

江苏省高等学校
大学生创新创业训练计划项目申报表
(创新训练项目)

项目编号	不填		
项目名称	叠层钙钛矿发光二极管的研究		
项目主持人	贺加贝	联系电话	18896800227
所在学院	纳米科学技术学院		
学号	2314401067	专业班级	纳米材料与技术 2 班
指导教师	周东营		
申请日期	2025 年 4 月 18 日		
起止年月	2025 年 6 月-2027 年 6 月		

苏州大学

填写说明

1. 本申请书所列各项内容均须实事求是，认真填写，表达明确严谨，简明扼要。
2. 申请人可以是个人，也可为创新团队，首页只填主持人。“项目编号”一栏不填。
3. 本申请书为大 16 开本（A4），左侧装订成册。可网上下载、自行复印或加页，但格式、内容、大小均须与原件一致。
4. 申请金额及经费预算根据往届项目资助额度进行估算，实际支持数额以学校实际批复为准。往届项目资助总额为国家级重点支持 40000 元、国家级 20000 元、省级 6000 元。校级项目经费由学院统筹支持。
5. 主持人所在学院认真审核，经初评，签署意见后，将申请书报送苏州大学大学生创新创业综合服务平台科研项目管理系统。

一、 基本情况

项目名称	叠层钙钛矿发光二极管的研究						
项目级别	<input type="checkbox"/> 国家级（推荐）重点支持 <input checked="" type="checkbox"/> 国家级（推荐） <input type="checkbox"/> 省级 <input type="checkbox"/> 校级						
项目类型	创新训练项目						
所属学科	学科一级门：工学 学科二级类：材料类						
申请金额	<input type="checkbox"/> 40000 元（国重） <input checked="" type="checkbox"/> 20000 元（国） <input type="checkbox"/> 6000 元（省）		起止年月		2025 年 6 月-2027 年 6 月		
主持人	贺加贝	性别	女	民族	汉	出生年月	2006 年 4 月
学号	2314401067	联系方式	邮箱：2314401067@stu.suda.edu.cn 手机：18896800227				
指导教师	周东营	联系方式	邮箱：dyzhou@suda.edu.cn 手机：13814899939				
项目简介	<p>金属卤化物钙钛矿材料凭借高荧光量子产率、宽色域和易调节光谱等独特优势，被视为下一代超高清显示的理想半导体发光材料。然而，面向产业应用，钙钛矿发光二极管（PeLED）仍然面临发光效率、稳定性的性能瓶颈。借鉴有机发光二极管（OLED）的成功经验，叠层器件结构也能显著提升 PeLED 的效率、亮度和寿命，有望解决 PeLED 目前面临的性能短板，促进 PeLED 早日落地应用。</p> <p>然而，该技术正处于发展的初期，仍面临多层膜溶液沉积过程中的相互侵蚀和连接层产生和注入电荷分配不均等挑战。针对这些问题，本课题拟采用“工艺开发+界面优化”的研究策略，通过能级精准调控和溶剂正交性设计，构建多级串联结构，实现 PeLED 发光亮度的显著提升。具体而言，本课题将利用光热协同交联固化技术，开发低温固化工艺，解决多层旋涂中的界面侵蚀问题；通过偶极分子修饰调控界面能带弯曲，实现高效的电荷生成与分离。本项目的研究成果能够为全溶液钙钛矿叠层发光器件与显示提供可靠的理论和技术支撑，研究成果具有重要的理论意义和实用价值。</p>						
负责人曾经参与科研的	曾获 2024 年“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛 院级						

