeLED 按发光颜色分类的研究进展,重点列出各钝化策略所采用的钝化剂及器件关键性能指标(最大亮度  $L_{\max}$ 、外量子效率 EQE 及  $T_{50}$  工作寿命)。

## 4 总 结

本文围绕真空热蒸发法制备 PeLED 的研究进展展开,系统梳理了提升器件性能的两个关键

方向:钙钛矿发光层的结晶质量优化与界面层的能级匹配调控。同时,全面总结了红、绿、蓝三色 PeLED 在真空热蒸发工艺中的研究现状。尽管该方法在器件性能提升方面已取得初步成果,但实现高效率、长寿命及商业化应用仍面临诸多挑战,未来研究可从以下四个方向深入探索:(1)提升器件发光效率:目前真空热蒸发法制备的红光与蓝光 PeLED 的发光效率仍显不足,亟需通过优化钙钛矿薄膜的结晶性、调控缺陷态密度及界面能级匹配,降低非辐射复合损失。此外,可通

过引入新型添加剂、界面钝化剂及功能层结构设计,增强载流子注入与复合效率,从而提升器件的外量子效率。(2)增强器件稳定性:稳定性是制约PeLED走向商业化的关键瓶颈。未来应着力开发高效封装技术与表面保护层构建策略,并引入环境稳定性更强的功能分子或材料体系,以提升器件在湿热、光照等复杂环境下的长期工作寿命与可靠性。(3)拓展绿色材料体系:铅毒性问题限制了PeLED的大规模应用,亟需开发适用于真空热蒸发工艺的无铅或低毒钙钛矿体系。可通过引入锡(Sn)、锗(Ge)、铋(Bi)等环保金属元素,并协同调控晶体生长与载流子输运行为,在降低

环境风险的同时保持优异的光电性能,推动可持续发展。(4)推进像素化与全彩显示应用:真空热蒸发法在高分辨率显示领域具有独特优势,但高精度图案化与多色集成技术尚未成熟。未来应结合OLED产业成熟的图形化工艺与掩模技术,优化蒸发沉积过程与器件结构设计,实现红、绿、蓝三色像素的高精度排列与集成,为全彩显示与柔性电子应用奠定技术基础。

