

甲氧基苯乙胺调控准二维钙钛矿及其发光二极管性能研究

陈龙霓

天津理工大学理学院, 天津市量子光学与智能光子学重点实验室, 天津

收稿日期: 2026年4月6日; 录用日期: 2026年5月6日; 发布日期: 2026年5月15日

摘要

蓝光准二维钙钛矿发光二极管(PeLED)因具有优异的色纯度和可调发射特性而受到广泛关注, 但其性能仍容易受相分布不均、能量传递受限及非辐射复合增强等因素的制约。甲氧基苯乙胺相较于苯乙胺具有不同的分子偶极特征, 其引入能够影响准二维钙钛矿的结晶组装过程, 调节不同 n 值相的形成比例与分布状态, 并促进相间能量传递和激子辐射复合。本文围绕甲氧基苯乙胺在蓝光准二维钙钛矿中的作用展开讨论, 分析其对薄膜发光质量及器件性能的影响。该策略为优化蓝光PeLED发光层结构和提升器件性能提供了新的思路。

关键词

准二维钙钛矿, 蓝光发光二极管, 甲氧基苯乙胺, 相分布调控

Research on the Regulation of Quasi-2D Perovskites and Their Light-Emitting Diode Performance by Methoxyphenethylamine

Longni Chen

Tianjin Key Laboratory of Quantum Optics and Intelligent Photonics, School of Science, Tianjin University of Technology, Tianjin

Received: April 6, 2026; accepted: May 6, 2026; published: May 15, 2026

Abstract

Blue quasi-two-dimensional perovskite light-emitting diodes (PeLEDs) have attracted widespread

attention due to their excellent color purity and tunable emission properties; however, their performance remains limited by factors such as uneven phase distribution, restricted energy transfer, and enhanced non-radiative recombination. Compared to phenethylamine, methoxyphenethylamine possesses distinct molecular dipole characteristics. Its introduction can influence the crystallization and assembly process of quasi-two-dimensional perovskites, modulate the formation ratio and distribution of phases with different n -values, and promote inter-phase energy transfer and radiative exciton recombination. This paper discusses the role of methoxyphenethylamine in blue-light quasi-two-dimensional perovskites and analyzes its impact on the luminescence quality of thin films and device performance. This strategy provides a new approach for optimizing the structure of blue-light PeLED emitting layers and enhancing device performance.

Keywords

Quasi-2D Perovskites, Blue Light-Emitting Diodes, Methoxyphenethylamine, Phase Distribution Regulation

Copyright © 2026 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

金属卤化物钙钛矿因具有高色纯度、窄发射半峰宽、发射波长可调以及溶液加工工艺简单等优点，在新型显示与照明领域展现出良好的应用前景[1]。近年来，钙钛矿发光二极管(PeLED)在绿光和红光方向已取得较快发展，但蓝光器件的性能提升仍相对缓慢[2][3]。蓝光发射对应更宽的带隙，对发光层的相结构、激子复合行为以及薄膜质量提出了更高要求，器件中常见的相分布不均、能量传递受阻和非辐射复合增强等问题，都会显著限制蓝光 PeLED 的发光效率与稳定性[4]。因此，如何通过材料组成与结构调控实现高效、稳定的蓝光发射，已成为钙钛矿发光领域的重要研究内容。与三维钙钛矿相比，准二维钙钛矿由于引入了大体积有机铵盐作为间隔组分，形成了由不同 n 值相共同组成的层状结构。该类体系兼具较高的激子束缚能和较好的成膜特性，更适合用于蓝光发光器件。然而，若低维相比比例过高或相分布过于分散，激发能量难以有效地向有利发光的相传递，容易导致激子在缺陷位点或无效相中损耗，进而降低辐射复合效率[5]。由此可见，围绕有机间隔阳离子的分子设计与调控，是优化蓝光准二维钙钛矿性能的重要途径。

苯乙胺类有机阳离子因结构简单、易于修饰、与无机骨架匹配性较好，已被广泛用于准二维钙钛矿体系中[6]。相较于苯乙胺，甲氧基苯乙胺(MeOPEA)分子中引入了甲氧基取代基，这一结构变化不仅改变了分子的电子分布和偶极特征，也会进一步影响其在钙钛矿结晶过程中的作用方式。甲氧基苯乙胺的引入有望调节准二维钙钛矿中不同 n 值相的形成比例及分布状态，并改善相间能量传递过程。同时，甲氧基取代还可能改变薄膜的微观形貌与局部化学环境，减弱缺陷诱导的非辐射复合，为提升蓝光发光性能提供新的分子调控手段。

基于此，本文围绕甲氧基苯乙胺在蓝光准二维钙钛矿中的作用展开分析，重点讨论其相较于苯乙胺在分子偶极特征上的差异，以及这种差异对准二维钙钛矿结晶行为、相分布、能量传递和辐射复合的影响，进一步阐明其在蓝光钙钛矿发光二极管性能优化中的作用机制。该研究对于理解有机间隔阳离子在准二维钙钛矿中的调控作用，并为高性能蓝光 PeLED 发光层设计提供参考，具有一定的理论意义和应用价值。