情况		三等奖			
指导教师承担科研课题情况		<p>(1) 主持 1 项国家自然科学基金面上项目：长寿命窄光谱纯蓝光有机发光二极管的制备及其激发态调控研究（62375193，48 万元，2024.01-2027.12）</p> <p>(2) 主持 1 项江苏省自然科学基金面上项目：超高密度 OLED 微显示像素的新型掩模版及沉积工艺研究（BK20221237，10 万元，2022.07-2025.06）</p> <p>(3) 参与 1 项科技部国家重点研发计划：稀土掺杂/配位钙钛矿电泵近红外 LED 与光波导放大器（2024YFA1209504，400 万元，2025.01-2029.12）</p>			
指导教师对本项目的支持情况		<p>周东营副教授作为本项目的指导教师，在 OLED 和 PeLED 等方面具有丰富的研究经验，尤其是在叠层 OLED 领域取得过重要研究成果。叠层结构是推动 PeLED 在新型显示中落地应用的必然选择。作为指导教师，周东营非常支持此次项目申报，对于立项项目，将定期组织学生开展科研讨论、指导学生掌握基本实验操作、提供学生科研场所、提供学生研究思路，并指导学生及时对研究成果进行总结和分析，从而尽早将成果以学术论文或专利形式进行发表。</p>			
项目组主要成员 （含主持人在内不超过 5 人）	姓名	学号	专业班级	所在学院	项目中的分工
	贺加贝	2314401067	纳米材料与技术 2023 级 2 班	纳米科学技术学院	统筹项目整体进度；协调界面优化组与工艺开发组的协作；论文撰写。
	陆星宇	2314401023	纳米材料与技术 2023 级 1 班	纳米科学技术学院	负责偶极分子修饰工艺开发，研究自组装单层技术对界面势垒的影响；实验数据处理。
	周新峰	2314401076	纳米材料与技术 2023 级 2 班	纳米科学技术学院	负责全溶液法叠层器件制备；实验数据处理。
	朱鑫贇	2314401020	纳米材料与技术 2023 级 1 班	纳米科学技术学院	负责电荷传输机理模拟与能级匹配优化；实验数据处理。
	胡志伟	2314401098	纳米材料与技术 2023 级 2 班	纳米科学技术学院	动态跟踪与竞品分析；数据可视化与展示；协助管理经费使用，确保符合国家级项目申报要求。

二、 立项依据（可加页）

（一）研究目的

2.2 研究目标

本项目以促进 PeLED 在新型显示领域的应用为目标，通过对叠层 PeLED 器件的界面和工艺进行协同优化研究，开发出具有实用价值的内部连接层结构和抗侵蚀溶液制备工艺，从而制备出高效、稳定的单色和白光叠层钙钛矿发光器件。具体而言，将实现下列目标：

（1）开发抗界面侵蚀的电荷连接层材料，形成具有高效电荷产生能力的电荷连接层结构，实现串联发光单元中的平衡电荷分配，为叠层 PeLED 提供良好的电荷注入和传输。

（2）开发偶极层界面修饰的电荷连接层，提高电荷分离和注入效率，为新型电荷连接层结构迭代和稳定性提供整体优化方案。

（3）开发正交溶剂体系和均匀成膜工艺，设计出适配于红、绿、蓝不同光色叠层 PeLED 的交联电荷传输材料，为构筑叠层 PeLED 提供可靠的全溶液法加工工艺。

（二）研究内容

为了实现上述目标，本项目将开展关键界面和关键工艺两方面的研究工作。首先，重点研究极性分子修饰电荷生成界面对内部连接层性能优化的工作机理；其次，深入研究可交联传输层材料的结构设计，实现成熟的全溶液叠层器件制备工艺。具体研究内容如下：

（1）在界面优化方面，研究提高电荷产生能力的偶极层修饰方法

偶极层界面修饰是单结钙钛矿和有机光电器件中常用的提高电荷注入和转移的有效方法，但尚未见其在叠层器件中应用的文献报道。因此，针对叠层器件中电荷连接层的电荷产生能力不足和分配调控难等问题，本项目将使用偶极分子对电荷连接层进行界面修饰，通过引入内建电场，促进电荷生成和分离。我们将研究偶极分子的修饰条件，如浓度、修饰时间等，以实现最佳载流子迁移率的提升；筛选出具有强偶极矩的分子（如咪唑磷酸分子），采用自组装单层技术，将偶极分子均匀修饰在连接层表面；系统研究连接层中的载

流子迁移机理以及界面势垒对载流子的产生和迁移的影响。

（2）在工艺开发方面，研究提高交联传输层的抗溶剂侵蚀工艺条件

在叠层器件的溶液加工过程中，功能层制造工序增多，多种溶剂对功能层间的侵蚀会造成钙钛矿相分解。本项目通过制备原位交联传输层，在钙钛矿表面或底面形成更加牢固的保护层，以提高叠层 PeLED 的抗溶剂侵蚀性能。我们将设计合理的交联分子结构，筛选出可在低温（< 150℃）下结晶的电荷传输层和连接层材料，研究光/热触发的原位交联技术形成物理阻隔层以阻断后续溶液渗透的效果，研究多层溶液逐层加工溶液表面张力差异和润湿性对膜厚和形貌的影响，为实现高性能叠层 PeLED 器件提供优化条件。