本文补充文件和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.20250230>

### 参 考 文 献:

- [ 1 ] KIM D H, PARK J, LI Z, *et al.* 300% enhancement of carrier mobility in uniaxial-oriented perovskite films formed by topotactic-oriented attachment [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(23): 1606831.
- [ 2 ] SUN L, HE X P, HE Z Y, *et al.* Improved vacuum-evaporated blue perovskite light-emitting diodes with phenethylammonium chloride and guanidinium bromide synergistic post-processing modification [J]. *Front. Optoelectron.*, 2025, 18(1): 5.
- [ 3 ] POLI I, KIM G W, WONG E L, *et al.* High external photoluminescence quantum yield in tin halide perovskite thin films [J]. *ACS Energy Lett.*, 2021, 6(2): 609-611.
- [ 4 ] LONGO G, LA-PLACA M G, SESSOLO M, *et al.* High photoluminescence quantum yields in organic semiconductor-perovskite composite thin films [J]. *ChemSusChem*, 2017, 10(19): 3788-3793.
- [ 5 ] GILLESPIE S C, ALVAREZ A O, THIESBRUMMEL J, *et al.* Intensity-modulated photoluminescence spectroscopy for revealing ionic processes in halide perovskites [J]. *ACS Energy Lett.*, 2025, 10(7): 3122-3131.
- [ 6 ] VAN DER POL T P A, DATTA K, WIENK M M, *et al.* The intrinsic photoluminescence spectrum of perovskite films [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10(8): 2102557.
- [ 7 ] SIMBULA A, DEMONTIS V, QUOCHI F, *et al.* Recent advances in perovskite single-crystal thin film optoelectronic devices [J]. *ACS Omega*, 2024, 9(35): 36865-36873.
- [ 8 ] CHIN X Y, PERUMAL A, BRUNO A, *et al.* Self-assembled hierarchical nanostructured perovskites enable highly efficient LEDs *via* an energy cascade [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2018, 11(7): 1770-1778.
- [ 9 ] 李梦娇, 王晔, 王亚坤, 等. 高效钙钛矿量子点发光二极管: 挑战和优化 [J]. *发光学报*, 2025, 46(3): 452-461.  
LI M J, WANG Y, WANG Y K, *et al.* Efficient perovskite quantum dots light-emitting diodes: challenges and optimization [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(3): 452-461. (in Chinese)
- [ 10 ] TSAREV S, PRONIAKOVA D, LIU X Q, *et al.* Vertically stacked monolithic perovskite colour photodetectors [J]. *Nature*, 2025, 642(8068): 592-598.
- [ 11 ] ZHANG J R, MA C. Recent progress and future opportunities for optical manipulation in halide perovskite photodetectors [J]. *Nanomaterials*, 2025, 15(11): 816.
- [ 12 ] HU Y F, JI T, ZHANG H B, *et al.* Sensitive and ultrafast perovskite/organic hybrid photodetectors with a broad spectral response from ultraviolet to the telecommunication band [J]. *Small*, 2025, 21(27): 2502657.
- [ 13 ] ZHANG X L, HUANG J C, ZUO H Z, *et al.* Surface planarization enabled low-dimensional perovskite-leveling compound for carbon-based CsPbI<sub>2</sub>Br perovskite solar cells [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2025, 292: 113798.
- [ 14 ] LI W W, ZHENG D S, PAN H, *et al.* Enhance the performance of CsPbBr<sub>3</sub> perovskite solar cell through morphology modulation and defect passivation with RbCl additive [J]. *J. Alloys Compd.*, 2025, 1036: 181773.
- [ 15 ] GAO L, SHI J L, LIU F L, *et al.* Efficient and stable inorganic perovskite solar cells fabricated *via* the promotion of grain boundary regrowth [J]. *Renew Energy*, 2025, 255: 123834.

