

纯红光钙钛矿LED效率突破30%

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41847.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

纯红光钙钛矿LED效率突破30%。导读

金属卤化物钙钛矿半导体凭借高色纯度、溶液可加工性和高光致发光量子产率，成为下一代显示技术的候选材料。其中，纯红光钙钛矿LED（PeLED）进展显著：色纯度满足Rec. 2020标准，外量子效率（EQE）突破25%。但其性能仍落后于先进OLED。主要瓶颈在于溶液法制备的钙钛矿薄膜晶体取向无序，导致光学跃迁偶极矩（TDM）随机分布，大量光子被陷在器件内，严重限制光取出效率。

近日，中国科学院长春应化所秦川江团队提出新型配体工程策略，通过调控结晶动力学，在薄膜中原位构筑高度取向的准二维钙钛矿纳米片，实现TDM高度水平取向，将635 nm纯红光PeLED的EQE提升至31.2%。该工作为高效发光、激光及可集成光电子材料的溶液法制备提供了新设计思路。相关研究成果以In-situ formation of oriented perovskite nanosheets with tailored optical dipoles enabling >30% EQE in pure-red LEDs为题发表于Light: Science Applications。

低维钙钛矿材料凭借其量子限域效应以及各向异性的光学特性，成为突破发光效率限制的一条极具潜力的途径。以往研究表明，胶体钙钛矿纳米片在悬浮液中能够展现出接近100%的发光量子产率，并且其水平TDM占比足以与顶尖的有机发光材料相媲美。然而，将这些溶液相纳米片集成到功能薄膜中却存在技术障碍：在成膜过程中不仅难以精准控制晶体取向，而且配体引发的晶格畸变和层间不匹配使得在薄膜内形成完整纳米片的能量势垒极高。因此，常规方法通常只能获得取向随机的非晶纳米晶体，进而导致缺陷增多、效率大幅降低。打破这一热力学与动力学限制，成为该领域亟待解决的难题。

1. 配体工程调控结晶动力学，降低纳米片原位构筑能垒

本文提出了一种原位纳米片制备策略，即选用2-萘甲胺（2-NMA）作为准二维钙钛矿的配体。理论与实验均证实，2-NMA配体凭借较小的端基空间位阻和较强的层间 π - π 相互作用，将纳米片形成的能量势垒大幅降低至0 eV以下（图1a）。这使得原本杂乱无章的各向同性薄膜（图1b）成功转变为结构完整、具有face-on取向的纳米片薄膜（图1c）。通过对实际制备的薄膜进行截面TEM表征并对比，可以观察到薄膜中形成了层状有序结构（图1d, e）。将薄膜从基底剥离并对晶体进行表征，可以观察到完整纳米片结构的形成（图1f, g）。