（三）国、内外研究现状和发展动态

在 PeLED 器件中，电致发光（EL）的产生源于阴极注入的电子与阳极注入的空穴在钙钛矿发光层（EML）内通过辐射复合实现的能量转换^[1]。为实现高效电致发光，以下四个维度的策略常被使用：（1）平衡载流子注入效率，（2）提升载流子-激子转换效率，（3）提高辐射复合效率，（4）优化光取出效率。经过十余年的发展，研究人员已经制出外量子效率（EQE）突破 30% 的单结 PeLED。图 1 展示了单结结构的绿光、红光及蓝光 PeLED 关键性能的发展趋势^[2]。

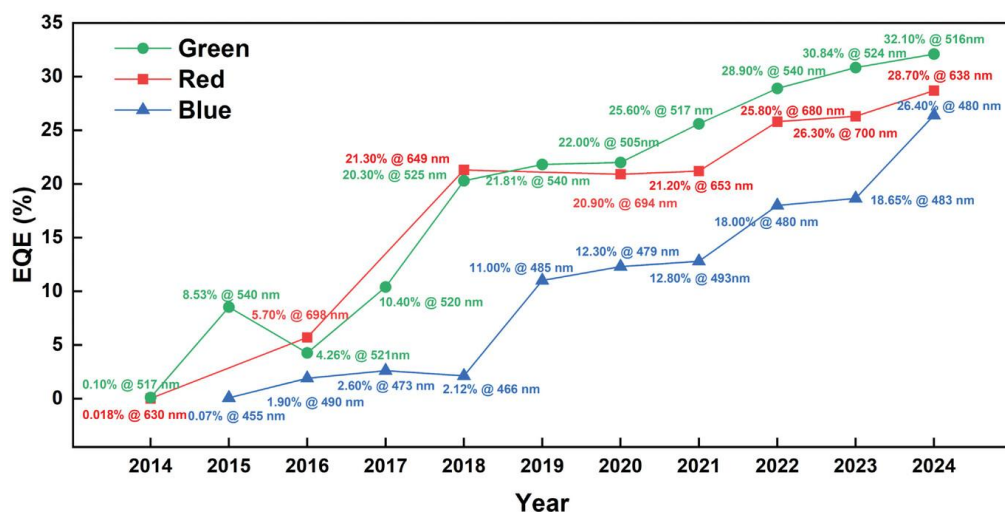


图 1 红光、绿光、蓝光 PeLED 器件的效率进程[12]

在红光 PeLED 方面，常见的钙钛矿组分 CsPbI₃ 在室温下易发生相转变，在电场作用下卤素离子易迁移引发相分离，从而导致发光效率骤降。针对室温相稳定性差这一问题，中

国科学院陈军院士团队^[3]提出了一种全溶液法原位制备钙钛矿范德华外延异质结的策略，所制备的 CsPbI₃ 红光 PeLED 器件在 630 nm 处的 EQE 达 24.6% 和 T50 寿命达 6330 分钟。针对高偏压下离子迁移的问题，上海大学杨绪勇教授团队^[4]用一种独特的双端有机分子配位“锚定”钙钛矿表面以稳定其八面体结构，得到了在纯红光 620–650 nm 范围区间内光谱连续可调的 PeLED，其中 638 nm 处发射的 PeLED 器件 EQE 达到 28.7%，创造了红光 PeLED 发光效率的新纪录。

在绿光 PeLED 方面，大量的研究集中在通过形态控制、成分调制和表面处理等方法抑制钙钛矿缺陷和调节结晶特性。然而 PeLED 内部产生的约 80% 的光子被困在器件中，通过各种耗散通道（包括衬底模式、波导模式和表面等离子体极化激元（SPP）等）无法从 PeLED 中取出。针对上述问题，苏州大学冯敏强教授团队与廖良生教授团队合作^[5]开发了一种各向异性的低折射率电子传输材料（BPBiPA），有效抑制了表面等离子体极化激元损耗并增强了波导模式的光子提取，实现了在 516 nm 处具有 32.1% 的 EQE 的绿光 PeLED，创造了该单色器件效率的最高记录。