- [ 16 ] 李曼亚, 李禄东, 刘洲, 等. 柔性钙钛矿光伏: 研究进展、商业化进程和展望 [J]. 发光学报, 2023, 44(3): 466-485.  
LI M Y, LI L D, LIU Z, *et al.* Flexible perovskite photovoltaics: progress, commercialization and prospects [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(3): 466-485. (in Chinese).
- [ 17 ] LEE T W. Over a decade of progress in metal-halide perovskite light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(25): 2508542.
- [ 18 ] LOU Y, WANG H R, ZHOU Z C, *et al.* Stabilization of  $\gamma$ -CsPbI<sub>3</sub> nanoplatelets via tailored surface coordination for high-performance rec. 2020 pure-red LEDs [J]. *ACS Nano*, 2025, 19(25): 23151-23161.
- [ 19 ] PENG C C, YAO H T, ALI O, *et al.* Weakly space-confined all-inorganic perovskites for light-emitting diodes [J]. *Nature*, 2025, 643(8070): 96-103.
- [ 20 ] ZHOU X, REN Z W, ZHENG Z Y, *et al.* Efficient and stable blue perovskite light-emitting diodes enabled by effective hydrolysis of dichloride [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(2): 2412894.
- [ 21 ] ZHENG Z Y, REN Z W, ZHOU X, *et al.* Stable and efficient pure-red perovskite light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(4): e15053.
- [ 22 ] 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.
- [ 23 ] FENG S C, SHEN Y, HU X M, *et al.* Efficient and stable red perovskite light-emitting diodes *via* thermodynamic crystallization control [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(44): 2410255.
- [ 24 ] SUN S Q, TAI J W, HE W, *et al.* Enhancing light outcoupling efficiency *via* anisotropic low refractive index electron transporting materials for efficient perovskite light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(24): 2400421.
- [ 25 ] GAO Y, CAI Q T, HE Y F, *et al.* Highly efficient blue light-emitting diodes based on mixed-halide perovskites with reduced chlorine defects [J]. *Sci. Adv.*, 2024, 10(29): eado5645.
- [ 26 ] ABZIEHER T, MOORE D T, ROß M, *et al.* Vapor phase deposition of perovskite photovoltaics: short track to commercialization? [J]. *Energy Environ Sci.*, 2024, 17(5): 1645-1663.
- [ 27 ] LOHMANN K B, PATEL J B, ROTHMANN M U, *et al.* Control over crystal size in vapor deposited metal-halide perovskite films [J]. *ACS Energy Lett.*, 2020, 5(3): 710-717.
- [ 28 ] DE BASTIANI M, MIRABELLI A J, HOU Y, *et al.* Efficient bifacial monolithic perovskite/silicon tandem solar cells *via* bandgap engineering [J]. *Nat. Energy*, 2021, 6(2): 167-175.
- [ 29 ] WEN J, HU H, CHEN C, *et al.* Present status of and future opportunities for all-perovskite tandem photovoltaics [J]. *Nat. Energy*, 2025, 10(6): 681-696.
- [ 30 ] LIANG L M, MA T, CHEN Z Y, *et al.* Patterning technologies for metal halide perovskites: a review [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2023, 8(3): 2200419.
- [ 31 ] LEE G H, KIM K, KIM Y, *et al.* Recent advances in patterning strategies for full-color perovskite light-emitting diodes [J]. *Nano-Micro Lett.*, 2024, 16(1): 45.
- [ 32 ] 何航宇, 冯志鹏, 庄国亮, 等. 应用于色转换显示的红光钙钛矿发光材料研究现状 [J]. 发光学报, 2025, 46(2): 273-284.  
HE H Y, FENG Z P, ZHUANG G L, *et al.* Current status of red perovskite light emitting materials for color conversion displays [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(2): 273-284. (in Chinese).
- [ 33 ] ZHANG X, LIU N, DU H N, *et al.* Metal halide perovskite as down-conversion materials for advanced display [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(25): 2410194.
- [ 34 ] 许振桐, 林杰, HUANG JINGSONG, 等. 大面积钙钛矿太阳能电池薄膜制备工艺进展综述 [J]. 发光学报, 2025, 46(1): 98-109.  
XU Z T, LIN J, HUANG J S, *et al.* Review of advances in large-area perovskite solar cell thin-film fabrication techniques [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(1): 98-109. (in Chinese)
- [ 35 ] WANG Z T, LYU M, ZHANG B W, *et al.* Thermally evaporated metal halide perovskites and their analogues: film fabrication, applications and beyond [J]. *Small Methods*, 2025, 9(2): 2301633.
- [ 36 ] DU P P, WANG L, LI J H, *et al.* Thermal evaporation for halide perovskite optoelectronics: fundamentals, progress, and outlook [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10(4): 2101770.

