

# 华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室

## 工作简报

2025 年第 8 期

(总第 96 期)

华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室编

2025 年 10 月 15 日

---

### 新闻动态

- 努力学习 快乐生活 院士第一课开启全重科研之路 ..... 1
- 南昌大学党委书记罗嗣海一行来实验室参观调研 ..... 3

### 研究进展

#### 发光理论与机制

- 王志明研究员团队:  $sp^3$  碳桥连的交叉长短轴分子设计构建高效率低滚降的深蓝光 OLED 材料.. 5
- 苏仕健教授团队: 高效准纳米晶绿光钙钛矿发光二极管中自由激子与自陷激子的热力学平衡 . 8
- 赵祖金教授团队: 对称性破缺实现高效反向系间窜越..... 11

#### 新型显示、探测与成像

- 夏志国教授团队: 双蓝宝石夹层荧光玻璃复合薄膜的设计制备及其在激光投影显示中的应用 16

#### 有机光伏材料与器件

- 陈军武教授团队: 添加剂工程提升介电常数实现厚膜二元有机太阳能电池 19.23% 认证效率.. 20
- 段春晖教授团队: 通过调控结晶和成膜动力学实现低成本、高性能有机太阳能电池 ..... 22
- 黄飞教授团队: 用于无挥发性甲胺基钙钛矿太阳能电池的反溶剂工程, 其效率超过 26%..... 24
- 陈军武教授团队: 硅氧烷卤代噻吩添加剂构筑纤维状活性层实现有机太阳能电池空气加工高性能 26

## 前沿交叉

李远研究员团队：稳定的A-D-A型芳香化硝酸自由基实现高效近红外二区光热转换..... 28

## 仪器设备

三维互相关光散射仪..... 32

境内外学术交流来访 ..... 35

## 新闻动态

### 努力学习 快乐生活 院士第一课开启全重科研之路

——实验室举办 2025 级研究生新生培训会

“做什么样的科研？做怎样的研究生？怎么做到不可替代？”9月17日下午，发光材料与器件全国重点实验室在 N308A 报告厅举办 2025 级研究生新生培训会，中国科学院院士、实验室主任马於光以科研新征程上的“三问”开启了实验室新生培训的“院士第一课”，向即将进入实验室学习的 230 余名硕士、博士新生送上了修身治学的人生箴言。



马於光院士作讲座

讲座中，马院士以三个问题为切入点，引导同学们树立正确科研认知、明确科研定位，强调学术为先，追求真理。他希望同学们要锤炼“平静的心态、潜心钻研的能力；锲而不舍的

精神，勇于面对失败；解决重大难题的能力”。最后，马院士寄语新生“努力学习、增强能力、乐观心态、快乐生活”，既鼓励同学们立志深耕学术，也提醒大家要保持积极心态、平衡生活与科研。

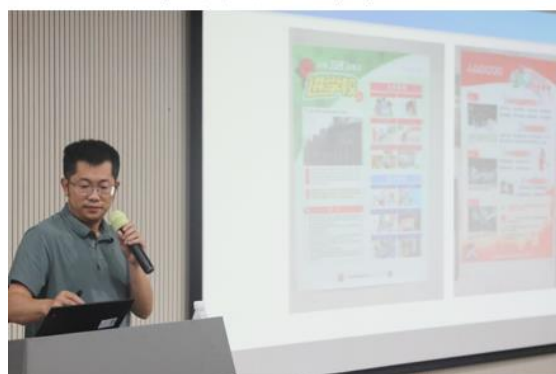
同时，为了进一步加强新生的安全意识、尽快融入实验室的学习和工作，新生培训会还安排实验室副主任秦安军教授、化学平台张杰工程师、物理平台王剑斌工程师分别讲解“实验室安全概述”“化学实验室安全基础知识”“超净室及物理公共测试平台培训”，既帮助新生快速掌握实验室平台使用规范，也为其筑牢实验室安全防线。实验室专职副主任周玉主持培训会。



秦安军副主任作讲座



周玉副主任主持



张杰工程师作讲座



王剑斌工程师作讲座

讲座结束后，全体新生前往实验室大楼前空地，开展消防疏散及灭火演练。



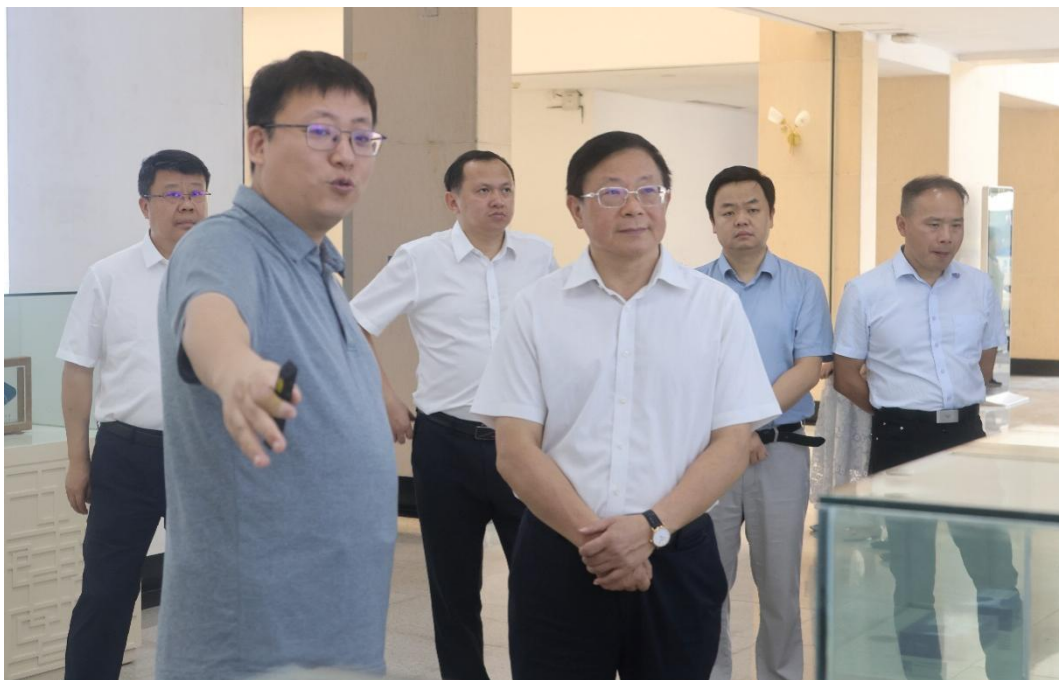
消防演练

## 南昌大学党委书记罗嗣海一行来实验室参观调研

9月22日，南昌大学党委书记罗嗣海一行来实验室参观调研，华南理工大学副校长林艺文陪同调研。

实验室常务副主任黄飞对罗嗣海一行的到来表示热烈欢迎，并就实验室的发展历程、组织架构、人才培养以及核心研究方向等内容进行详细介绍，同时阐述了近年来实验室在承担国家重大科技任务中所做出的努力与取得的进展。

调研组参观了实验室的成果展示厅。黄飞为罗嗣海一行介绍了聚集诱导发光的指纹快速显现试剂、毒品检测试剂盒、高性能单频光纤激光、热激子蓝光材料和柔性 OLED 显示等成果的研究背景及应用，让调研组对实验室的科技成果转化情况有了更直观的了解。



### 黄飞副主任介绍实验室情况

随后，调研组前往实验室超净室、超快、核磁、小角等公共平台参观，了解部分大型仪器设备的运行状况、管理模式。

调研组对实验室在基础研究及应用基础研究上取得的原创性成果给予了高度评价。

## 研究进展

### 发光理论与机制

#### 王志明研究员团队： $sp^3$ 碳桥连的交叉长短轴分子设计构建高效率低滚降的深蓝光 OLED 材料

OLED 凭借其自发光与柔性特性，已成为显示领域的领先技术。然而，对实现广色域和低功耗显示至关重要的深蓝色发光材料，其发展明显滞后于红色和绿色材料。具有 HLCT 态的热激子材料提供了一种极具潜力的解决方案。尽管该研究已取得广泛进展，目前仍缺乏系统性的分子设计策略，以有效整合关键构建单元，推动该领域的深入发展。

近日，华南理工大学王志明研究员团队利用课题组之前提出的交叉长短轴分子设计策略，引入一个  $sp^3$  杂化碳桥，巧妙地构建了更加正交的给体—受体结构，从而形成独特的 HLCT 态，并成功合成出两个热激子深蓝光有机发光分子 SIA-2TPA 和 SPPA-2TPA，基于该两分子的 OLED 表现出高效率、低效率滚降的优异性能。

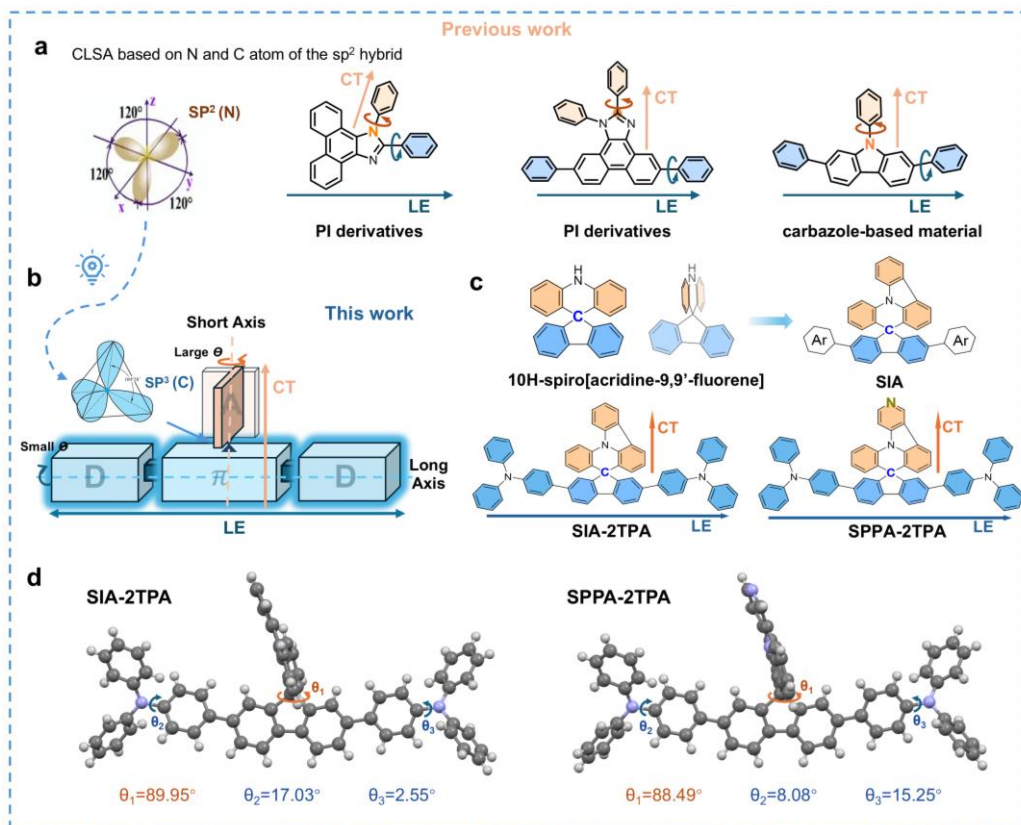
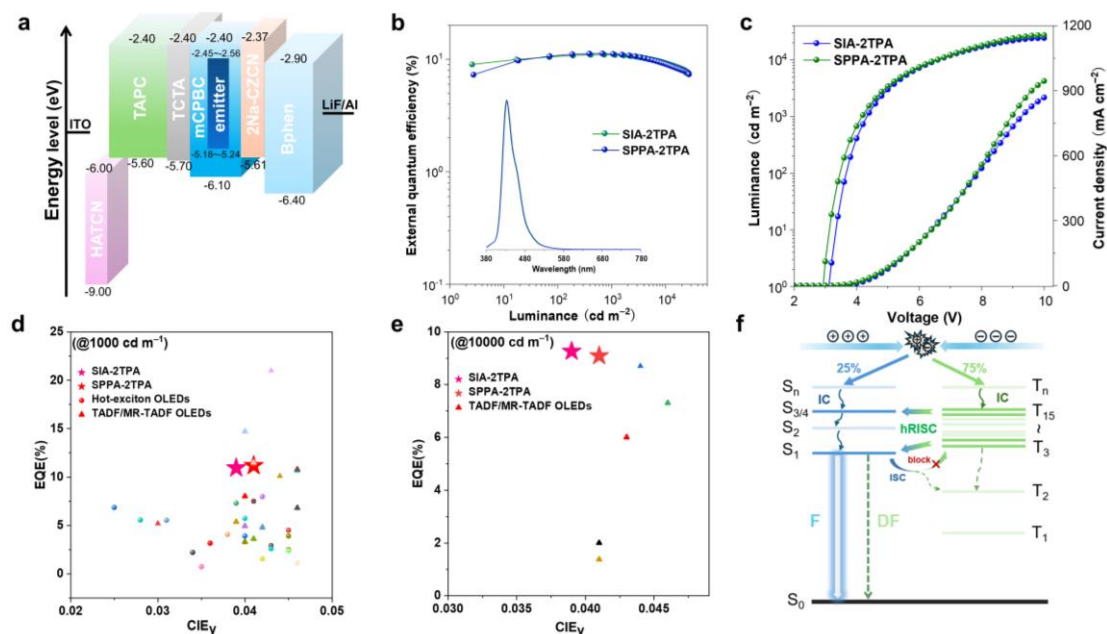