在蓝光 PeLED 方面，降维钙钛矿体系和混合卤化物钙钛矿是实现蓝光 PeLED 的常见策略，然而仍面临载流子迁移率偏低和能量转移效率不足的瓶颈问题。针对该问题，在维度调控方面，中国科学技术大学教授崔林松教授团队^[6]，以 4-氟苯乙基溴化铵（p-FPEABr）控制钙钛矿维度，并通过添加双（三苯基膦）氯化亚胺（PPNC1）调控相分布，抑制小层数（低 n 值）钙钛矿相的形成，促进准三维（高 n 值）相的生成，实现了 483 nm 的发光峰处 EQE 为 21.4% 的蓝色 PeLED 器件，同时，在 100 cd m⁻² 的初始亮度下，器件达到了 129 分钟的 T50 寿命。

以上调研表明，得益于钙钛矿出色的光电性能和科研人员的不懈努力，单色钙钛矿 LED 的效率得到了大幅提升，对推动新型显示技术的迭代更新具有重要意义，因此国家已将其纳入国家战略电子材料体系，并高度重视其战略布局。然而，单结钙钛矿 LED 的稳定性仍远低于实用标准，其高亮度下的性能也有待提高。上述调研也表明，目前针对全溶液法制备工艺的电荷连接层结构仍很匮乏，因而开展全溶液法叠层 PeLED 及其电荷连接层结构的研究势在必行。

（四）创新点与项目特色

（1）方法创新：

本项目创新性地 将偶极界面修饰策略引入到电荷连接层领域。通过偶极分子在界面处自发形成的能带弯曲效应，实现能级的精准对准和电荷的高效分离，从而构建低电学损耗的电荷连接层。

(2) 工艺创新：

本项目发展了无侵蚀的全溶液法制备多层膜的工艺基础之上，保证了叠层钙钛矿发光器件制备的可能。结合叠层器件结构在提升器件效率和寿命上的独特优势，本项目有望引领钙钛矿发光器件的效率和寿命实现跨越式的提升。

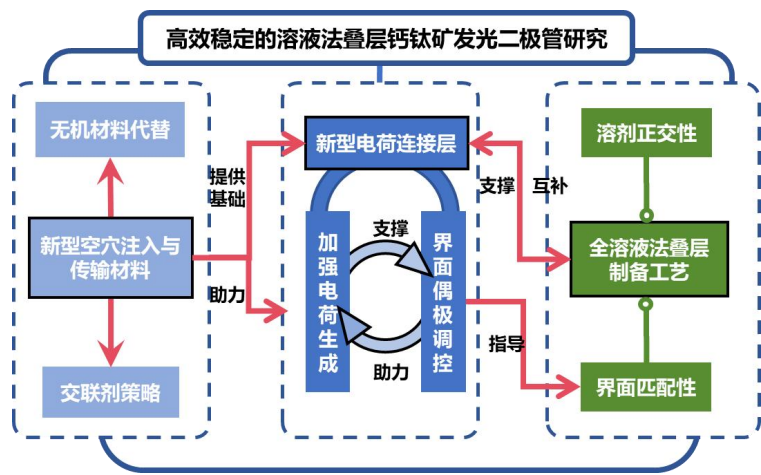
(3) 效果创新：

本项目创新性地采用叠层器件结构，将多色钙钛矿发光器件高效串联，不仅填补了钙钛矿白光发光器件的技术空白，还为其在固态照明和全彩显示领域的应用开辟了新的研究方向。

(五) 技术路线、拟解决的问题及预期成果

1、技术路线

本项目团队将利用已有的设备条件和工作基础，以新型电荷连接层和界面研究为主线制定了以下研究方案（如路线 1 所示）。



路线 1 基于钙钛矿的高效稳定叠层发光器件研究技术流程

(1) 针对偶极层修饰电荷生成界面的技术路线

本项目将选取几种商业化咔唑磷酸分子作为偶极修饰材料，研究分子偶极矩和取代基的差异对界面电荷生成能力的影响。研究偶极分子的表面润湿性对沉积钙钛矿薄膜结晶和质量的影响。根据研究结果，指导设计新型偶极分子，进一步优化电荷生成界面的能级对准和电荷传输特性，研究偶极界面修饰的电荷连接层的工作机理，为后续构建叠层钙钛矿发光器件打下良好的基础（图2）。