2. 实验部分

2.1. 准二维钙钛矿的合成

蓝光准二维钙钛矿前驱液的制备过程如下：分别称取 0.16 mmol PEABr、0.2 mmol CsBr、0.1 mmol PbBr₂ 和 0.1 mmol PbCl₂，加入 1 mL DMSO 中，于 60℃ 条件下持续搅拌过夜，直至形成澄清均匀的前驱液。随后采用 0.22 μm 滤膜对前驱液进行过滤，得到用于后续成膜的蓝光准二维钙钛矿前驱液。为研究甲氧基苯乙胺对准二维钙钛矿的调控作用，分别向 1 mL 前驱液中加入 0、10、20、30 mg 的 MeOPEABr，对应浓度为 0、10、20、30 mg·mL⁻¹，并在 60℃ 条件下继续搅拌，直至溶液均匀透明。经进一步过滤后，获得不同 MeOPEABr 添加量调控的蓝光准二维钙钛矿前驱液。

2.2. 钙钛矿发光二极管器件制备

钙钛矿发光二极管器件以 ITO 导电玻璃为基底。ITO 基板依次经洗涤剂、去离子水、丙酮和乙醇超声清洗各 20 min，随后于 100℃ 烘干 15 min，并经紫外 - 臭氧处理 20 min。使用 0.45 μm 滤膜过滤后的 PEDOT:PSS 溶液以 4000 rpm 旋涂 30 s，并在空气中于 150℃ 退火 20 min，形成空穴注入层。之后将基底转移至氮气手套箱中，将钙钛矿前驱液旋涂于 PEDOT:PSS 层表面：先以 1000 rpm 旋涂 5 s，再以 4000 rpm 旋涂 90 s，并在旋涂第 33 s 滴加 300 μL 乙酸乙酯作为反溶剂，随后于 70℃ 退火 10 min，得到钙钛矿发光层。其余功能层及金属电极均通过热蒸发沉积，在 3 × 10⁻⁵ Pa 真空条件下依次蒸镀 30 nm TPBi、1 nm LiF 和 100 nm Al。器件有效发光面积为 0.1 cm²。

3. 结果与讨论

3.1. DFT 计算分析

为从分子层面理解 MeOPEA 对蓝光准二维钙钛矿发光层的调控作用，首先对 PEA 和 MeOPEA 的前沿分子轨道(FMO)分布、静电势(ESP)分布以及其与钙钛矿表面的相互作用进行了理论计算。如图 1(a)所示，FMO 计算结果表明 MeOPEA 的前线分子轨道均主要分布在芳香环及其相连的有机骨架上。甲氧基具有给电子特性，使 MeOPEA 分子表现出更强的电子不均匀分布特征，从而改变了分子的局域电荷环境。图 1(b)中 ESP 分布结果表现出 PEA 分子的表面静电势分布相对均匀，而 MeOPEA 由于甲氧基氧原子的存在，在分子局部形成了更明显的电荷富集区域，使其整体静电势分布更加不对称。甲氧基的引入增强了分子表面的极性差异，使 MeOPEA 在与钙钛矿表面接触时能够提供更强的局域静电作用。对于蓝光准二维钙钛矿体系，这种更强的分子极性有利于调节有机阳离子在界面处的排列方式，并可能增强其与表面未配位 Pb²⁺的相互作用，从而改变钙钛矿结晶过程中的成核和生长动力学[7]。

为了进一步评估两种有机间隔阳离子与钙钛矿表面的结合能力，分别计算了 PEA 和 MeOPEA 在钙钛矿表面模型上的吸附能。为了简化计算过程，将准二维钙钛矿替换为 CsPbBr₃ (001)钙钛矿表面模型，该模型保留了钙钛矿的关键特性。图 1(c)中的结果表明，MeOPEA 的吸附能为 -2.96 eV，明显高于 PEA 的 -1.40 eV，说明引入甲氧基后分子与钙钛矿表面的相互作用显著增强。为进一步区分不同官能团的作用位点，构建了 MeOPEA 中的铵基端与 Pb 位点接触的吸附构型，其吸附能为 -1.74 eV，远低于甲氧基端与 Pb 位点相互作用对应的 -2.96 eV。该结果表明，MeOPEA 与钙钛矿表面增强的界面作用主要来源于甲氧基中的 O 原子与未配位的 Pb²⁺的相互作用。该结果不仅表明甲氧基主导的较强界面吸附有助于提高有机间隔阳离子对钙钛矿表面结构的调节能力，从而在前驱体向晶体薄膜转化过程中更有效地影响相形成；还为甲氧基参与钙钛矿表面未配位的 Pb²⁺缺陷调控提供了可能，这有利于降低由局部结构无序引起的能量损耗[8]。