- [37] BAE S R, HEO D Y, KIM S Y. Recent progress of perovskite devices fabricated using thermal evaporation method: perspective and outlook [J]. *Mater. Today Adv.*, 2022, 14: 100232.
- [38] LI J H, DU P P, GUO Q X, *et al.* Efficient all-thermally evaporated perovskite light-emitting diodes for active-matrix displays [J]. *Nat. Photonics*, 2023, 17(5): 435-441.
- [39] ZHU J X, LI J H, HUANG Y L, *et al.* All-thermally evaporated blue perovskite light-emitting diodes for active matrix displays [J]. *Small Methods*, 2024, 8(1): 2300712.
- [40] YAN F, DEMIR H V. Vacuum-evaporated lead halide perovskite LEDs [invited] [J]. *Opt. Mater. Express*, 2022, 12(1): 256.
- [41] 王丁可, 胡海龙, 郭太良, 等. 超高分辨LED显示 [J]. *发光学报*, 2023, 44(10): 1721-1732.  
WANG D K, HU H L, GUO T L, *et al.* Ultra-high resolution LED display [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(10): 1721-1732. (in Chinese)
- [42] LUO J J, LI J H, GRATER L, *et al.* Vapour-deposited perovskite light-emitting diodes [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2024, 9(4): 282-294.
- [43] KONG L M, ZHANG X Y, ZHANG C X, *et al.* Stability of perovskite light-emitting diodes: existing issues and mitigation strategies related to both material and device aspects [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(43): 2205217.
- [44] LI H, ZHOU J J, TAN L G, *et al.* Sequential vacuum-evaporated perovskite solar cells with more than 24% efficiency [J]. *Sci. Adv.*, 2022, 8(28): eabo7422.
- [45] KOSASIH F U, ERDENEBILEG E, MATHEWS N, *et al.* Thermal evaporation and hybrid deposition of perovskite solar cells and mini-modules [J]. *Joule*, 2022, 6(12): 2692-2734.
- [46] ZHOU C, MENG W Y, KONG L M, *et al.* Vacuum processed metal halide perovskite light-emitting diodes [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(8): 2307682.
- [47] SOSA ACOSTA A, ANGEL F A. Thermally evaporated CsPbBr<sub>3</sub> for green perovskite light-emitting diodes: challenges and perspectives [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2025, 7(4): 1361-1376.
- [48] LIU X K, XU W D, BAI S, *et al.* Metal halide perovskites for light-emitting diodes [J]. *Nat. Mater.*, 2021, 20(1): 10-21.
- [49] KULKARNI S A, YANTARA N, TAN K S, *et al.* Perovskite nanostructures: leveraging quantum effects to challenge optoelectronic limits [J]. *Mater. Today*, 2020, 33: 122-140.
- [50] HU Y, WANG Q, SHI Y L, *et al.* Vacuum-evaporated all-inorganic cesium lead bromine perovskites for high-performance light-emitting diodes [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2017, 5(32): 8144-8149.
- [51] DU P P, LI J H, WANG L, *et al.* Efficient and large-area all vacuum-deposited perovskite light-emitting diodes *via* spatial confinement [J]. *Nat. Commun.*, 2021, 12(1): 4751.
- [52] LEE M H, KIM J, HAN J, *et al.* Fabrication of conductive perovskite-additive networks *via* sequential vacuum deposition for perovskite light-emitting diodes [J]. *ACS Energy Lett.*, 2025, 10(6): 2898-2905.
- [53] DONG Q S, CHEN M, LIU Y H, *et al.* Flexible perovskite solar cells with simultaneously improved efficiency, operational stability, and mechanical reliability [J]. *Joule*, 2021, 5(6): 1587-1601.
- [54] MA D X, LIN K B, DONG Y T, *et al.* Distribution control enables efficient reduced-dimensional perovskite LEDs [J]. *Nature*, 2021, 599(7886): 594-598.
- [55] KIM B, SEOK S I. Molecular aspects of organic cations affecting the humidity stability of perovskites [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2020, 13(3): 805-820.
- [56] NA QUAN L, MA D X, ZHAO Y B, *et al.* Edge stabilization in reduced-dimensional perovskites [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1): 170.
- [57] LI Z C, CHEN Z M, YANG Y C, *et al.* Modulation of recombination zone position for quasi-two-dimensional blue perovskite light-emitting diodes with efficiency exceeding 5% [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 1027.
- [58] LI J H, YANG L B, GUO Q X, *et al.* All-vacuum fabrication of yellow perovskite light-emitting diodes [J]. *Sci. Bull.*, 2022, 67(2): 178-185.
- [59] FU Y, ZHANG Q P, ZHANG D Q, *et al.* Scalable all-evaporation fabrication of efficient light-emitting diodes with hybrid 2D-3D perovskite nanostructures [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(39): 2002913.
- [60] KIM N, SHIN M, JUN S, *et al.* Highly efficient vacuum-evaporated CsPbBr<sub>3</sub> perovskite light-emitting diodes with an