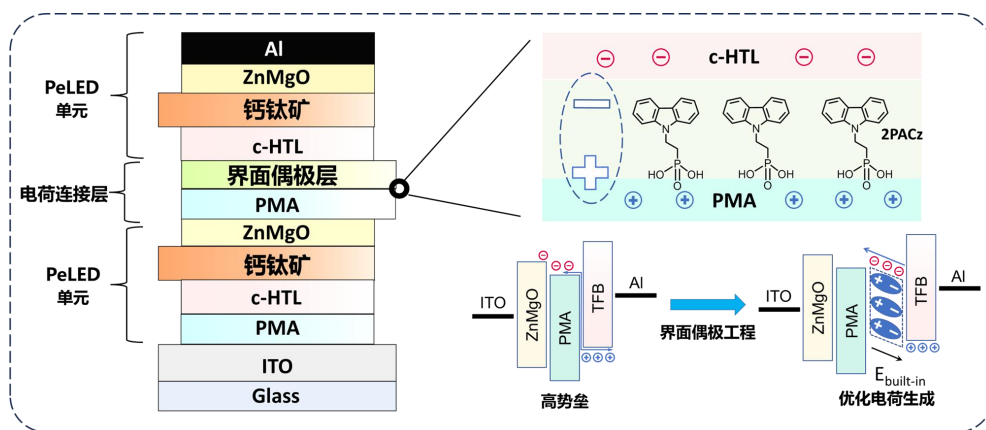


图2 基于界面偶极的新型电荷连接层示意图

（2）针对无侵蚀叠层制备工艺的技术路线

本项目将开展对交联空穴注入与传输材料的研究，通过光热协同交联固化的方式使得材料获得优异的抗溶剂特性与较好的薄膜致密性，在此过程中开发低温固化工艺，避免多次反复加热对钙钛矿的影响。为了保证材料优异的传输性能，本项目还将通过引入茚、咔唑等基团对交联分子的化学结构进行设计。根据研究经验，我们还将通过优选钙钛矿反溶剂的类型和添加量，保证制备过程中的溶解正交性，以改善功能层和易受影响的钙钛矿发光层，最终总结出普适性的溶液法叠层钙钛矿发光器件制备工艺经验（图3）。

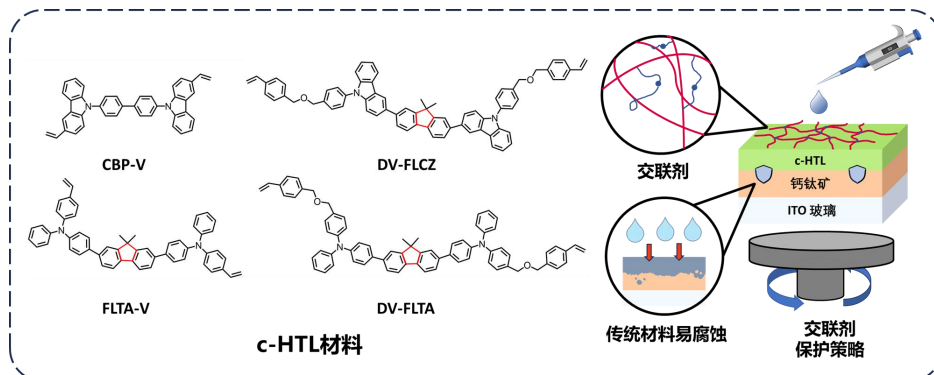


图 3 拟采用的交联空穴传输层（c-HTL）的分子结构及其抗溶剂侵蚀示意图

2、拟解决的问题

（1）溶液法电荷连接层内部界面能级的不完全匹配导致电荷生成能力差的问题。

（2）串联多个钙钛矿发光单元带来的功能层制造工序增多以及溶液加工工艺的过程中面临的多种溶剂对功能层间的侵蚀等复杂问题。

3、预期成果

（1）制备出 EQE \geq 20%的单色单结 PeLED 器件，制备出 EQE \geq 35%的叠层 PeLED 器件，达到或接近同期文献中同类器件的效率水平。

（2）项目负责人以第一作者身份 1~2 篇 SCI 论文或申请 1~2 项发明专利，参加 1~2 次国内学术会议。

（3）人才培养方面，项目团队的成员获得研究生推免资格。

（六）项目研究进度安排

研究时间间隔	研究计划进度
2025.6 - 2025.11	a. 开展电荷生成界面的偶极层修饰研究，测试 1-3 种新型咪唑磷酸基的偶极分子的修饰效果。 b. 利用偶极修饰的电荷连接层，初步探索单色叠层 PeLED 的制备工艺。
2025.12 - 2026.5	a. 试验抗界面侵蚀的自交联型空穴传输材料，提高 PeLED 器件效率及稳定性。 b. 通过对比不同类型的溶剂，确定合适的对功能层无侵蚀作用的正交溶剂体系。 c. 优化的电荷连接层和无侵蚀工艺，提高 PeLED 的发光效率。