综合 FMO、ESP 和吸附能计算结果可以看出, MeOPEA 相对于 PEA 在分子尺度上表现出更强的极性特征和界面调控能力。这意味着在准二维钙钛矿发光层形成过程中, MeOPEA 更容易与无机骨架建立较强的界面相互作用, 从而影响不同 n 值相的形成与分布。

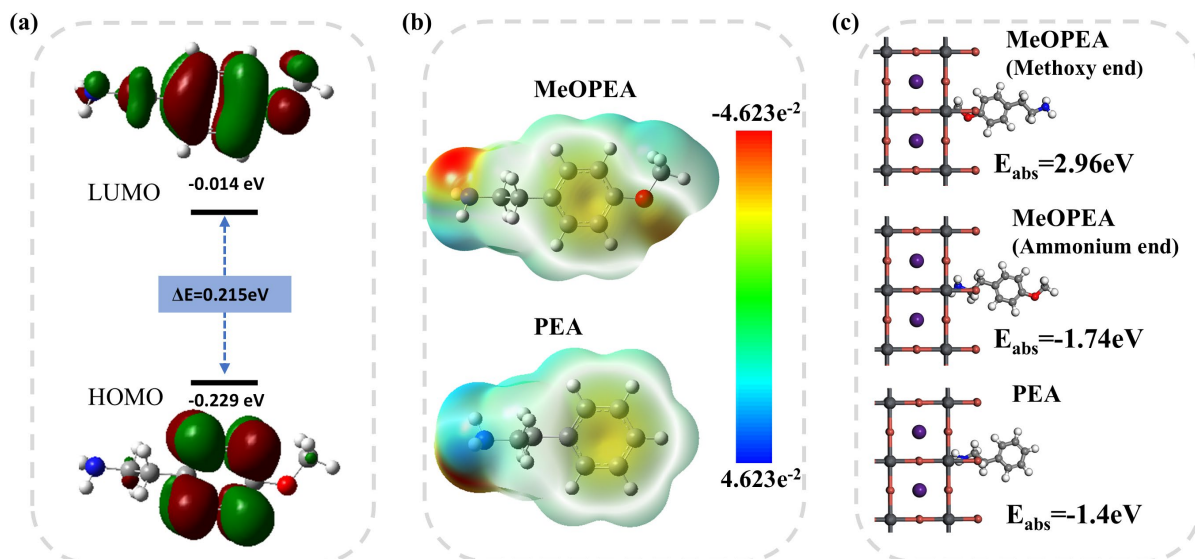


Figure 1. (a) FMO distribution of MeOPEA; (b) ESP distribution and (c) Structural models used for the calculation of adsorption energy of MeOPEA and PEA