图 1. CLSA 设计策略和 SIA-2TPA、SPPA-2TPA 的材料设计

两个分子在溶液态具有高达 84% 以上的光致发光量子产率，并表现出典型的 HLCT 特征。以此制备的 OLED 器件实现了突破性的电致发光性能，器件的最大外量子效率分别达到了 11.0% 和 11.3%，且 CIE<sub>y</sub> 分别为 (0.155, 0.039) 与 (0.155, 0.041)。此外，它们表现出的极低效率滚降，1,000 cd/m<sup>2</sup> 下效率几乎没有降低，而且在高达 10,000 cd/m<sup>2</sup> 的超高亮度下，效率仍能分别保持在 9.3% 和 9.1%，创造了在 B. T 2020 蓝光色域标准以下 (CIE<sub>y</sub> ≤ 0.046) 深蓝 OLED 的性能纪录。

为了揭示高性能背后的物理机制，作者通过理论计算进行了深入分析。发现  $sp^3$  碳桥诱导的独特电子结构，使得分子内存在双通道的“热激子”通道。这种快速的激子动力学过程显著减少了在最低三重态上激子的积累，从根本上抑制了导致效率滚降的

激子淬灭效应。



### SIA-2TPA 和 SPPA-2TPA 的器件性能

综上所述,该工作不仅验证了利用  $sp^3$ 碳桥构建 CLSA 结构热激子发光材料的可行性,也为开发面向未来全彩显示和照明应用的高效率、高稳定性、高色纯度深蓝光 OLED 提供了一条全新的、极具前景的技术路线。

该研究成果近日在线发表在 *Advance Functional Materials* 上,题目为 “Efficient and Stable Deep-Blue OLEDs Employing Hot-Exciton Emitters with Rapid Exciton Dynamics: Achieving High EQEs Over 9% at 10,000 cd m<sup>-2</sup> with CIE<sub>y</sub> < 0.046”。博士研究生何俊伟和娄敬丽为论文的共同第一作者,王志明研究员和香港科技大学博士后张翰为论文的共同通讯作者。该研究工作得到了国家自然科学基金、发光材料与器件国家重点实验室自主研究项目等科研项目的资助。

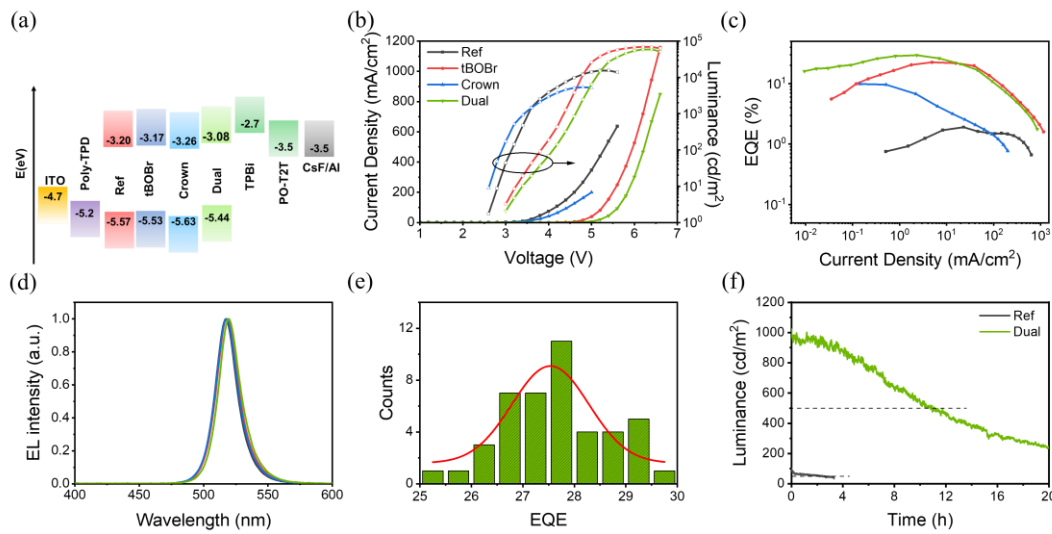
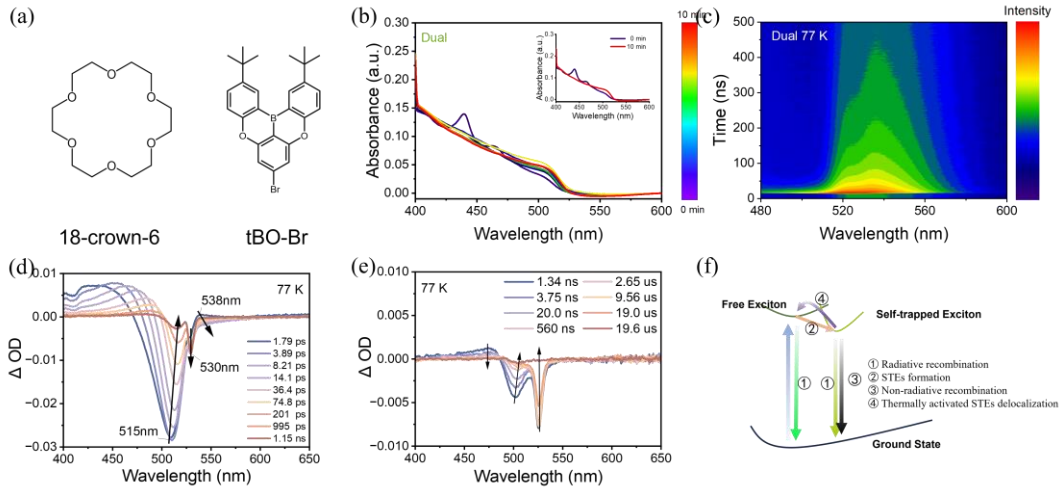
## 苏仕健教授团队：高效准纳米晶绿光钙钛矿发光二极管中自由激子与自陷激子的热力学平衡

为了继续提升 PeLED 的发光效率，一个关键在于获得高质量的钙钛矿晶体。钙钛矿薄膜的结晶过程主要包括成核和晶粒生长两个阶段，并且成核速率和晶粒生长速率对薄膜形貌和晶界缺陷有决定性影响。然而，在传统工艺中很难同时兼顾快速成核和缓慢生长。并随着钙钛矿 LED 发光效率的不断提升，器件稳定性的要求也越来越高，这要求我们深入探索钙钛矿发光机制，从载流子动力学出发，结合材料特性，开发高效、稳定的钙钛矿 LED。

近日，华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室的苏仕健教授课题组利用低温瞬态光谱，观察到准纳米晶钙钛矿在低温下的双峰发射行为，建立了自由激子与自陷态激子的热动力学平衡机制，并通过双添加剂的引入抑制自陷态激子的形成，提升钙钛矿 LED 发光效率，有望拓展钙钛矿发光机制的探索与应用。

为了更好地抑制非辐射复合、提升钙钛矿发光效率，我们期望在制备钙钛矿薄膜时形成快速成核-慢速晶粒生长的结晶调控，以模仿单晶生长条件，最大程度上抑制缺陷的形成。为此，我们首先需要使用反溶剂策略以实现快速成核，产生大量均匀分布的晶核；其次，需要在钙钛矿前驱液和反溶剂中选择合适的钝化剂，利用前驱液中钝化剂与溶剂的相互作用、反溶剂中钝化剂对薄膜的覆盖，以实现溶剂的缓慢蒸发与慢速晶粒生长，从而继续提升钙钛矿薄膜的发光效率和高稳定性，并获得高效、稳定的绿光 PeLED。技术路线方面，选取 Cs/FA 混合 A 位阳离子的准二维体

系钙钛矿作为发光层，通过引入 18-crown-6 和 tBO-Br 两种添加剂协同钝化薄膜缺陷、调控结晶动力学。结果来看，双添加剂策略一方面抑制前驱体溶液中准二维相的过度生长，促进形成三维纳米晶相；另一方面减缓晶粒生长速率，实现了快速成核和受控生长的平衡，从而获得高结晶度且呈各向同性取向的准纳米晶钙钛矿薄膜。通过这种方法，制备的发光薄膜缺陷态密度大幅降低，在室温下获得了高达 93.5% 的 PLQY。本工作还将利用温度依赖稳态与瞬态光谱相结合，对经过添加剂处理的准纳米晶薄膜的发光动力学进行深入表征。实验结果观察到在低温下薄膜发光出现双峰结构：主峰位于 520 nm，肩峰位于 535 nm。此外，超快光谱结果表明从主峰到肩峰的能量传递过程，且存在长寿命成分。结合 TRPL 衰减行为，我们将主峰与肩峰分别归因为 FEs 与 STEs 发射，并构建了 FEs-STE 的热力学平衡模型。这种机制重新定义了自陷激子并非简单的消耗态，其在低温下也能够通过热激活重新返回 FEs 态参与辐射复合，从而形成了激子的循环利用。借助双重钝化策略，所制备的准纳米晶发射体中 STEs 的形成被有效抑制，从而实现了激子向 FEs 的高效反向转化，最终实现了优异的电致发光绿光钙钛矿器件，其最大峰值 EQE 达到 29.5%，最大亮度达 59232 cd/m<sup>2</sup>，在初始亮度 1000 cd/m<sup>2</sup> 下的半衰寿命达到 10.8 小时，最终构建材料体系设计—光物理行为—器件性能之间的构效关系。