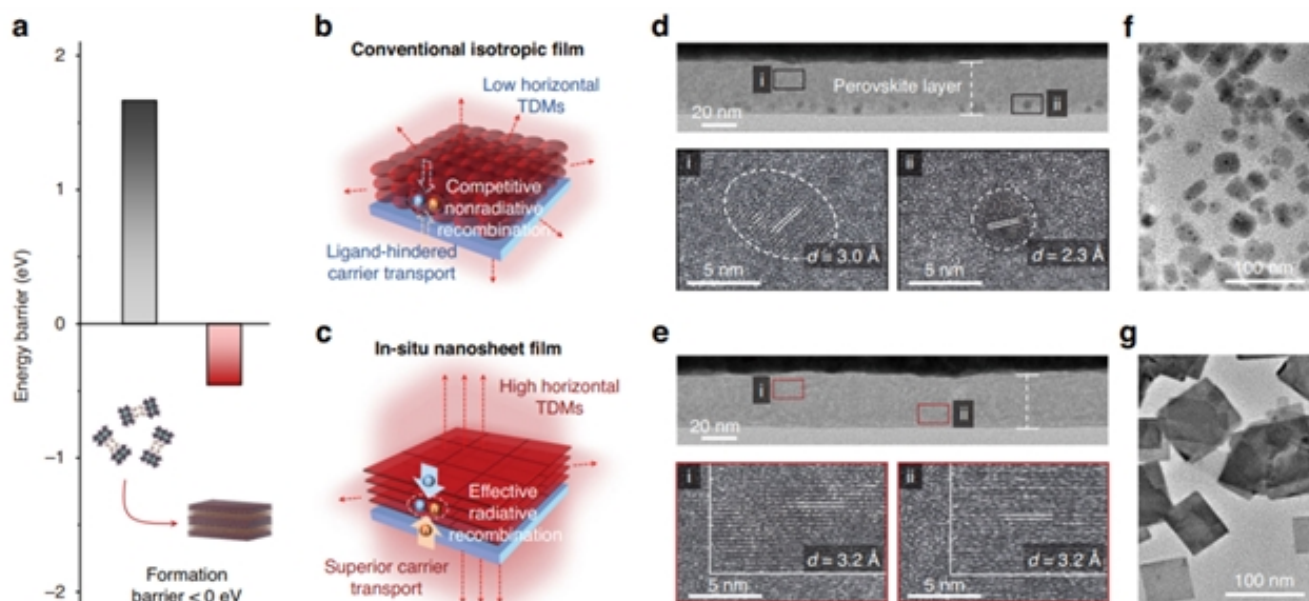


图1：(a) 基于不同配体的钙钛矿纳米片形成能垒计算；(b) 常规各向同性薄膜与 (c) 纳米片薄膜的结构示意图；(d, e) 薄膜截面TEM表征；(f, g) 薄膜剥离后的晶体TEM表征

2. 原位表征揭示结晶动力学，证实纳米片有序取向

为精准捕捉这一成膜过程，研究团队开展了从前驱体溶液至最终薄膜的完整动力学表征工作。首先，动态光散射（DLS）分析发现，在成膜前的前驱体溶液阶段，2-NMA因具有更小的空间位阻，已自发形成了更大的胶体组装体（图2a, b）。这种溶液相的预成核团簇，为后续的快速结晶提供了坚实基础。随后，原位光致发光光谱检测显示，与常规薄膜需热退火才能触发结晶不同，2-NMA体系在室温旋涂过程中即可实现结晶，直接诱导原位晶种生长（图2c, d）。最后，二维掠入射广角X射线散射（2D-GIWAXS）图谱提供了薄膜成型后晶体取向的直接证据：常规薄膜呈现代表无序取向的衍射环，而纳米片薄膜则呈现出清晰、离散的布拉格斑点（图2e, f）。这一从溶液到薄膜的表征结果揭示了结晶动力学，并证实了face-on取向的钙钛矿结构在薄膜内的原位构筑。