图 1. (a) MeOPEA 的前沿分子轨道分布; (b) MeOPEA 和 PEA 的静电势分布图以及(c) 吸附能计算的结构模型

3.2. 薄膜的光物理特性与形貌表征

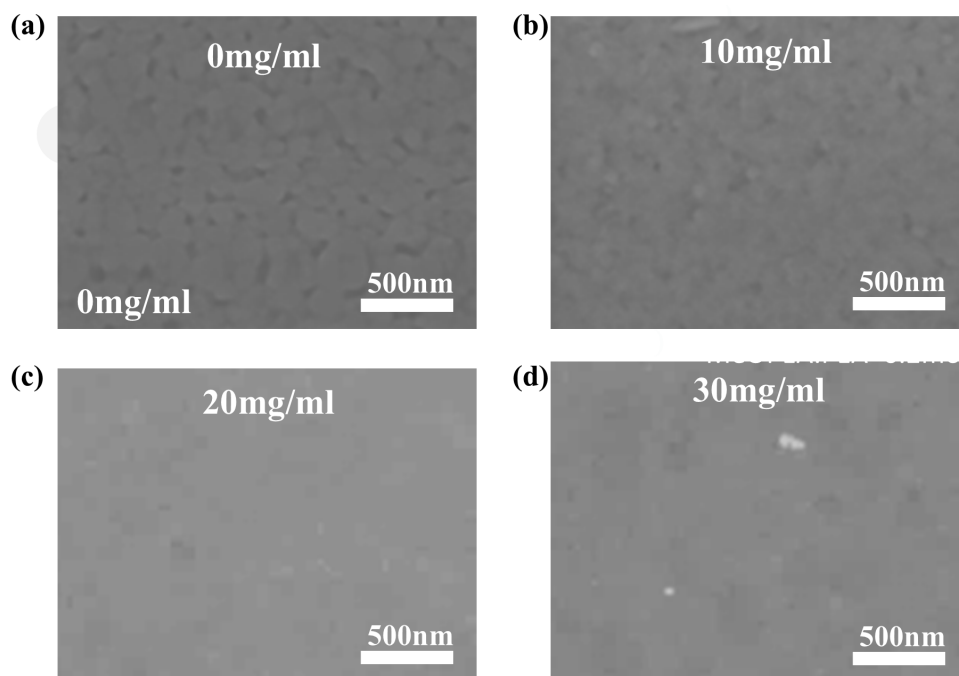


Figure 2. SEM images of perovskite thin films with varying amounts of MeOPEA

图 2. 加入不同量的 MeOPEA 后钙钛矿薄膜的 SEM 平面图

在明确了 MeOPEA 的分子调控特征后,进一步对准二维钙钛矿薄膜的形貌、晶体结构及光物理性质进行了系统表征,以揭示其对薄膜质量和发光行为的影响。考虑到 MeOPEA 的添加量可能直接决定其对结晶行为的调控程度,选取了 0、10、20 和 30 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 四组条件进行比较分析。如图 2 所示,扫描电子显微镜(SEM)结果显示未添加 MeOPEA 的钙钛矿薄膜表面存在一定程度的颗粒堆积和局部孔隙现象,薄膜连续性相对较差。加入 MeOPEA 后,薄膜表面形貌发生了明显变化。随着 MeOPEA 浓度由 10 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 增加至 20 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$,薄膜逐渐表现出更致密、更均匀的表面覆盖,颗粒尺寸分布趋于一致,局部空隙和表面粗糙区域明显减少,说明适量 MeOPEA 有助于改善成膜过程并提高薄膜均匀性。当添加量进一步增至 30 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,局部区域开始出现新的不均匀堆积和孔洞的现象,表明过量 MeOPEA 可能对结晶过程产生过强的扰动,不利于维持最优的薄膜微观形貌。

为研究 MeOPEA 对准二维钙钛矿结晶行为及相分布的影响,对本征的钙钛矿薄膜与 MeOPEA 处理后的薄膜进行了 XRD 表征。如图 3(a)所示,未处理钙钛矿薄膜在低角度区域约 3.9° 和 5.2° 处分别出现明显的衍射峰,对应 $n=1$ 和 $n=2$ 的低维准二维钙钛矿相,表明本征钙钛矿中存在较多低 n 相组分。相比之下,引入 MeOPEA 后,与 $n=1$ 和 $n=2$ 相相关的衍射峰显著减弱,说明低维相的形成受到抑制。与此同时,位于约 15.4° 和 30.7° 处对应于 3D 钙钛矿结构(100)和(200)晶面的衍射峰强度明显增强,表明薄膜中高 n 相的比例增加。对于蓝光准二维钙钛矿而言,这种相结构演化具有重要意义。若体系中 $n=1$ 和 $n=2$ 等低维相比例过高,激发态容易局限于较浅层量子阱中,导致能量难以有效传递至最终发光相,同时也更容易引起多峰发射和光谱不稳定[9]。相比之下,适当提高较大 n 值相的比例,有利于构建更连续的能量传递通道,使激子能够更高效地向目标发光相迁移并发生辐射复合[10]。图 3(b)中 X 射线光电子能谱(XPS)表征从界面化学环境角度证明了 MeOPEA 与钙钛矿之间存在明显相互作用。引入 MeOPEA 后,Pb 相关峰的结合能整体向低结合能方向偏移,说明 Pb 周围的电子环境发生了改变。这一变化表明 MeOPEA 的加入重新分配了钙钛矿表面的局域电子密度,有效钝化了钙钛矿中未配位的 Pb^{2+} 缺陷,使有机组分与无机骨架之间形成更强的相互作用[11]。证明了 MeOPEA 能够有效地作用于钙钛矿表面,进而影响其结晶和表面化学状态。这种界面相互作用不仅有助于调节相分布,也有望减少表面局部无序带来的非辐射复合损失。

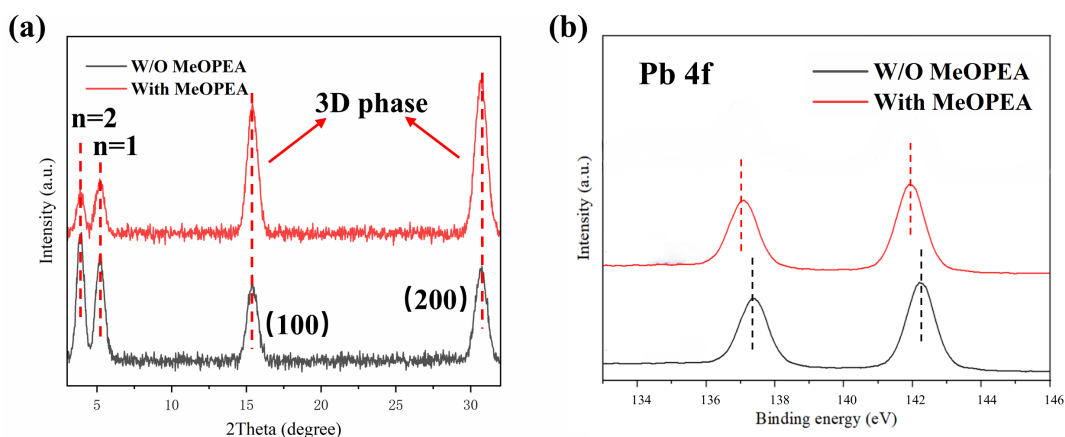


Figure 3. (a) XRD patterns and (b) XPS spectra of perovskite thin films with and without MeOPEA