相关研究成果以 “*Thermodynamic Equilibrium between Free Excitons and Self-Trapped Excitons in Efficient Quasi-Nanocrystalline Green Perovskite Light-Emitting Diodes*” 为题发表在 *Laser & Photonics Reviews* 上，其中通讯作者为苏仕健教授，第一作者为孙冠伟博士生。该研究工作得到了国家重点研发计划、国家自然科学基金以及中国博士后创新人才支持计划等科研项目的资助。

## 赵祖金教授团队：对称性破缺实现高效反向系间窜越

纯有机热活化延迟荧光 (TADF) 材料因其能完全利用电生三重态和单重态激子, 已经成为潜在的下一代有机发光二极管 (OLED) 领域的核心发光材料。快速的反向系间窜越 (RISC) 过程对实现高效 TADF 材料至关重要, 它能有效减少三重态-三重态或三重态-极化子湮灭, 从而提升器件电致发光 (EL) 效率和器件稳定性。然而, 迄今为止, 仍然只有少数的 TADF 材料能够实现超过  $1 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$  的反向系间窜越速率 ( $k_{\text{RISC}}$ ) 速率, 对于推动 TADF 材料的商业化仍然是个巨大的阻碍。

近日, 华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室的赵祖金教授报导了一类具有对称性破缺特性的 TADF 分子  $4t\text{CzCN-pXT}$  和  $4t\text{CzCN-pTXT}$ , 实现高达  $1.24 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$  的  $k_{\text{RISC}}$  (图 1a)。该材料在制备敏化型窄谱带 OLED 器件中实现了超过 40% 的外量子效率 (EQE), 并且在 1000 cd/m<sup>2</sup> 的初始亮度下实现了 24974 h 的 LT90 寿命, 为高性能纯有机 OLED 器件提供了新思路。

快速的反向系间窜越 (RISC) 过程对实现高效 TADF 材料至关重要, 它能有效减少三重态-三重态或三重态-极化子湮灭, 从而提升器件电致发光 (EL) 效率和器件稳定性。时至今日, 尽管通过协同效应精心设计的 TADF 分子能够实现较高的  $k_{\text{RISC}}$  和较好的 OLED 器件效率, 大部分 TADF 材料仍无法实现超过  $1 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$  的  $k_{\text{RISC}}$ , 对于 TADF 的发展产生了巨大的阻碍。

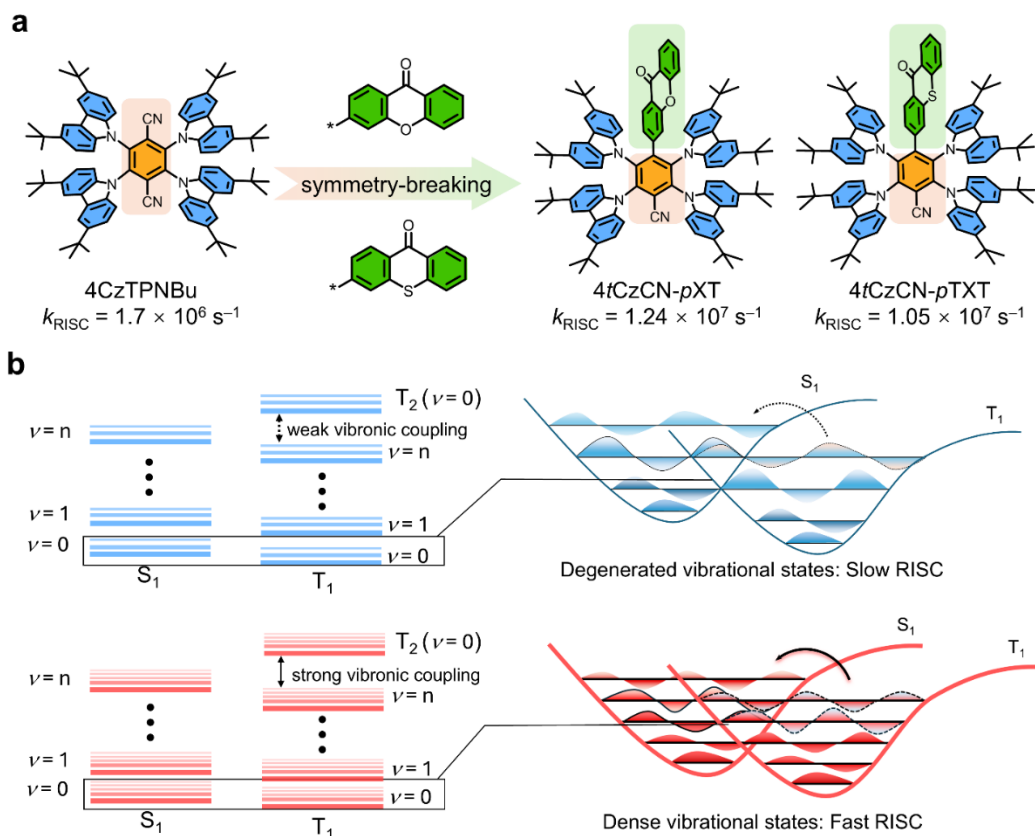


图 1. a) 对照分子 4CzTPNBu 和目标分子 4tCzCN-pXT 和 4tCzCN-pTXT 的分子结构。b) 对称性破缺对激子跃迁行为的影响。当分子具有不对称的核心骨架时，增加的振动态密度能够有效提升  $T_1$  态至  $S_1$  态的激子跃迁，同时能够增加  $T_1$  和  $T_2$  之间的电子振动耦合，提升与  $S_1$  态之间的 SOC 强度。

本工作从费米黄金法则出发，通过设计不对称的分子骨架，制造分子内的不对称振动。通过对比目标分子 4tCzCN-pXT、4tCzCN-pTXT 和参照分子 4CzTPNBu 可以发现，不对称电子受体 XT 和 TXT 能够有效提升分子的振动态密度，从而促进  $T_1$  至  $S_1$  的 RISC 过程。此外，通过进一步的研究发现，振动态密度能够有效打开  $T_1$  和  $T_2$  之间的电子振动耦合，增大单重态和三重态之间的自旋轨道耦合 (SOC) 强度 (图 1b)。

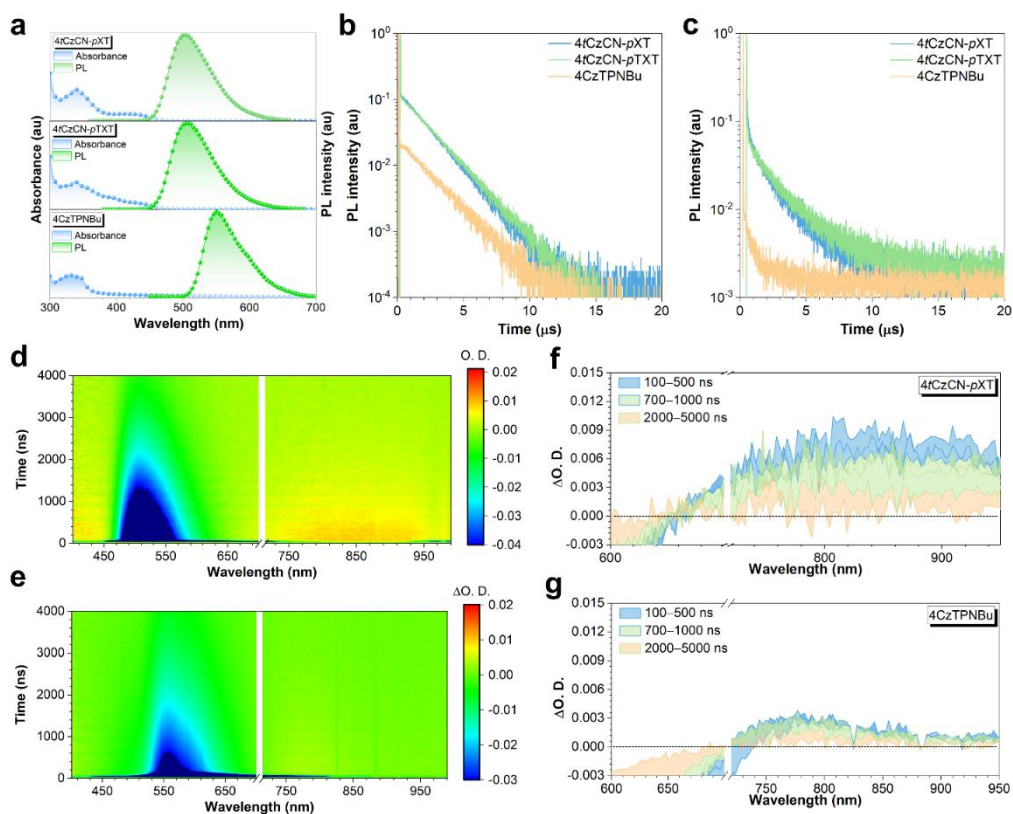


图 2. a) 4 *t*CzCN-*p*XT, 4 *t*CzCN-*p*TXT 和 4CzTPNBu 的 a) 紫外-可见吸收光谱; b) 甲苯溶液中的 PL 光谱以及 c) 掺杂薄膜中的 PL 光谱。d) 4 *t*CzCN-*p*XT 和 e) 4CzTPNBu 的瞬态吸收光谱全谱。f) 4 *t*CzCN-*p*XT 和 g) 4CzTPNBu 在纳秒尺度下的瞬态吸收曲线。

通过光物理的表征可以观察到，目标分子 4 *t*CzCN-*p*XT 和 4 *t*CzCN-*p*TXT 具有良好的绿光发射，在甲苯溶液中分别拥有  $1.24 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$  和  $1.05 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$  的  $k_{\text{RISC}}$  (图 2a-c)，相比于对照分子 4CzTPNBu ( $1.7 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ) 提升了一个数量级。同时在瞬态吸收光谱中也可以观察到，4 *t*CzCN-*p*XT 和 4 *t*CzCN-*p*TXT 具有更强的三线态激子吸收信号强度，同时其随着时间的变化相对强度下降得更快，证明了目标分子具有更快的 ISC 和 RISC 过程 (图 2d-g)。