- electrical conductivity enhanced polymer-assisted passivation layer [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(31): 37323-37330.
- [ 61 ] JIA K F, SONG L, HU Y S, *et al.* Improved performance for thermally evaporated perovskite light-emitting devices *via* defect passivation and carrier regulation [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(13): 15928-15933.
- [ 62 ] DÄNEKAMP B, DROSEROS N, PALAZON F, *et al.* Efficient photo- and electroluminescence by trap states passivation in vacuum-deposited hybrid perovskite thin films [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(42): 36187-36193.
- [ 63 ] ZHAO J S, LI J, LIU X H, *et al.* Charge carrier dynamics in co-evaporated MAPbI<sub>3</sub> with a gradient in composition [J]. *ACS Appl. Energy Mater.*, 2022, 5(6): 7049-7055.
- [ 64 ] LIU N, LIU Z Z, HUANG Y L, *et al.* Fluorine-modified passivator for efficient vacuum-deposited pure-red perovskite light-emitting diodes [J]. *Light Sci. Appl.*, 2025, 14(1): 118.
- [ 65 ] DU P P, LI J H, WANG L, *et al.* Vacuum-deposited blue inorganic perovskite light-emitting diodes [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(50): 47083-47090.
- [ 66 ] HE Z Y, PENG C C, GUO R D, *et al.* High-efficiency and emission-tunable inorganic blue perovskite light-emitting diodes based on vacuum deposition [J]. *Small*, 2024, 20(2): 2305379.
- [ 67 ] BAI T X Y, WANG S W, YI L X. Oxygen plasma treatment to passivate surface defects for high stability CsPbCl<sub>2</sub>Br light emitting diodes [J]. *Opt. Mater.*, 2024, 157: 116354.
- [ 68 ] BAI T X Y, WANG S W, ZHANG W F, *et al.* Vacuum evaporation deposited Rb<sub>x</sub>Cs<sub>1-x</sub>PbBr<sub>3</sub> thin films for spectrally tunable and stable all-inorganic blue light-emitting diodes [J]. *Mater. Sci. Semicond Process.*, 2025, 186: 109085.
- [ 69 ] REN Z W, YU J H, QIN Z T, *et al.* High-performance blue perovskite light-emitting diodes enabled by efficient energy transfer between coupled quasi-2D perovskite layers [J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(1): 2005570.
- [ 70 ] REN Z W, SUN J Y, YU J H, *et al.* High-performance blue quasi-2D perovskite light-emitting diodes *via* balanced carrier confinement and transfer [J]. *Nano-Micro Lett.*, 2022, 14(1): 66.
- [ 71 ] PANG P Y, JIN G R, LIANG C, *et al.* Rearranging low-dimensional phase distribution of quasi-2D perovskites for efficient sky-blue perovskite light-emitting diodes [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(9): 11420-11430.
- [ 72 ] 董威, 李静, 尹文旭, 等. 准二维钙钛矿生长控制: 结构依赖的激子与电荷行为 [J]. *发光学报*, 2024, 45(11): 1767-1781.
- DONG W, LI J, YIN W X, *et al.* Growth control of quasi-two-dimensional perovskites: structure-dependent exciton and charge behavior [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(11): 1767-1781. (in Chinese)
- [ 73 ] HUANG Y L, ZHU J X, LI J H, *et al.* Thermally evaporated blue quasi-two-dimensional perovskite light-emitting diodes *via* low-dimensional phase distribution arrangement [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, 16(12): 15004-15010.



周妍(2000-),女,江苏苏州人,硕士研究生,2023年于泰州学院获得学士学位,主要从事热蒸镀钙钛矿及发光器件的研究。

E-mail: 20235239019@stu.suda.edu.cn



王艳艳(1981-),女,天津人,博士,副教授,2011年于上海交通大学获得博士学位,主要从事新型显示材料(如量子点、钙钛矿)与相关器件、稳定高效光电转换器件构筑、微/纳结构大面积构建以及器件大规模集成工艺的研究。

E-mail: yywang@suda.edu.cn