图 3. 添加与未添加 MeOPEA 的钙钛矿薄膜的(a) XRD 图、(b) XPS 图

吸收光谱和稳态荧光光谱(PL)反映了 MeOPEA 对薄膜光学响应的影响。未添加 MeOPEA 的薄膜通常表现出多相共存特征,部分低维相相关的吸收和发光信号较为明显。如图 4(a)所示,加入 MeOPEA 后,

位于约 310 和 450 nm 处的激子峰对应于 $n = 1$ 和 $n = 2$ 的小 n 相被明显抑制，薄膜的吸收边和发光峰逐步表现出更加集中的特征，说明其内部相组成趋于优化，目标发光相所占比例提高。图 4(b)展示了在适中添加量的 MeOPEA 下，钙钛矿薄膜的 PL 强度明显增强，表明辐射复合效率得到了有效提升。这一结果与 XRD 所揭示的大 n 相被增强相一致，说明 MeOPEA 的作用最终转化为对发光层激子复合行为的改善。图 4(c)中 TRPL 结果进一步说明了 MeOPEA 对激发态动力学的影响。引入 MeOPEA 后，薄膜的衰减行为发生了变化，说明其内部载流子或激子的迁移与复合路径被重新调节。其衰减曲线可通过如下所示的双指数函数进行拟合[12]:

$$Y(t) = A_1 \exp(-t/\tau_1) + A_2 \exp(-t/\tau_2) \quad (1)$$

其中， A_1 和 A_2 分别表示两个不同寿命组分的相对振幅。短寿命(τ_1)归因于表面和晶粒边界陷阱产生的光生激子的非辐射复合，而长寿命(τ_2)则归因于激子的辐射复合过程。平均寿命(τ_{avg})可通过以下公式计算得出[13]:

$$\tau_{avg} = \frac{A_1 \tau_1^2 + A_2 \tau_2^2}{A_1 \tau_1 + A_2 \tau_2} \quad (2)$$

计算得到添加了 MeOPEA 的平均寿命达到 12.65 ns，高于本征钙钛矿的 4.52 ns。平均寿命的延长和 PL 强度增强的结果可以推断，适量 MeOPEA 的加入促进了激子向有效发光相的传递，并有效钝化了钙钛矿中未配位的 Pb^{2+} 缺陷，降低了陷阱辅助的非辐射复合过程。

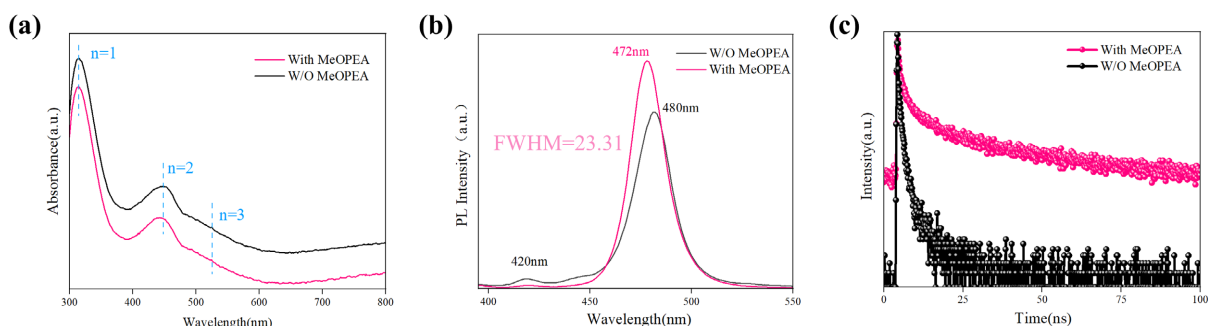


Figure 4. (a) Absorption spectra, (b) PL spectra and (c) TRPL spectra of perovskite thin films with and without MeOPEA
图 4. 添加与未添加 MeOPEA 的钙钛矿薄膜的(a) 吸收光谱、(b) PL 光谱、(c) TRPL 光谱