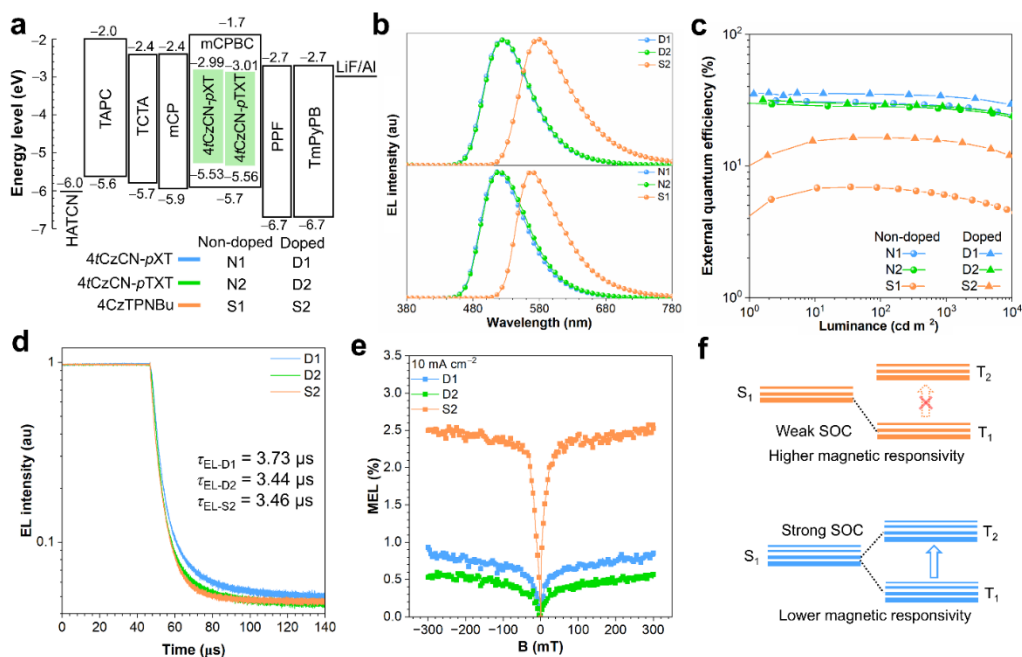


图 3. a) OLED 器件结构以及各个器件编号对应的发光层的结构。OLED 器件的 b) EL 光谱及 c) EQE-Luminance 曲线。器件 D1, D2 和 S2 的 d) 瞬态 EL 衰减曲线和 e) 磁场电致发光曲线。f) 磁场电致发光的工作机制。

在 OLED 应用中,  $4t\text{CzCN-pXT}$  和  $4t\text{CzCN-pTXT}$  在掺杂器件中分别实现了 35.8% 和 31.8% 的外量子效率 (EQE), 并且在非掺杂器件中实现了 31.2% 和 30.2% 的 EQE, 为基于 TADF 的最优异的非掺杂 OLED 器件 (图 3a-c)。基于这两个分子制备的 OLED 器件具有较高的效率稳定性, 在  $10000 \text{ cd m}^{-2}$  的亮度下仍能保持接近 30% 的 EQE。并且结合瞬态电致发光衰减曲线和效率滚降情况可以算出, 在电致发光中  $4t\text{CzCN-pXT}$  和  $4t\text{CzCN-pTXT}$  相比于  $4\text{CzTPNBu}$  也具有更高的  $k_{\text{RISC}}$  (图 3d)。并且进一步地, 通过磁致电致发光曲线的研究可以发现,  $4t\text{CzCN-pXT}$  和  $4t\text{CzCN-pTXT}$  对磁场的感应更为惰性, 充分说明了两个目标分子具有更强的分子内 SOC 强度 (图 3e, f)。

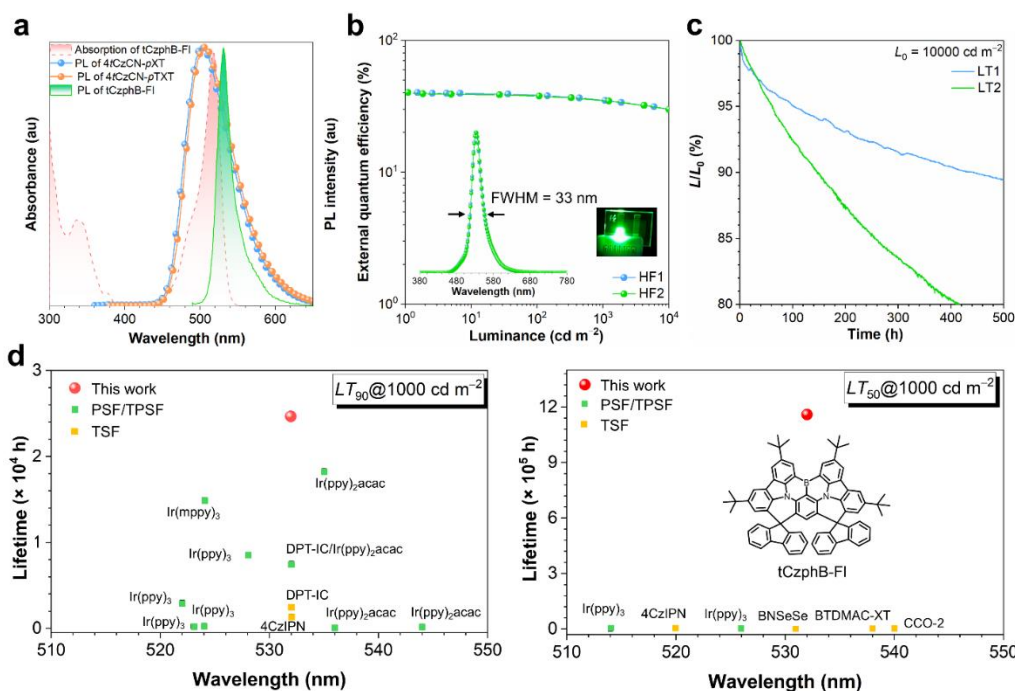


图 4. a) MR-TADF 分子 tCzphB-FI 的吸收光谱和 4 tCzCN-pXT 及 4 tCzCN-pTXT 的发射光谱。b) 器件 HF1 和 HF2 的 EQE-Luminance 曲线。c) 器件 LT1 和 LT2 在 10000 cd m<sup>-2</sup> 初始亮度下的寿命衰减曲线。d) 器件 LT1 和具有代表性的窄谱带 OLED 器件的寿命对比。

此外，为了探究两个目标分子用于敏化窄谱带材料中的应用，选用了经典多重共振 TADF 分子 tCzphB-FI 作为发光客体，进行了超荧光(HF)OLED 器件的制备。利用 4 tCzCN-pXT 和 4 tCzCN-pTXT 作为敏化材料制备的 HF-OLED 器件 HF1 和 HF2 都实现了 40.2% 的 EQE，在 10000 cd m<sup>-2</sup> 的亮度下依然具有 30% 的 EQE。在器件稳定性的研究中，利用 4 tCzCN-pXT 作为敏化材料制备的 HF-OLED 器件在 1000 cd m<sup>-2</sup> 的初始亮度下能够实现 24974 h 的 LT<sub>90</sub> 寿命，为目前文献报导的 TADF 材料中的最佳水平。

相关研究成果以 “Symmetry Breaking Assisted Fast

*Reverse Intersystem Crossing for Efficient TADF Materials*”为题发表在 *Angewandte Chemie International Edition* 上，其中通讯作者为赵祖金教授和唐本忠教授，第一作者为刘昊博士。该研究工作得到了国家自然科学基金，广东省基础与应用基础研究基金和创新科技署的支持。

## 新型显示、探测与成像

### 夏志国教授团队：双蓝宝石夹层荧光玻璃复合薄膜的设计制备及其在激光投影显示中的应用

激光投影显示技术 (LPDT) 作为下一代显示系统，因超广色域与高稳定性成为核心方向，荧光转换激光二极管 (pc-LD) 技术是其主流工业路径。但当前 LPDT 面临三大瓶颈：商用荧光材料发射半峰宽超 60 nm，色纯度不足；高功率激光激发易致热积累，引发荧光材料猝灭与封装失效；静态散热无法将温度控制在 200 °C 以下。此外，窄带发射荧光粉 ( $\beta$ -SiAlON:Eu、KSF:Mn) 集成时，易出现晶粒异常生长、相分解等问题，传统单蓝宝石 PiGF 在高功率下存在热瓶颈。

夏志国教授课题组提出双蓝宝石夹层 PiGF 设计，通过 450 °C、60 s 快速热压烧结制备  $\beta$ -SiAlON:Eu/KSF:Mn 基荧光玻璃复合膜。该结构构建双向传热通道，结合荧光轮旋转动态散热，在  $14 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$  激光下温度稳定于 60 °C；绿光 PiGF 内量子效率 96.1%、最大光通量 3765 lm，红光 PiGF 内量子效率 94.4%、最大光通量 1365 lm，性能优于现有材料；按 2:6 比例

集成荧光轮，450 nm 激光激发下产生白光，色域覆盖 125% Rec. 709 标准，为高亮度 LPDT 提供解决方案。

本研究选用低玻璃转变温度的玻璃基质，将荧光粉与玻璃粉末制成浆料，涂覆于蓝宝石基底并覆盖另一蓝宝石，经快速热压烧结形成“Sapphire@PiGF@Sapphire”结构。