2026.6 - 2026.11	a. 利用利用光电测试技术，研究偶极层界面修饰后的电荷注入势垒、器件瞬态电流、连接层电阻等参数，分析叠层器件的电压分配机制。 b. 分析实验结果并进行实验改良。
2026.12 - 2027.6	总结实验结果，进行结项工作，将实验成果撰写成论文。

（七）已有基础

1. 与本项目有关的研究积累和已取得的成绩

本项目团队成员均为苏州大学纳米科学技术学院二年级本科生，具有扎实的专业知识背景，所掌握的知识已覆盖本项目涉及的大部分实验理论。组内成员均已在实验室进行过一至两个学期的实习，能较好地掌握钙钛矿发光二极管的初步制备方法。团队各成员间优势互补，在材料合成、理论计算、知识理解、成果汇报、论文打磨等方面均有专人擅长。

在实验研究方面，团队成员参与了一项交联传输层的研究，利用光/热协同聚合技术，成功制备了一种可在低温下制备的空穴传输层。傅里叶红外光谱表明，该单体分子发生了有效聚合。

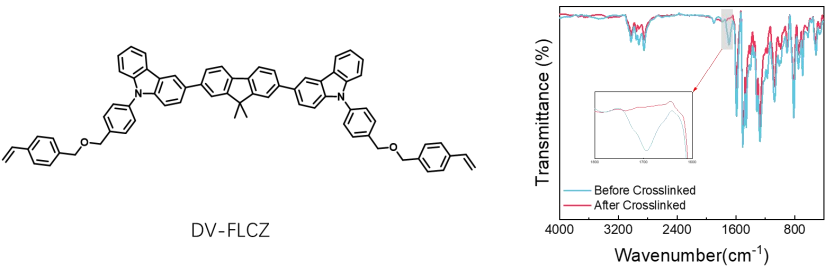


图 4 正在试验的一种交联分子结构（左）及其交联前后的傅里叶红外光谱图

为了验证交联传输层的抗溶剂侵蚀效果，对所制备的交联传输层进行溶剂冲洗试验，从图中可以看出，未交联分子经溶剂冲洗后，发生了明显的形貌变化，而交联的分子并未发生明显的形貌变化。这些结果表明，这种交联薄膜能够有效阻挡上层溶剂的侵蚀，从而解决界面侵蚀问题。

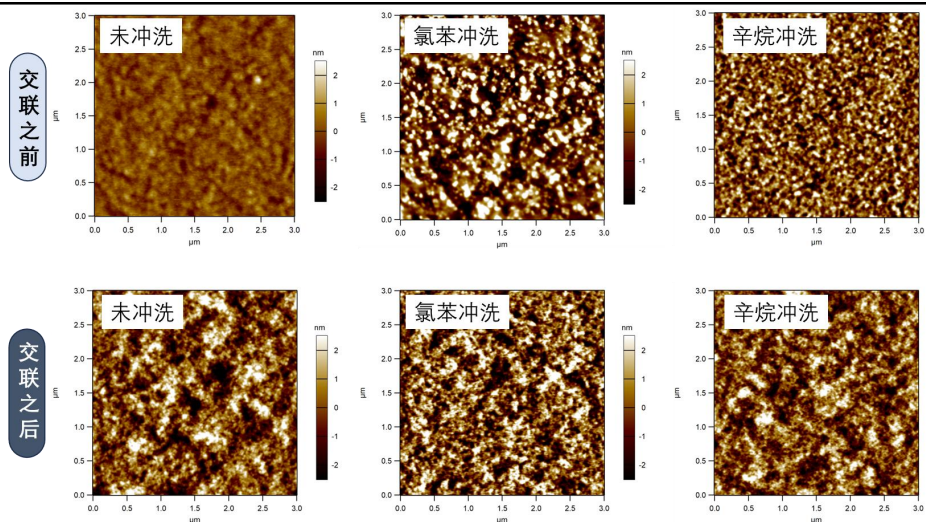


图 5 正在试验的一种交联分子交联前后抗溶剂冲洗实验后的原子力显微图

为了验证交联传输层的对 PeLED 性能的影响，初步探索了不同传输层厚度的发光器件。结果显示，传输层厚度对器件性能有较大的影响，但是所有器件的发光光谱都比较稳定，所制备器件的最高效率达 14%以上，这为后续继续开展更多器件性能优化的研究打下了基础。