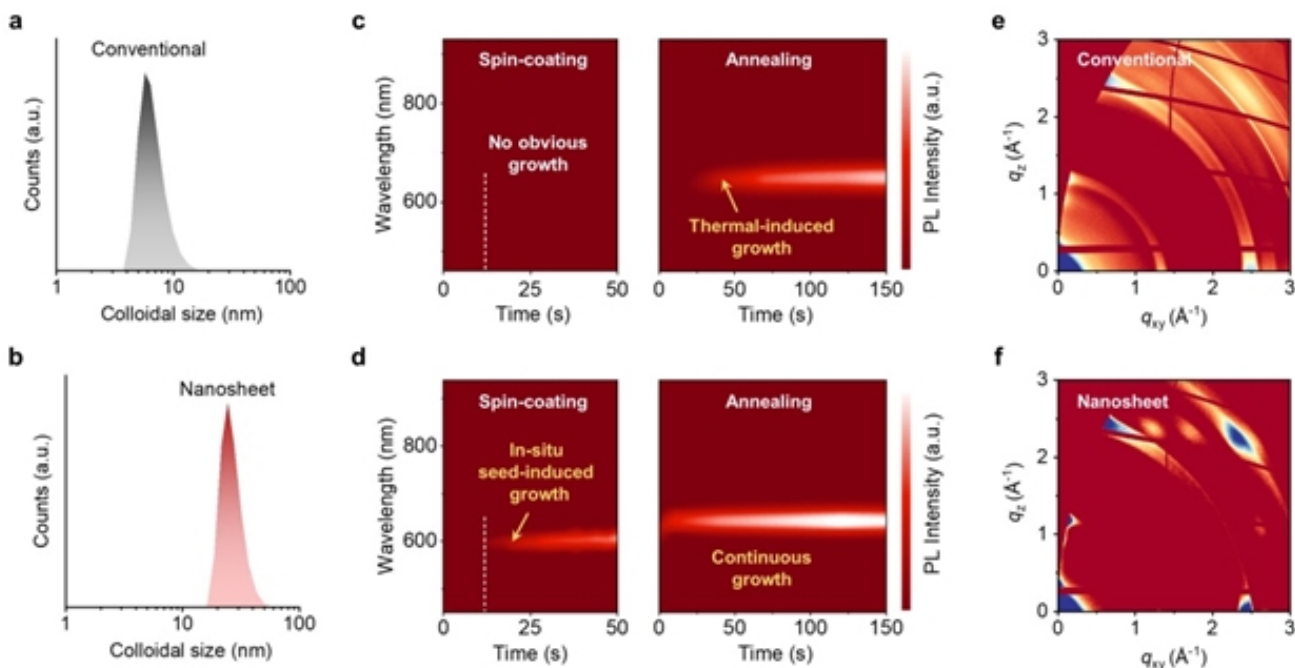


图2：常规体系与纳米片体系的结晶动力学全过程对比。前驱体溶液的动态光散射（a, b），成膜过程的原位PL光谱（c, d），以及最终薄膜的晶体取向2D-GIWAXS图（e, f）

3. 光学与电学性质的双重提升

角度依赖光致发光测试结果定量证实，原位构筑的钙钛矿纳米片薄膜实现了TDM的高度水平取向，其水平TDM比例从常规薄膜的68%大幅跃升至86%（图3a）。这将大幅提升器件的光取出效率，打破光子输出的限制。在电学方面，高度有序的配体排列显著增强了层间电子耦合，为电荷的纵向传输构建了高效通道。霍尔效应测试表明，这种准二维纳米片薄膜的载流子迁移率不仅远高于常规准二维钙钛矿薄膜，甚至达到了可与纯三维钙钛矿相媲美的顶尖水平（图3b）

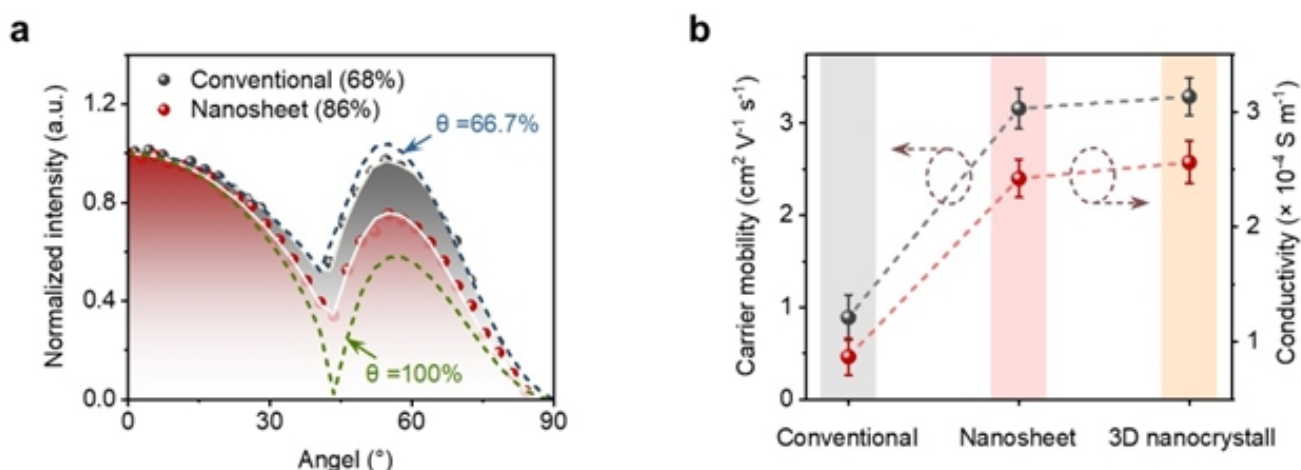


图3：(a) 薄膜水平TDM比例测试拟合；(b) 载流子迁移率对比

4. 纯红光PeLED性能突破

依托上述显著的光学与电学优势，团队所制备的635 nm纯红光PeLED呈现出优异的性能。原位纳米片薄膜器件实现了高达31.2%的外量子效率（图4a），器件峰值亮度提升至13,400 cd m⁻²（图4b），光学模拟结果（图4c）进一步证实，水平TDM比例的提升显著增强了光提取效率，从而突破了传统薄膜约25%的效率上限。此外，通过EQE随PLQY和水平TDM比例变化的关系图（图4d）预测，纳米片器件的理论极限可达~31%，这与实验观察到的31.2%的峰值效率非常吻合。与已报道的高性能纯红光PeLED相比（图4e），本研究制备的纳米片器件在效率上均处于领先地位。最后，团队成功制备了发光面积为12 cm²的器件（图4f），其发光均匀且颜色纯正，证明了该原位构筑策略在大面积应用中的潜力。