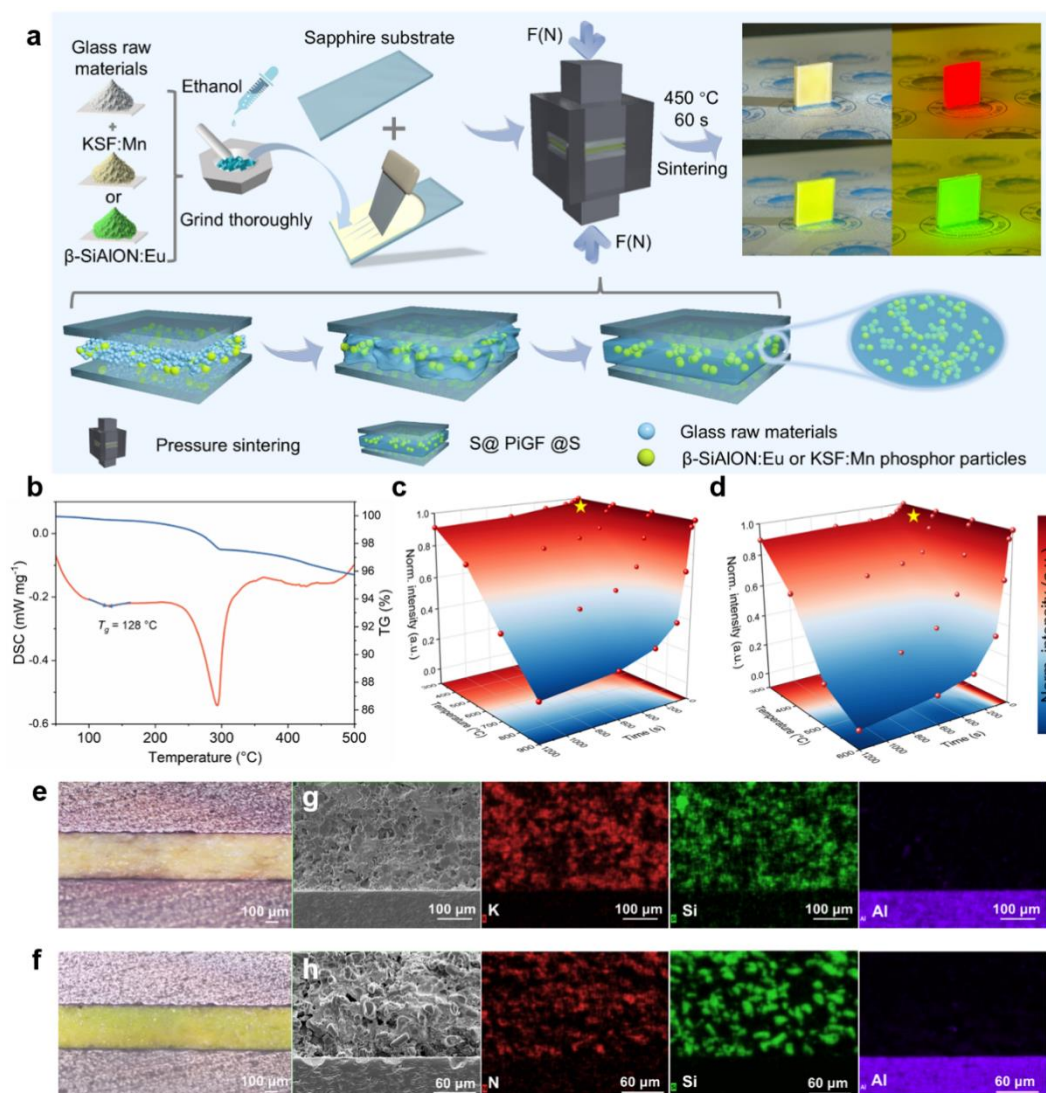


图 1. PiGF 的制备过程和工艺

该工艺抑制荧光体与玻璃间的化学侵蚀作用，保障晶体完整性。XRD 与 PL 测试表明，PiGF 保留磷光体特征晶相， $\beta$ -SiAlON:Eu-PiGF 在 540 nm (FWHM $\approx$ 55 nm)、KSF:Mn-PiGF 在