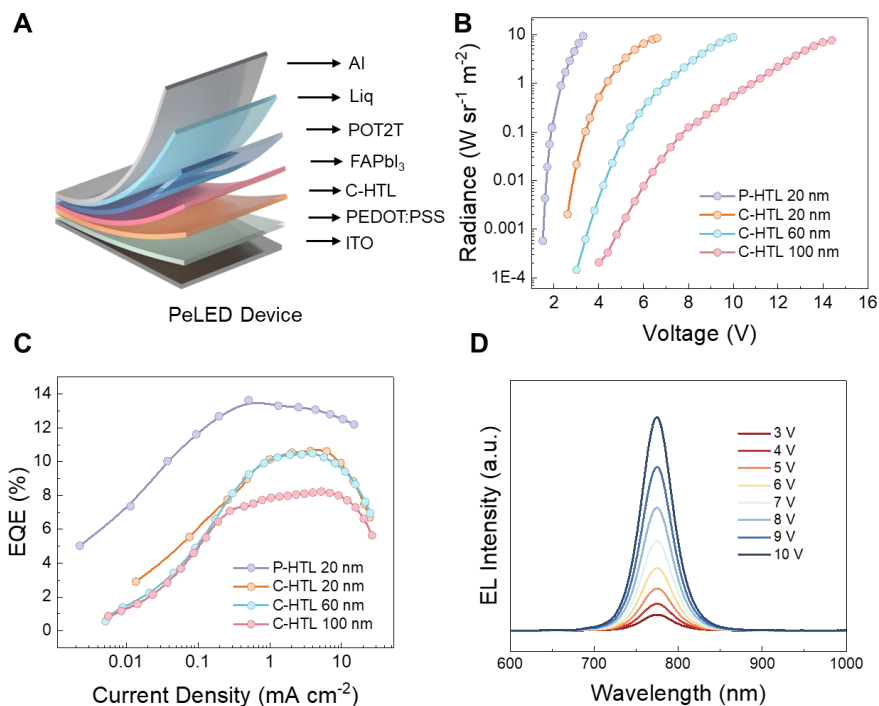


图 6 正在试验的一种交联分子不同厚度下的器件性能：A) 器件结构示意图；B) 辐射亮度-电压曲线；C) 外量子效率-电流密度曲线；D) 不同偏压下的光谱

综上。本团队拥有科研项目申请经历，协作能力强，科研兴趣浓厚，有信心和能力完成此项目的既定目标。

2. 已具备的条件，尚缺少的条件及解决方法

本项目依托的苏州大学功能纳米与软物质研究院（FUNSOM）具备优异的研究条件与国际领先的设备支撑。本项目指导教师的课题组一直致力于有机光电材料与器件方面的研究工作，拥有日常实验中所需要的基本仪器，例如，用于材料合成的仪器设备（液相色谱仪、旋转蒸发仪、高速离心机等）、用于器件制备的仪器设备（高真空热蒸镀仪、紫外臭氧清洗机、手套箱、旋转匀胶仪等）、用于器件表征的仪器设备（精密电流电压表、光亮度光谱仪、老化测试仪等）。

在研究过程中，为了对材料与界面的相互作用机理进行深入理解，本项目需要进行密度泛函理论的材料模拟以及材料表面电子能级的 UPS 测试，这些计算和表征是目前尚缺少的条件，拟通过委托第三方机构进行解决。