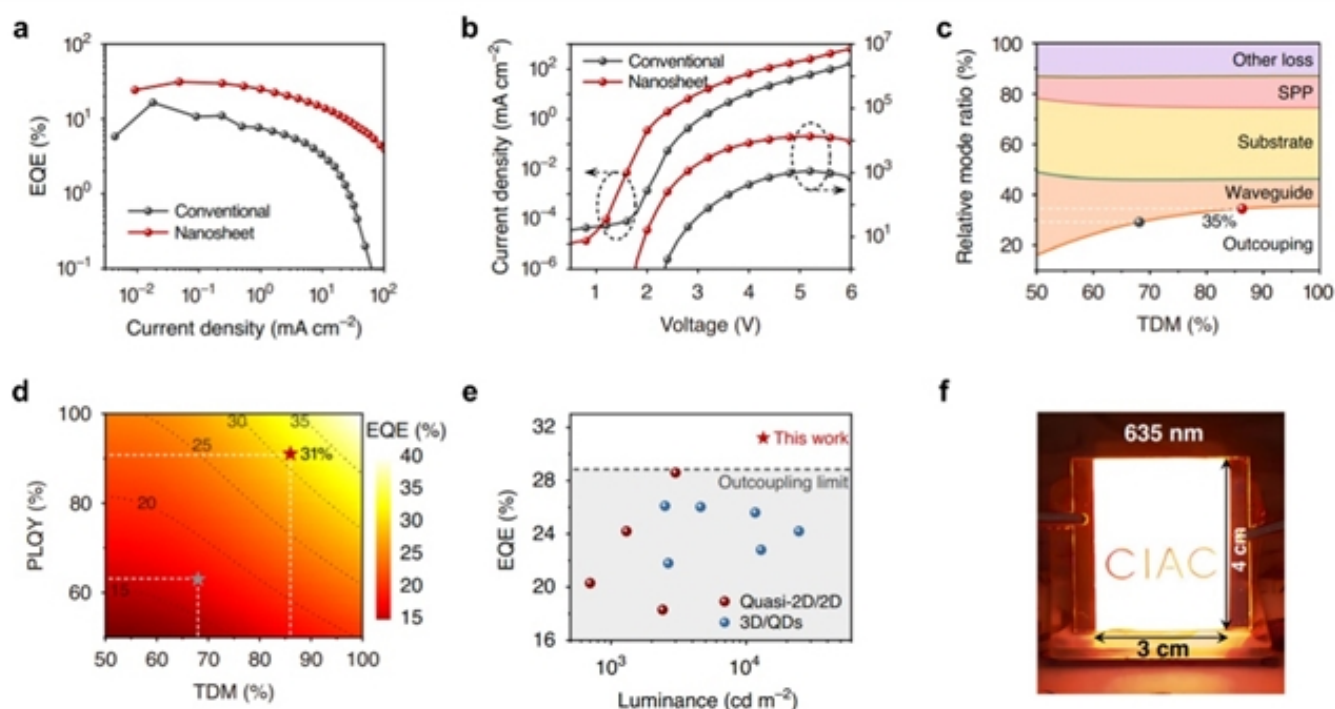


图4：(a) EQE-电流密度曲线；(b) 电流密度-电压-亮度曲线；(c) 两种器件的光提取效率模拟对比；(d) 基于PLQY和水平TDM比例的理论EQE模拟图；(e) 本工作与已报道高性能纯红光PeLED的性能对比；(f) 大面积（12 cm²）发光器件实物展示。

总结与展望

本研究采用创新的配体工程策略，成功突破了溶液法制备钙钛矿薄膜时晶体取向无序这一瓶颈。通过在薄膜内原位构建高度取向的准二维纳米片，不仅使纯红光PeLED的效率首次突破30%，还兼顾了高亮度与长寿命。这一材料结构设计，不仅为下一代高效显示技术奠定了材料基础，也为激光器、集成光子学等溶液法半导体器件的研发开辟了新途径。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02184-x>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：秦川江等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发