631 nm (FWHM<10 nm) 发光, 适配蓝光 LD。

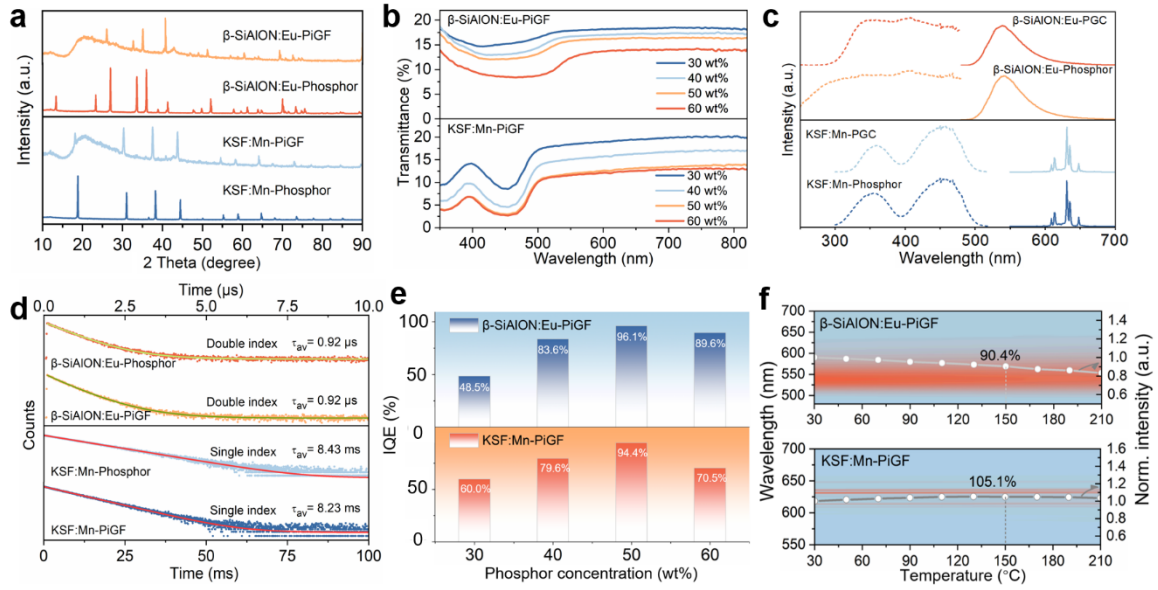


图 2. PiGF 的发光性能

热管理实验显示, 双夹层 + 旋转构型散热效率显著优于单基底与静态构型。

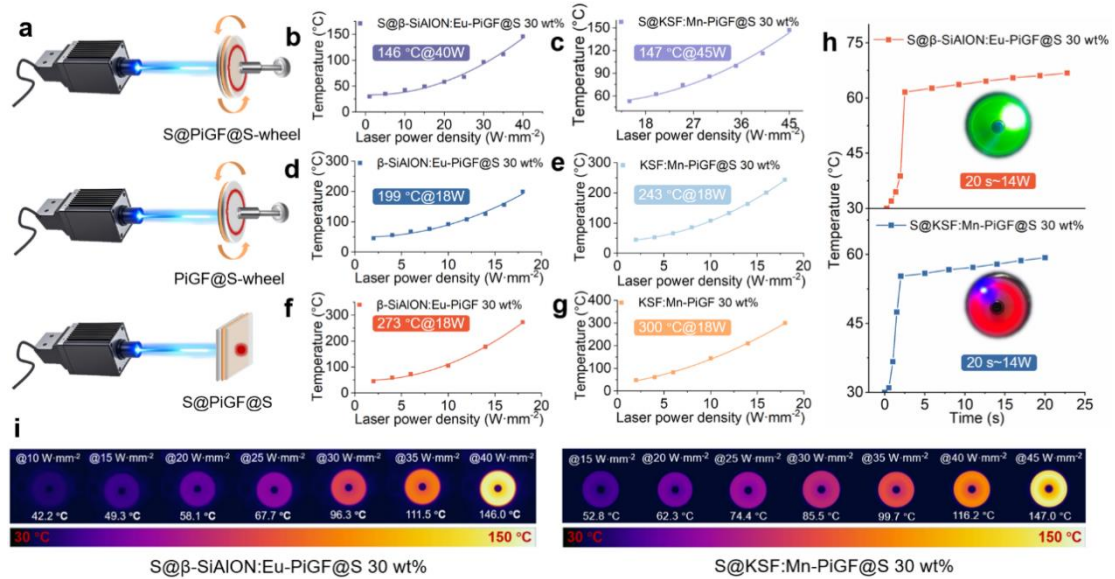


图 3. PiGF 的热管理实验

激光测试验证其高光学性能, 集成磷光轮实现宽色域白光, 满足激光投影显示需求。

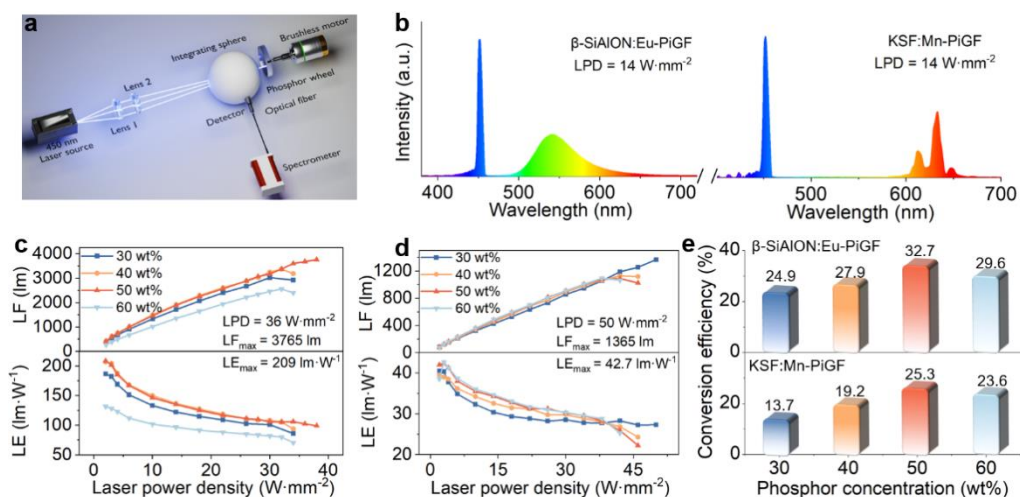


图 4. PiGF 的激光性能测试

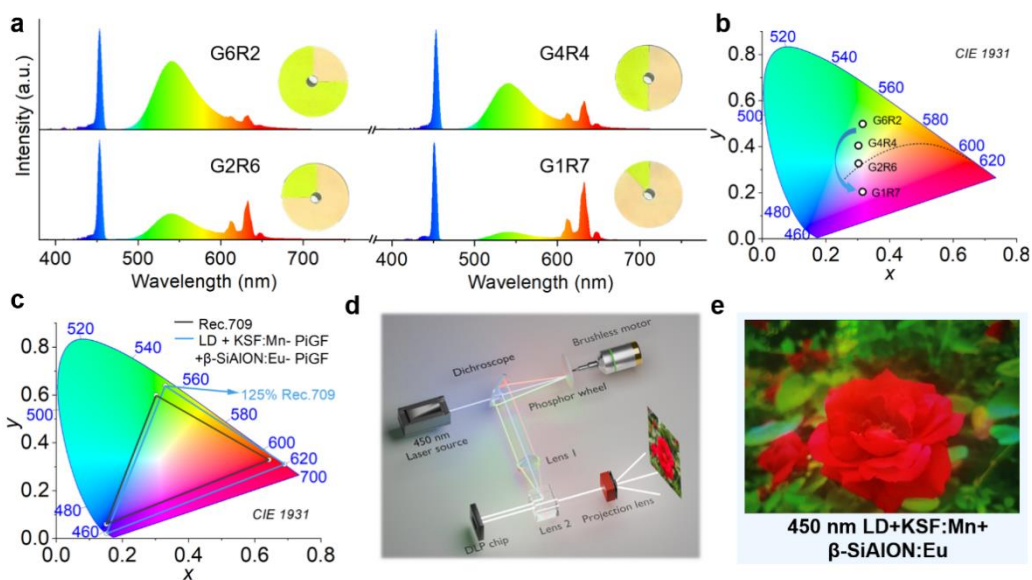


图 5. PiGF 的激光投影显示

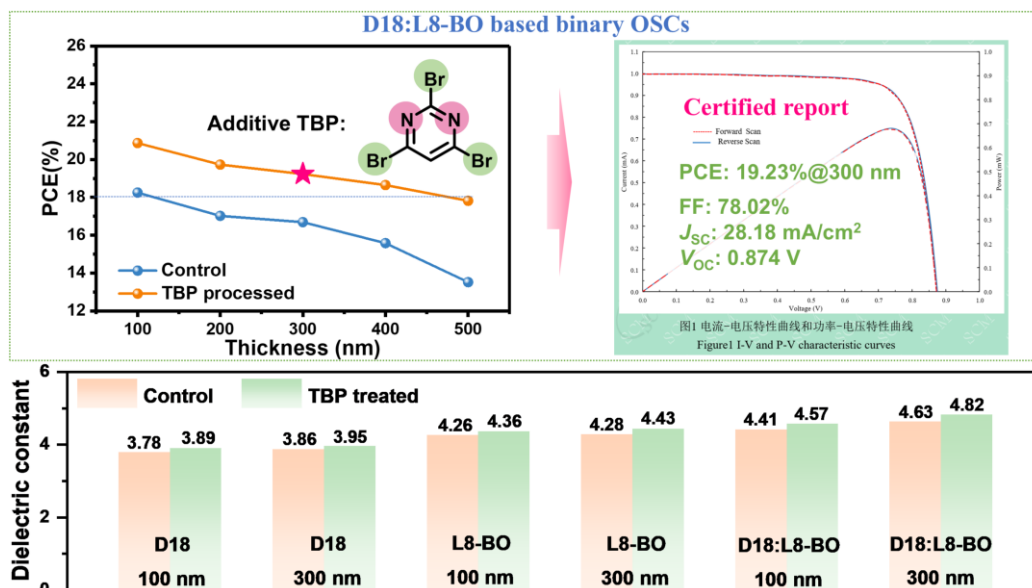
相关研究成果以 “*Integrating High Efficiency and Thermal Reliability Photoluminescence in Double-Sapphire-Sandwiched Phosphor-in-Glass Film for Laser Projection Displays*” 为题发表在 *Advanced Functional Materials* 上，其中通讯作者为夏志国教授。第一作者为邝宇航硕士生、孙永胜博士生、陈炜彬博士后（共同第一）。该研究工作得到以下项目资助：国家自然科学基金 (Grant No. 52425206)；中央高校基本科研业务费 (No. 2024ZYGXZR004)

## 有机光伏材料与器件

### 陈军武教授团队：添加剂工程提升介电常数实现厚膜二元有机太阳能电池 19.23%认证效率

目前有机太阳能电池（OSCs）的效率已经超过了 20%，但器件的活性层厚度通常控制在 100 nm 左右。活性层厚度的增加往往导致效率的显著降低，这主要由于加剧了活性层内部的电荷复合与空间电荷积累。然而，面向产业化大面积印刷工艺（如卷对卷加工）要求活性层应具备良好的厚膜容忍性。因此，提升 OSCs 对活性层厚度变化的容忍性，已成为推动其商业化应用的关键挑战。

近日，华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室的陈军武教授课题组利用一种挥发性固体添加剂 2,4,6-三溴嘧啶(TBP) 可普遍提升有机半导体材料的介电常数 ( $\epsilon_r$ )，在 300 nm 膜厚的 D18:L8-B0 二元 OSCs 中实现了 19.23%的认证效率。该介电常数工程策略为制备高效厚膜 OSCs 提供了可行路径，并为推动其大规模应用奠定了基础。



多项研究指出，相对介电常数 ( $\epsilon_r$ ) 较高的非富勒烯受体对制备高效厚膜的 OSCs 有益。然而，介电常数对厚膜 OSCs 的作用机制尚未完全阐明。本研究引入挥发性固体添加剂 2,4,6-三溴嘧啶 (TBP)，可普遍提升有机半导体材料的介电常数。TBP 和活性层材料之间具有较强的结合能，经 TBP 处理的薄膜展现了更紧密的分子堆积、更长的激子扩散长度，以及更良好的垂直相分离形貌。基于此，电学与形态学的改进共同提升了电荷提取效率并抑制了复合。经 TBP 处理的 300 nm 的器件实现了 19.23% 的认证效率，创下了 300 nm 厚度下 OSCs 的最高效率纪录。同时证明了在其他厚膜体系以及刮涂大面积工艺中的广泛适用性，其中刮涂 300 nm 膜厚二元 OSC 在 4cm<sup>2</sup> 器件面积下实现 18.31% 效率，刮涂 300 nm 膜厚 OSC 组件在 16.94cm<sup>2</sup> 组件面积下实现 17.35% 效率。这项工作表明，简单的添加剂工程提升有机半导体的介电常数，为实现具有膜厚容忍性的 OSCs 提供了一种新的解决方案，从而推动其大规模应用。

相关研究成果以 “Elevating Dielectric Constant via

*Additive Engineering: Achieving 19.23% Certified Efficiency in Thick-Film Binary Organic Solar Cells*”为题发表在 *Joule* 上,其中通讯作者为陈军武教授、张连杰副教授,第一作者为王新康博士生。该研究工作得到了国家自然科学基金项目、国家重点研发计划、广东省基础与应用基础研究重大项目等科研项目的资助。

## 段春晖教授团队：通过调控结晶和成膜动力学实现低成本、高性能有机太阳电池

近年来,有机太阳电池(OSC)以其质轻、柔性、半透明等优点引起了研究者的广泛关注。目前,有机太阳电池的光电转化效率(PCE)已经超过20%。发展低成本的高性能有机半导体材料,对有机太阳电池大规模生产具有重要意义

近日,华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室的段春晖教授课题组以低成本的并五环电子受体为研究对象,通过调控其结晶行为和成膜动力学,实现了超18%的光电转化效率以及0.363的破纪录品质因子。

本工作在课题组前期工作(*Energy Environ. Sci.* 2024, 17, 6627-6639)的基础上,保持了BTA-C4-C1(正丁基取代)的电子结构,调控了苯并三氮唑的N原子上的烷基侧链,设计合成了两例新型并五环电子受体BTA-C1-C1(甲基取代)和BTA-EH-C1(2-乙基己基取代)。单晶X射线衍射表明,BTA-C1-C1中甲基能够诱导形成二聚体,这种独特的二聚体会导致BTA-C1-C1过快的强聚集,从而阻碍分子间有序堆积,形成二维砖块堆积。相

比之下，BTA-C4-Cl 和 BTA-EH-Cl 的单晶中，分子堆积更加有序并且实现了三维网络堆积。原位吸收光谱测试表明，基于 BTA-EH-Cl 的光活性层具有更可控的成膜动力学，在抑制给受体之间过度相分离的同时，薄膜中的纳米纤维结构更加精细。最终，基于 BTA-EH-Cl 的器件实现了 78.66% 的填充因子 (FF) 和 18.04% 的功率转换效率 (PCE)，这是目前基于并五环电子受体有机太阳能电池的最高效率。同时，得益于低合成复杂度，BTA-EH-Cl 实现了最高 0.363 的品质因子 (FOM)。这一结果大大缩小了低成本电子受体与目前高性能受体之间的性能差距，证明了简单结构电子受体在未来的有机太阳能电池商业化中的巨大潜力。

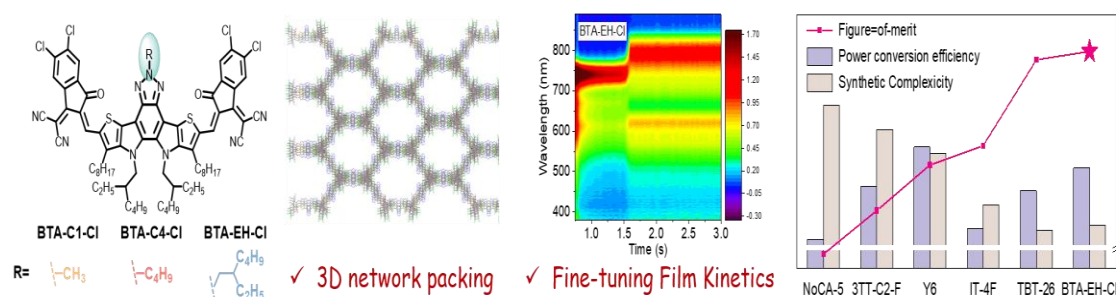


图 1. 具有三维网络堆积的低成本、高性能电子受体

相关研究成果以 “*Low-cost Fused-ring Electron Acceptors for Efficient Organic Solar Cells by Fine-tuning Molecular Crystallization and Film Formation Kinetics*” 为题发表在 *Angewandte Chemie International Edition* 上，其中通讯作者为张月博士和段春晖教授，第一作者为华南理工大学魏文魁博士和袁熙越博士。该研究工作得到了国家自然科学基金、广东省基础与应用基础研究基金、中央高校基本科研业务费、中国博士后科学基金等科研项目的资助。

## 黄飞教授团队：用于无挥发性甲胺基钙钛矿太阳能电池的反溶剂工程，其效率超过 26%

基于甲脒 (FA) 的钙钛矿 (如  $\text{FAPbI}_3$  与  $\text{Cs}_x\text{FA}_{1-x}\text{PbI}_3$ ) 因其合适的带隙与优异的热稳定性, 被认为是高效稳定钙钛矿太阳能电池的理想候选。然而, FA 与 Cs 基钙钛矿在结晶动力学上的差异导致薄膜缺陷、相不均匀及应变积累, 从而限制器件性能。为改善薄膜质量, MACl 等添加剂虽能促进结晶, 但其挥发性与不稳定性削弱了器件寿命。因此, 开发高质量的无 MA 钙钛矿薄膜并探索可控结晶策略, 对于实现高效率与长期稳定的钙钛矿太阳能电池具有重要意义。

近日, 华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室的黄飞教授课题组利用卟啉衍生物辅助的抗溶剂策略, 实现结晶过程调节与载流子利用率提升, 从而显著改善钙钛矿太阳能电池的效率与稳定性, 有望拓展卟啉分子工程在钙钛矿光伏领域的应用。

本研究创新性地提出了一种分子工程化抗溶剂策略。通过将间一四 (4-溴苯基) 卟啉 (Br-TPP) 作为功能性添加剂引入反溶剂, 实现了对无 MA 钙钛矿结晶动力学的精确调控。Br-TPP 分子独特的大  $\pi$ -共轭骨架与适度吸电子的溴取代基协同作用, 使其能够与钙钛矿前驱体中的  $\text{Pb}^{2+}$  离子及有机阳离子发生有效配位。在结晶初期, 这种相互作用诱导了高密度且分布均匀的成核, 并在晶体生长阶段抑制了非择优取向生长与缺陷形成。