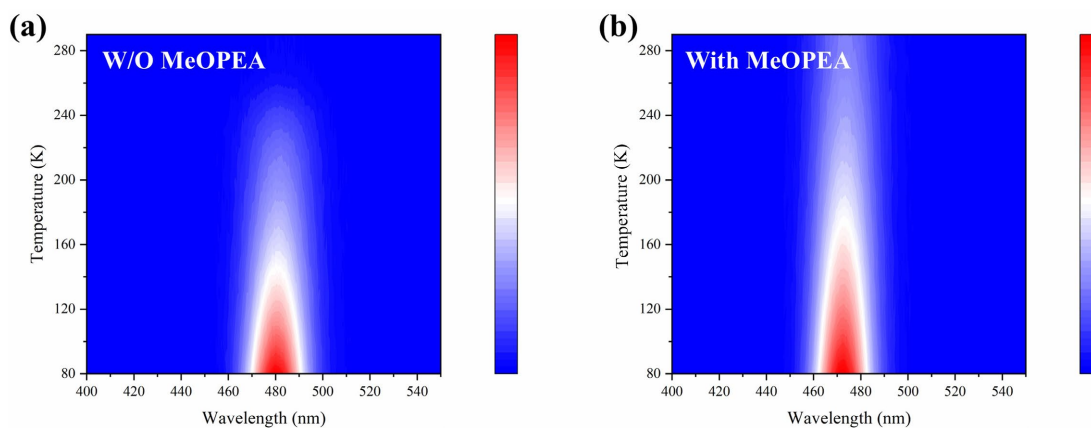


Figure 5. Temperature dependent PL spectra of perovskite thin films with (a) and (b) without MeOPEA
图 5. (a) 添加与(b) 未添加 MeOPEA 的钙钛矿薄膜的温度依赖 PL 光谱

为进一步考察 MeOPEA 对准二维钙钛矿薄膜缺陷态及热激活复合过程的影响,对本征薄膜和添加了 MeOPEA 的薄膜进行了温度依赖 PL 光谱测试。如图 5 所示,随着温度由 80 K 升高至 290 K,两组样品的发光强度均逐渐减弱,说明升温会加剧发光猝灭过程。这主要是因为温度升高后晶格振动增强,激子更容易发生热解离,同时缺陷相关的非辐射复合通道也会被进一步激活,从而削弱辐射复合并导致 PL 强度下降[14]。相比之下,添加了 MeOPEA 的薄膜在整个升温过程中始终保持更强的发光信号,尤其在高温区仍保留较明显的 PL 强度,而本征钙钛矿薄膜在约 250 K 开始表现出显著的发光衰减。这一结果表明,MeOPEA 的引入能够有效抑制热激活非辐射损失,提高准二维钙钛矿薄膜在较高温度的发光稳定性。这得益于 MeOPEA 中的甲氧基位点能够与钙钛矿表面未配位的 Pb^{2+} 发生相互作用,降低表面或晶界处缺陷态密度,从而减少陷阱辅助非辐射复合对激子衰减过程的影响[15]。