参考文献

- [1] 李继军, 聂晓梦, 李根生, 王安祥, 张伟光, 郎风超, 杨连祥. 平板显示技术比较及研究进展. 中国光学, 2018, 11, 695-710.
- [2] E. Lim, X. Chen, Z. Wei. The Rise of Tandem Perovskite Light-Emitting Diode. Small, 2024, 20, 2405933.
- [3] K. Wei, T. Zhou, Y. Jiang, C. Sun, Y. Liu, S. Li, S. Liu, X. Fu, C. Hu, S. Tian, Y. Yang, X. Fu, N. AlMasoud, S. Qaid, M. Nazeeruddin, H. Hsu, W. Li, J. Kim, R. Long, W. Zhang, J. Chen, M. Yuan. Perovskite Heteroepitaxy for High-Efficiency and Stable Pure-Red LEDs. Nature, 2025, 638, 949 - 956.
- [4] L. Kong, Y. Sun, B. Zhao, K. Ji, J. Feng, J. Dong, Y. Wang, Z. Liu, S. Maqbool, Y. Li, Y. Yang, L. Dai, W. Lee, C. Cho, S. Stranks, R. Friend, N. Wang, N. Greenham, X. Yang. Fabrication of Red-Emitting Perovskite LEDs by Stabilizing their Octahedral Structure. Nature, 2024, 631, 73-79.
- [5] S. Sun, J. Tai, W. He, Y. Yu, Z. Feng, Q. Sun, K. Tong, K. Shi, B.

Liu, M. Zhu, G. Wei, J. Fan, Y. Xie, L. Liao, M. Fung. Enhancing Light Outcoupling Efficiency via Anisotropic Low Refractive Index Electron Transporting Materials for Efficient Perovskite Light-Emitting Diodes. Adv. Mater., 2024, 36, 2400421.

[6] S. Yuan, L. Dai, Y. Sun, F. Auras, Y. Zhou, R. An, Y. Liu, C. Ding, C. Cassidy, X. Tang, S. Dong, H. Kang, K. Chen, X. Liu, Z. Ye, Y. Zhao, C. Adachi, L. Liao, N. Greenham, Y. Qi, S. Stranks, L. Cui, R. Friend. Efficient Blue Electroluminescence from Reduced-Dimensional Perovskites. Nat. Photon., 2024, 18, 425-431.

三、 经费预算计划 （往届项目资助总额为国家级重点支持 40000 元、国家级 20000 元、省级 6000 元，实际预算制作及可支出类型以后期财务处要求为准，校级项目经费由学院统筹支持。）

开支科目	预算经费（元）	主要用途	阶段下达经费计划（元）	
			前半阶段	后半阶段
预算经费总额	<input type="checkbox"/> 40000 元（国重） <input checked="" type="checkbox"/> 20000 元（国） <input type="checkbox"/> 6000 元（省）	用于支付项目研究过程中购买原料、委托测试、差旅等费用	10000	10000
1. 业务费	7000		3500	3500
（1）计算、分析、测试费	2000	用于支付材料表面电子能级的 UPS 测试费用；	1000	1000

开支科目	预算经费（元）	主要用途	阶段下达经费计划（元）	
			前半阶段	后半阶段
		用于支付材料理论模拟的计算费用		
（2）能源动力费	0	无	0	0
（3）会议、差旅费	5000	用于支付项目负责人参加国内学术会议的费用	2500	2500
（4）文献检索费	0	无	0	0
（5）论文出版费	0	无	0	0
2. 仪器设备购置费	0	无	0	0
3. 实验装置试制费	0	无	0	0
4. 材料费	13000	用于支付实验过程中购买 PbI ₂ 、PbCl ₂ 、PbSCN ₂ 、SnI ₂ 、FAI、CsI、MAI 等钙钛矿原料的费用	6500	6500
学校批准经费	不填			

四、导师推荐意见

导师（签章）：		
年	月	日

五、院系推荐意见

院系负责人签名：		学院盖章：
年	月	日

六、学校推荐意见

学校负责人签名：		学校盖章：
年	月	日

苏州大学大学生创新训练计划项目申报

诚信声明

本人保证填报内容的真实性。所提交的用以申请大学生创新训练计划项目的全部材料(包括但不限于学科竞赛获奖、学术论文、科研项目成果、专利创造成果、文学艺术类成果以及创业实践类成果等)均为本人在校期间原创取得,不存在任何侵权、造假等违规行为,项目成员满足《关于做好2025年大学生创新训练计划立项工作的通知》规定的申报条件。

本人保证填报内容的有效性。如果获得立项,我与本项目组成员将严格遵守学校的有关规定,按照申报要求和申报计划,真实完成项目研究,按时报送有关材料。

本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。本人所提交的内容如涉嫌违规违法,本人愿意承担相应后果。

申请人签名: 贺加贝 陆星冉 周新峰 朱经赞 刘志刚 伟
指导(证明)老师签名: 周东莹

2025年 4 月 18 日