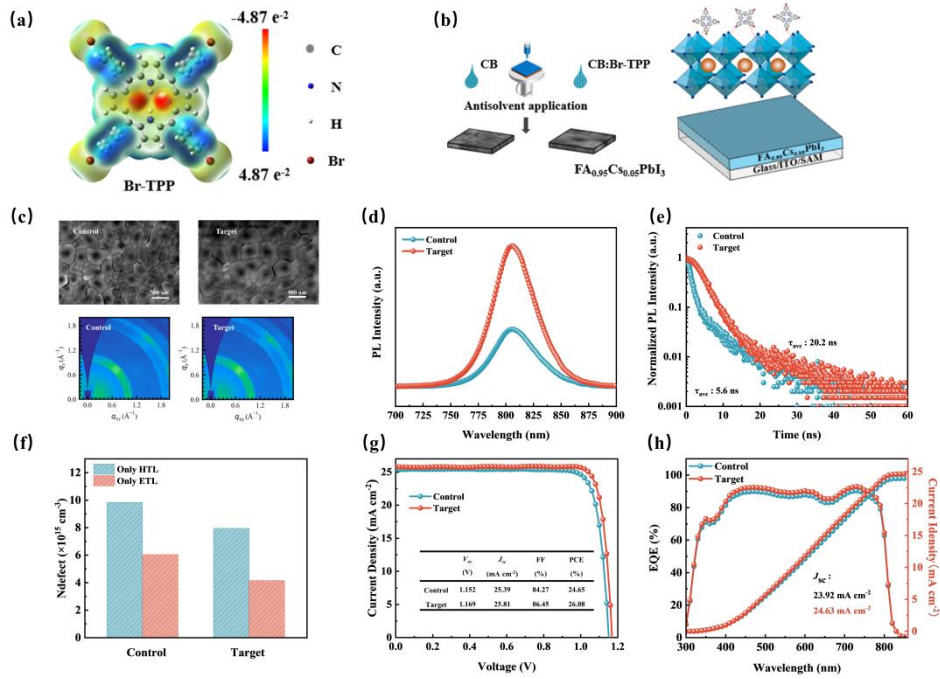


图 1. Br-TPP 的静电势分析，机理分析，薄膜性能和钙钛矿太阳能电池性能分析

深入表征表明，Br-TPP 的引入显著提升了薄膜结晶度与晶体取向，有效降低了 Urbach 能与陷阱态密度。时间分辨荧光光谱显示载流子寿命延长，非辐射复合显著抑制。同时，该策略优化了能级对齐并平衡了载流子迁移率，从而提升了电荷抽取效率。基于此策略制备的无 MA 倒置钙钛矿太阳能电池实现了 26.08% 的光电转换效率，且未封装器件在惰性气氛下储存 1000 小时后仍保持超过 90% 的初始效率，展现出卓越的运行稳定性。

本工作不仅为解决无 MA 钙钛矿结晶控制难题提供了简单而高效的方案，也凸显了卟啉分子工程在调控界面相互作用、钝化缺陷及控制晶体生长方面的潜力，为开发兼具高效率与高稳定性的钙钛矿光伏器件开辟了新途径。

相关研究成果以 “*Antisolvent Engineering for Volatile-Free Methylammonium Perovskite Solar Cells with*

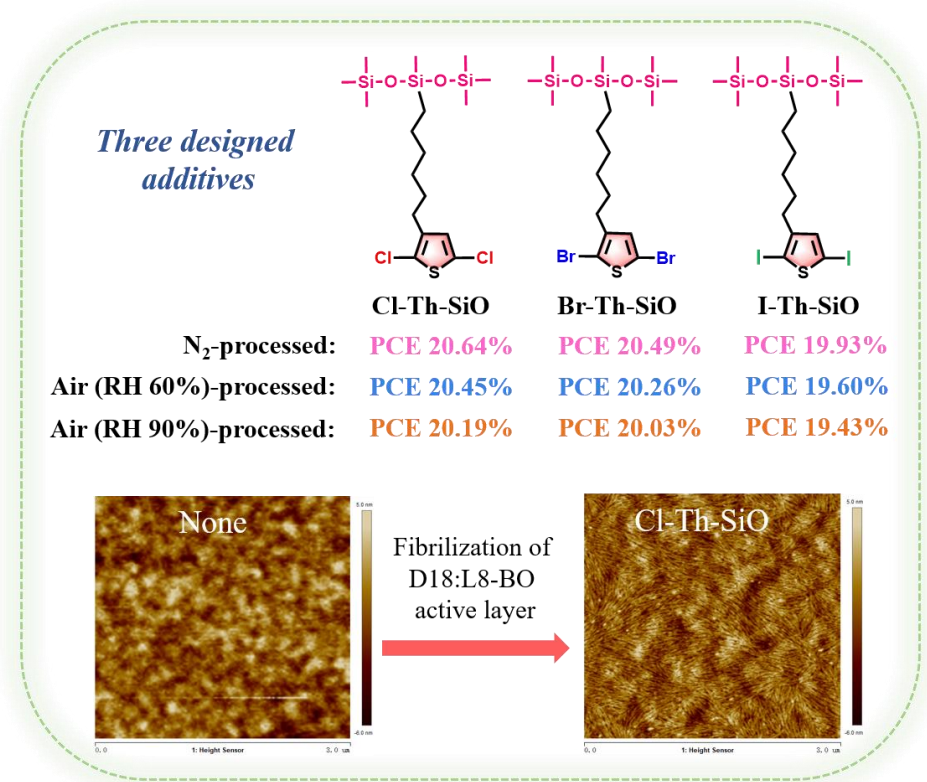
*Efficiencies Exceeding 26%*”为题发表在 *Chemical Engineering Journal* 上，其中通讯作者为张凯教授，第一作者为徐瑶博士生。该研究工作得到了国家自然科学基金（编号 52373180）和中央高校基本科研业务费（编号 2024ZYGXZR076）等科研项目的资助。

## 陈军武教授团队：硅氧烷卤代噻吩添加剂构筑纤维状活性层实现有机太阳能电池空气加工高性能

有机太阳能电池（OSCs）的功率转换效率（PCE）目前已突破 20%，显示出巨大的商业化潜力。然而，当前性能最优的器件通常需要在惰性气氛（如氮气手套箱）中制备，这导致实验室研究成果与空气环境下大规模生产之间存在显著差距。尤其是在空气环境中加工时，湿度控制是实现高性能面临的主要挑战之一。

近日，华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室陈军武教授团队设计合成了三种硅氧烷修饰的卤代噻吩添加剂（Cl-Th-SiO、Br-Th-SiO 和 I-Th-SiO）。在高性能 D18:L8-B0 体系中，该类添加剂可诱导活性层形成纤维状网络形貌，促进激子解离与电荷传输，并降低陷阱态密度，从而显著提升 OSCs 器件性能。其中，Cl-Th-SiO 因具有最大偶极矩，可与 D18 和 L8-B0 产生最强相互作用，使两者形成更紧密的  $\pi-\pi$  堆叠，表现出最优性能：其在水箱中制备的器件效率达 20.64%（认证效率 20.11%）；在 60%与 90%高湿空气中制备的器件仍分别保持 20.45%和 20.19%的高效率，是目前空气加工活性层的最高纪录。该研究为空气环境

下制备高性能 OSCs 提供了有效的添加剂设计策略。



本研究设计合成了三种硅氧烷链段修饰的卤代噻吩添加剂 (Cl-Th-SiO、Br-Th-SiO 与 I-Th-SiO)，可有效在空气环境中制备具有纤维状形貌与耐湿性的活性层。AFM 与 TEM 图像明确显示，经添加剂处理的 D18:L8-BO 共混膜形成纤维状网络结构，其器件表现出更高的激子解离效率、改善的电荷传输以及更低的陷阱态密度。光伏性能方面，无添加剂对照组在氮气中制备的器件效率为 18.59%，在 60%和 90%湿度空气中则分别降至 17.30%和 16.60%。而使用 Cl-Th-SiO、Br-Th-SiO 和 I-Th-SiO 在氮气中制备的器件效率分别提升至 20.64%、20.49%和 19.93%，其中 Cl-Th-SiO 器件获认证效率 20.11%。在空气加工中，在 RH 60%湿度下三者效率仍达 20.45%、20.26%和 19.60%，RH 90%高湿环境下也保持在

20.19%、20.03%和19.43%。该添加剂策略为空气环境制备高性能 OSCs 提供了有效途径。

相关研究成果以“*Siloxane-Tethered Halogenated Thiophene Additives Enable Excellent Fibrillar Morphology and Air Processing for High-Performing Polymer Solar Cells*”为题发表在 *Advanced Materials* 上，其中通讯作者为陈军武教授和张连杰副教授，第一作者为陈星博士生。该研究工作得到了国家自然科学基金（22179040），广东省基础与应用基础研究重大项目（2019B030302007）以及广东省基础与应用基础研究基金（2024A1515012693）等科研项目的资助。

## 前沿交叉

**李远研究员团队：稳定的 A-D-A 型芳香化硝酸自由基实现高效**

**近红外二区光热转换**

纯有机光热转换材料在可持续能源技术和先进生物医学治疗等领域存在潜在应用前景，推动了太阳能驱动的界面水蒸发、光热疗法和光热发电等领域的发展。相比高分子聚合物，有机小分子因其结构的确定性、更丰富的可调性、易重复的合成及与溶液加工技术的兼容性而成为有前途的候选材料体系之一。然而，目前文献报道的有机小分子材料合成步骤多，吸收光谱的宽度和光热转化效率都亟待提高。近年，李远课题组发现缺电子的芳香

化硝酸自由基具有良好的光、热和电化学稳定性，同时具有电子受体的特性，本研究通过引入芳香化硝酸自由基电子受体和 EDOT 电子给体，设计和开发出了空气、光、热、电化学稳定高效 A-D-A 型多自由基分子 EDOT-TPAO<sub>4</sub>，展示出了宽吸收及优异的近红外二区光热转换性能，同时具有 0.02 S cm<sup>-1</sup> 的电子电导率，在光电器件中具有良好的应用前景。

近日，发光材料与器件全国重点实验室李远研究员团队报道了一种新型芳香化硝酸自由基光热材料，该材料基于开壳芳香化硝酸自由基为电子受体，通过一步简便的合成实现了材料的高效制备。开壳电子基态结构实现了低带隙，在粉末中展示出超宽的吸收（覆盖 300 到 2500 nm 以上）。其自由基性质及超宽的吸收赋予了材料优异的光热转换性能，在 1064 nm 的激光照射（0.9 W cm<sup>-2</sup>）下，EDOT-TPAO<sub>4</sub> 在 60 s 内迅速升温至 290°C，优于目前文献报道的大多数纯有机光热材料。密度泛函理论计算表明分子的端基具有开壳自由基受体性质，分子结构呈现出 A-D-A 构型。

在本研究中，区别于传统闭壳电子受体体系，李远研究团队提出了有机开壳自由基受体。该材料可通过其前驱体 EDOT-TPAOMe<sub>4</sub> 经过简单的一步脱甲基反应来制备。电化学测试表明，EDOT-TPAO<sub>4</sub> 在空气中展现出稳定的电化学性质，电子电导率高达 0.02 S cm<sup>-1</sup>。材料的粉末吸收光谱揭示了材料超宽的吸收带以及其水蒸发性能优异的原因。在 808 nm 和 1064 nm 测试中均表现出优异的性能，尤其在 1064nm 的照射下，其温度可迅速升高至 290°C（0.9 W cm<sup>-1</sup>），超越了文献报道的绝大多数纯有机光热材料，并将该材料应用于水蒸发以及激光点火。EDOT-TPAO<sub>4</sub> 在光热

循环中也保持了良好的稳定性和重复性，十圈的光热循环曲线波动极小且十圈光热循环照射后的核磁氢谱与光热前的保持一致。同时，本研究利用超快光谱和理论计算证实了皮秒时间尺度上的超快激发态非辐射跃迁过程，揭示了其优异光热性能的来源。