3.3. 器件性能分析

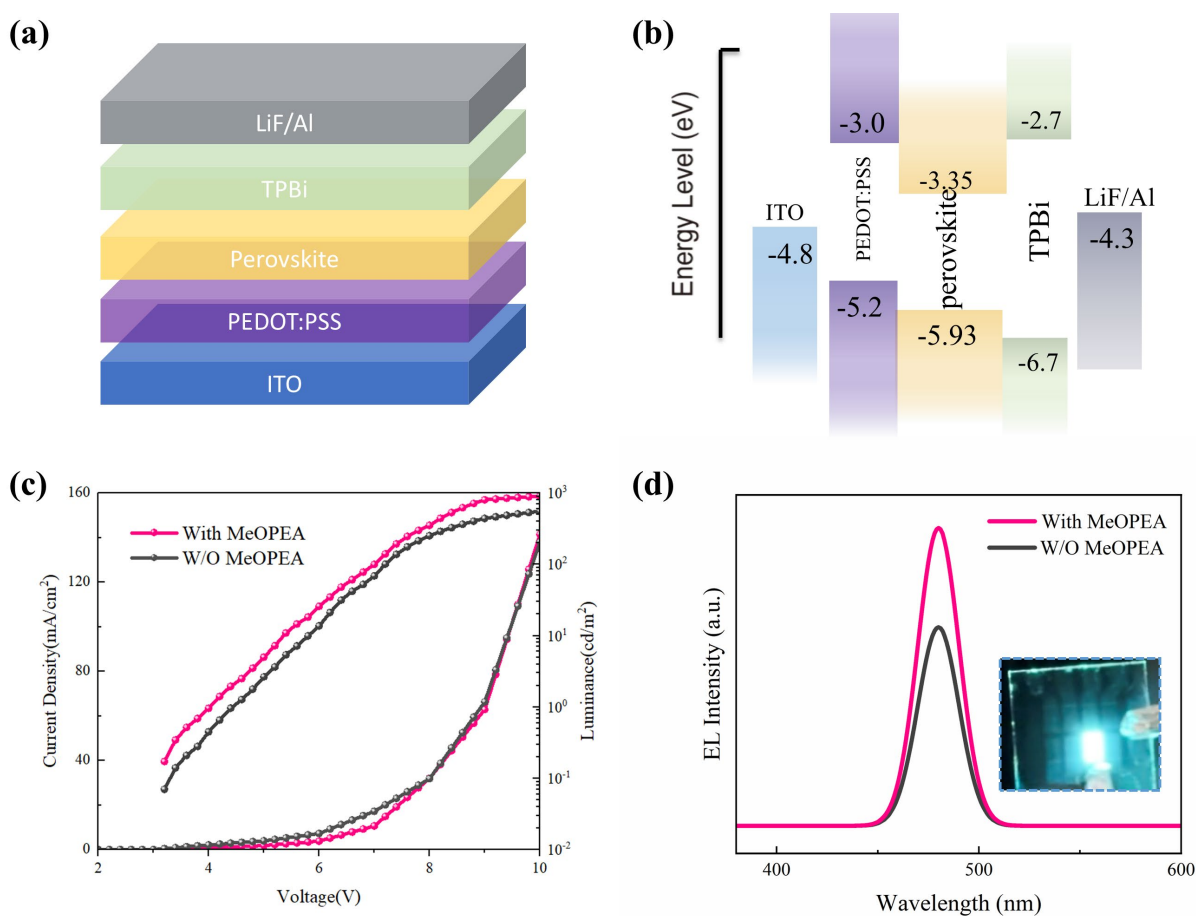


Figure 6. (a) Device structure diagram, (b) Energy level diagram, (c) J-V-L curve and (d) Electroluminescence spectrum of the blue-light PeLED

图 6. 蓝光 PeLED 的(a) 器件结构图、(b) 能级图、(c) J-V-L 曲线、(d) 电致发射光谱

为了验证 MeOPEA 调控策略对蓝光 PeLED 的实际作用,如图 6(a)所示,制备了结构为 ITO/PEDOT:PSS/Perovskite/TPBi/LiF/Al 的 PeLED 器件以评估 MeOPEA 对于器件性能的影响。图 6(b)说明了该器件结构的能级图,证明了各层之间具有良好的能级匹配,这种结构有效降低了能级跃迁的障碍,提高载流子注入钙钛矿层的效率[16]。图 6(c)展示了两个器件的电流密度 - 电压 - 亮度(J-V-L)曲线,与未添加 MeOPEA

的对照器件相比, 加入 MeOPEA 后器件电致发光强度得到增强, 最大亮度达到 1072.6 cd/m^2 , 表明在电场驱动下更多注入载流子能够在发光层内实现有效复合。发光强度的提高并没有给器件带来明显变大的电流密度, 说明加入 MeOPEA 后器件的发光效率显著提升。如图 6(d)所示, 器件的发射光谱在加入 MeOPEA 后没有改变, 仍保持 480 nm 的蓝光发射, 表明发光层中多相共存带来的无序发射得到抑制, 器件工作时的发光更多来源于较稳定的目标相, 而非来自多个低维相的竞争发射。这对于蓝光 PeLED 尤其重要, 因为蓝光器件对发射纯度和色坐标稳定性要求较高, 若内部相分布不合理, 则在偏压作用下容易出现发射峰漂移或肩峰增强等问题。

从器件性能提升机理来看, MeOPEA 的作用主要体现在以下几个方面。其一, MeOPEA 较强的界面吸附能力和更明显的分子极性使其能够更有效地参与前驱体组装与薄膜形成过程, 从源头上调节准二维钙钛矿的相结构。其二, MeOPEA 促进了较大 n 相的生成并增强了能量向目标发光相的传递效率, 使器件中的辐射复合过程更加集中和高效。其三, 改善了薄膜局域化学环境和激发态动力学, 降低了界面和表面陷阱引起的非辐射损失。相比于未修饰的 PEA 体系, MeOPEA 通过甲氧基取代引入更强的极性特征和更优的界面相互作用能力, 从而有效调节了准二维钙钛矿发光层的相分布和复合行为, 最终实现了蓝光器件性能的提升。

4. 结论

本文研究了甲氧基苯乙胺对蓝光准二维钙钛矿及其发光二极管性能的调控作用。DFT 计算表明, 相较于 PEA, MeOPEA 具有更明显的静电势差异, 并且对 CsPbBr_3 表面表现出更强的吸附作用, 这说明甲氧基取代能够增强有机阳离子与无机骨架之间的相互作用。薄膜表征结果显示, MeOPEA 的引入显著影响了准二维钙钛矿的结晶过程和相分布, 适量添加有助于改善薄膜表面形貌, 抑制低维相生成并促进较大 n 相形成, 同时优化局域化学环境, 增强薄膜的光致发光强度并改善载流子复合行为。器件测试表明, 经过 MeOPEA 调控后, 蓝光 PeLED 的电致发光性能得到明显提升, 最大亮度达到 1072.6 cd/m^2 。上述结果表明, 基于有机间隔阳离子的分子结构调控是优化蓝光准二维钙钛矿发光层质量和提升器件性能的有效途径。