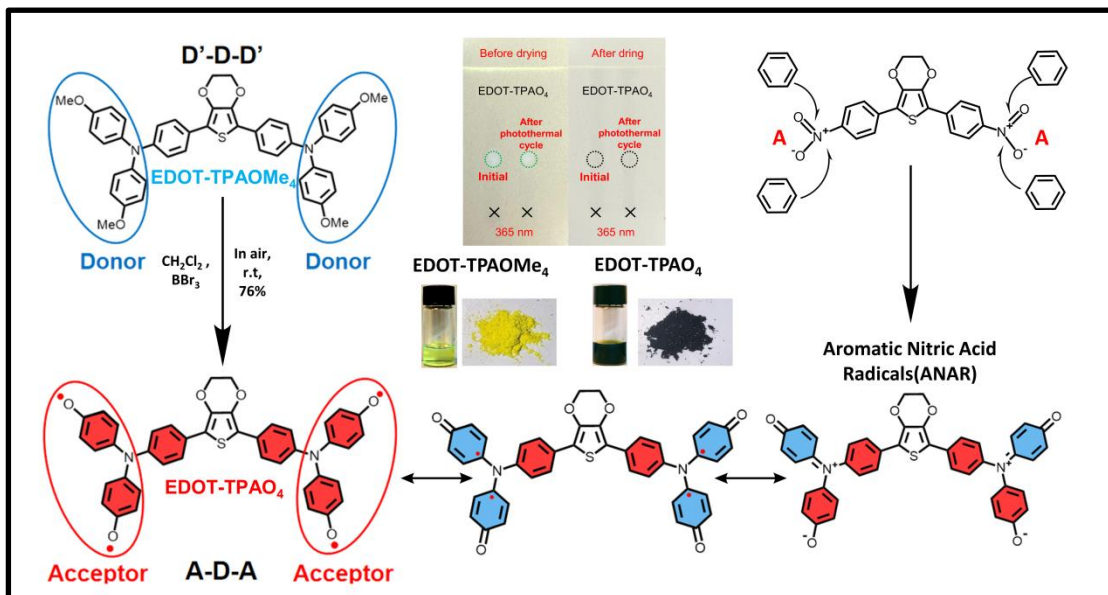


图 1. EDOT-TPAO<sub>4</sub>的分子结构、合成路径以及光热循环前后的材料在薄层硅胶板上的 TLC 照片。

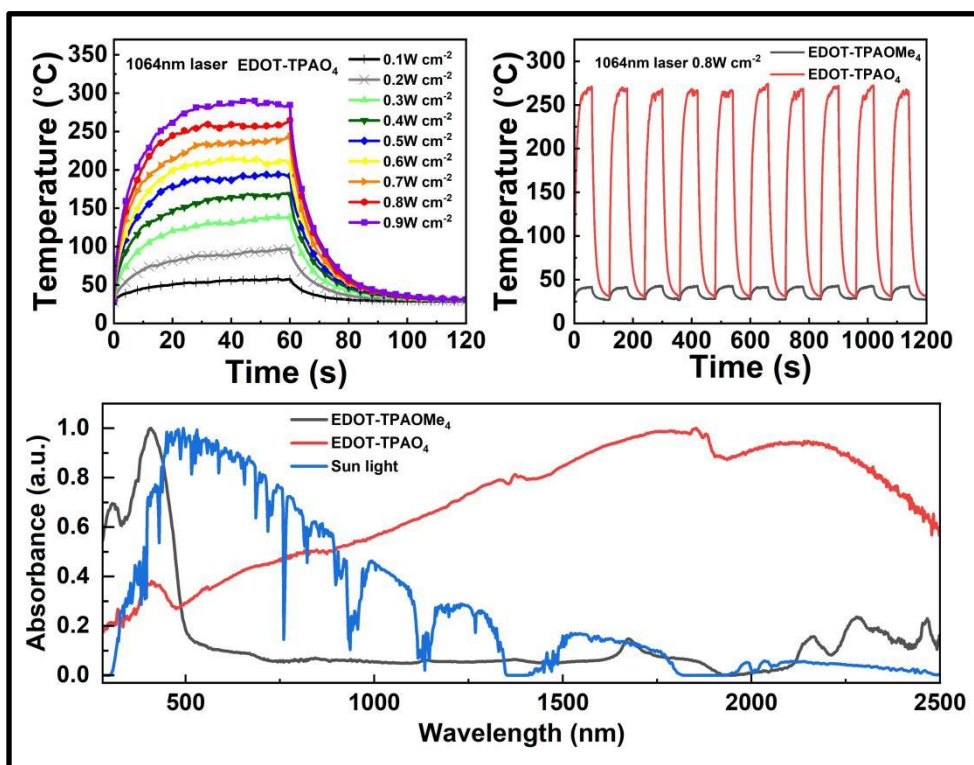


图 2. EDOT-TPAO<sub>4</sub>在 1064 nm 激光照射下的变温曲线、光热循环曲线以及材料的粉末 UV 吸收光谱

相关研究成果以 “*Stable Ultrabroad-Absorbing Radical Achieves Efficient NIR-II Photothermal Conversion via Facile Synthesis*” 为题发表在 *Advanced Science* 期刊上。论文的通讯作者为华南理工大学李远研究员，北京邮电大学匡卓然副教授和北大深圳医院党纤曦博士，华南理工大学本科生张浩哲和北京邮电大学杨宇航博士生为共同第一作者。该研究工作得到了国家重点研发计划项目课题（2024YFB3612400），国家自然科学基金委面上项目（22375065，22303008）等科研项目的资助。

## 仪器设备

### 三维互相关光散射仪

#### ●仪器信息

品牌：瑞士 LS

型号：3D LS

放置地点：华南理工大学北区科技园 2 号楼 224 室



#### ●应用领域

三维激光光散射仪基于静态光散射(SLS)和动态光散射(DLS)原理,利用三维光散射技术突破传统光散射技术对样品浓度和浊度的限制,适用于高分子、胶体化学、软物质、材料科学、生命科学等领域。它不仅可以研究标准透明稀溶液,还能直接研究自然无扰的高浓度和浑浊体系。

#### ●功能简介

可进行静态光散射(SLS)与动态光散射实验(DLS)。当光穿过非均匀体系时,就会发生散射现象,散射光因此包含有该体系的信息。动态光散射(DLS)又被称为光子相关谱法(PCS),

该方法通过检测散射强度随时间的变化，使用散射强度的自相关方程，自相关方程中包含了悬浮颗粒或者溶液中高分子的扩散系数的平均值及其分布等信息。从扩散系数的分布中可以得到粒度大小与分布以及其他动力学参数。静态光散射（SLS）对于悬浮于液体中的粒子，利用 Mie 散射形成光强与角度的函数关系，检测散射强度随角度的变化，从而得到颗粒粒度大小与形状的信息。对于高分子溶液，光强与角度、浓度形成的依赖关系（即浓度依赖性与角度依赖性），利用 Zimm 图（或其他类似的方法）可以得到以下参数： $M_w$  重均分子量（绝对值）、 $R_g$  均方根回旋半径或均方末端矩、 $A_2$  第二维里系数。同时此仪器集成了调制三维光散射技术，对于多重散射体系也有很强的测试能力。可测量粒度范围：0.15nm-5  $\mu$ m；分子量范围：10k-3000k；角度范围：5-155°， $\pm 0.01^\circ$ ；温控范围：-20~70°C；光源：660 nm 激光。

#### ●技术参数

1. 测量角度范围：8° -155°，测量角精度优于 0.01°，关机自动定位至 140°；

2. 样品瓶支架：提供多种尺寸，圆柱形样品瓶直径 10mm 或 5mm，使用 5mm 样品瓶时，样品量只需 200  $\mu$ L；

3. 温控装置（选配）：温控范围 10-70°C，温度低于 10°C 时，需使用干燥空气或氮气吹扫；

4. 检测器：APD（雪崩型光电二极管检测器），量子效率在 632.8nm 波长下 >65%；

5. 光学系统：单模光纤准直光学与集成检测系统；

6. 激光器：标配氩氦激光器（632.8nm, 21mW, 偏振度 500:1, TEM00）；

7. 相关器：双通道多 tau 相关器，最小延迟时间 12.5ns，最大延迟时间 50min，2×608 互相关通道，1088 自相关通道；

8. 滤光片支架：检测器前 2.5cm 处可放置不同标准的滤光片；

9. 光强衰减系统：具有自动衰减和手动衰减功能，0%~100% 光强连续衰减。结合在线入射光强测量，软件可记录光强，用于静态光散射数据的归一化；

10. 软件功能：通过软件反控仪器操作和数据处理，使用累计量法和约束正则 CONTIN 算法自动测定粒径。

●送样要求：

1. 样品需为溶液，具体样品要求根据实验目的和仪器操作手册进行准备；

2. 若有特殊要求请联系负责人。

●预约方式：

1. 可通过华南理工大学大仪共享平台预约，搜索三维互相关光散射仪；咨询电话：18383158448；

2. 收样地点：华南理工大学北区科技园 2 号楼 224 室；

3. 收样时间：工作日上午 8:30-12:00；下午 2:30-5:30。

## 境内外学术交流来访

●9月5日，东北林业大学马洪伟教授，在全重501会议室作题为“荧光薄膜激发态性质与微结构调控协同增效化学战剂传感的研究及器件化应用”学术报告。报告以“新材料开发、微结构调控、器件制备”三位一体构筑 CWAs 荧光传感器：借 HLCT 态理论指导分子设计，用电聚合法制得灵敏的共轭微孔聚合物薄膜，进而搭建便携式系统，实现 CWAs 实时监测。

●9月9日，德国图宾根大学王良萱博士，在全重501会议室作题为“复杂纳米环境中单分子光物理与光化学过程的可视化与调控”的学术报告。报告介绍其建立的光谱学—计算化学一体化框架，该框架应用于 D-A-D 三元体系的激发态光动力学及表面与针尖增强拉曼散射研究，验证了方法的普适性与稳健性，为功能分子设计与纳米光子学应用提供了新思路。

●9月18日，贵州师范大学毕津顺教授，在全重501会议室作题为“新型 IGZO 器件制备、性能优化与可靠性研究”的学术报告。报告围绕优化 IGZO 器件关态漏电流这一挑战，深入研究了关态漏电流机理及其工艺影响，并分析了非晶 IGZO 薄膜晶体管在不同偏压条件下的总剂量辐射效应，通过 TCAD 工具分析其退化机理，进而提出了抗辐射加固方案。

●9月18日，贵州师范大学艾尔肯·阿不都瓦衣提研究员，在全重501会议室作题为“空间用砷化镓多结太阳能电池辐射效应研究”的学术报告。报告介绍了空间用 GaAs 多结太阳能电池研究现状，分享其在正向晶格失配、倒置晶格失配结构三结太阳能电池，

基于键合技术的四结太阳电池,柔性三结太阳电池等新型太阳电池的制备、表征和辐射效应等方面的研究结果。