参考文献

- [1] Zou, Y., Yuan, Z., Bai, S., Gao, F. and Sun, B. (2019) Recent Progress toward Perovskite Light-Emitting Diodes with Enhanced Spectral and Operational Stability. *Materials Today Nano*, **5**, Article ID: 100028. <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2019.100028>
- [2] Wei, K., Cui, M., Hu, C., Wei, S., Zhang, Z., Zhou, T., *et al.* (2025) Managing Edge States in Reduced-Dimensional Perovskites for Highly Efficient Deep-Blue LEDs. *Advanced Materials*, **37**, Article ID: 2412041. <https://doi.org/10.1002/adma.202412041>
- [3] Qi, H., Tong, Y., Zhang, X., Wang, H., Zhang, L., Chen, Y., *et al.* (2024) Homogenizing Energy Landscape for Efficient and Spectrally Stable Blue Perovskite Light-Emitting Diodes. *Advanced Materials*, **36**, Article ID: 2409319. <https://doi.org/10.1002/adma.202409319>
- [4] Jiang, Y., Qin, C., Cui, M., He, T., Liu, K., Huang, Y., *et al.* (2019) Spectra Stable Blue Perovskite Light-Emitting Diodes. *Nature Communications*, **10**, Article No. 1868. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09794-7>
- [5] Wang, K., Peng, Y., Ge, J., Jiang, S., Zhu, B., Yao, J., *et al.* (2019) Efficient and Color-Tunable Quasi-2D $\text{CsPbBr}_x\text{Cl}_{3-x}$ Perovskite Blue Light-Emitting Diodes. *ACS Photonics*, **6**, 667-676. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.8b01490>
- [6] Kawano, N., Nakauchi, D., Akatsuka, M., Kimura, H. and Yanagida, T. (2022) Photoluminescence and Scintillation Characteristics of Organic-Inorganic Layered Perovskite-Type Compounds with a Methoxyphenethylamine. *Journal of Luminescence*, **241**, Article ID: 118467. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118467>
- [7] Yang, Z., Chen, J., Li, M., Qi, M., Zhang, G., Chen, R., *et al.* (2024) 4-Methoxy Phenethylammonium Halide Salts for Surface Passivation of Perovskite Films towards Efficient and Stable Solar Cells. *Chemical Engineering Journal*, **494**, Article ID: 152955. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152955>

-
- [8] Zhang, W., He, L., Meng, Y., Kanda, H., Tang, D., Ding, B., *et al.* (2022) Dual-Site Synergistic Passivation for Highly Efficient and Stable Perovskite Solar Cells. *Advanced Energy Materials*, **12**, Article 2202189. <https://doi.org/10.1002/aenm.202202189>
- [9] Dong, J., Lu, F., Han, D., Wang, J., Zang, Z., Kong, L., *et al.* (2022) Deep-Blue Electroluminescence of Perovskites with Reduced Dimensionality Achieved by Manipulating Adsorption-Energy Differences. *Angewandte Chemie*, **134**, e202210322. <https://doi.org/10.1002/ange.202210322>
- [10] Yan, G., Sui, G., Chen, W., Su, K., Feng, Y. and Zhang, B. (2022) Selectively Fluorinated Benzylammonium-Based Spacer Cation Enables Graded Quasi-2D Perovskites for Efficient and Stable Solar Cells. *Chemistry of Materials*, **34**, 3346-3356. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.2c00146>
- [11] Rui, H., Wu, X., Qiu, Y., Liu, X., Bu, S., Cao, H., *et al.* (2023) Bifunctional Bidentate Organic Additive toward High Brightness Pure Red Quasi-2D Perovskite Light-Emitting Diodes. *Advanced Functional Materials*, **33**, Article ID: 2308147. <https://doi.org/10.1002/adfm.202308147>
- [12] Hou, W., Li, L., Liu, C., Ding, B., Cui, J., Chen, L., *et al.* (2025) Symmetry-Engineered Multifunctional Hemicyanine Hole Transport Material for High Performance Blue Perovskite Light-Emitting Diodes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **17**, 45958-45967. <https://doi.org/10.1021/acsami.5c09121>
- [13] Li, N., Xia, Y., Lou, Y., Li, Y., Jin, R., He, X., *et al.* (2024) Dual-Functional Self-Assembled Molecule Enabling High-Performance Deep-Blue Perovskite Light-Emitting Diodes. *Advanced Functional Materials*, **34**, Article ID: 2411227. <https://doi.org/10.1002/adfm.202411227>
- [14] Zhang, D., Fu, Y., Zhan, H., Zhao, C., Gao, X., Qin, C., *et al.* (2022) Suppressing Thermal Quenching via Defect Passivation for Efficient Quasi-2D Perovskite Light-Emitting Diodes. *Light: Science & Applications*, **11**, Article No. 69. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00761-4>
- [15] Sun, X., Liang, T., Ngai, K.H., Nie, Z., Fan, K., Li, S., *et al.* (2023) Methoxy Functionalization of Phenethylammonium Ligand for Efficient Perovskite Light-Emitting Diodes. *Advanced Optical Materials*, **11**, Article ID: 2300464. <https://doi.org/10.1002/adom.202300464>
- [16] Sun, S., Lu, M., Zhong, Y., Lu, P., Qin, F., Gao, Y., *et al.* (2022) Bifunctional Molecule Enables High-Quality CsPb(Br/Cl)₃ Nanocrystals for Efficient and Stable Pure-Blue Perovskite Light-Emitting Diodes. *ACS Energy Letters*, **7**, 3974-3981. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.2c01783>