

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 11 期

(总第 99 期)

华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室编

2026 年 1 月 10 日

新闻动态

大湾区高分子创新与发展论坛成功举办.....	1
国务院参事室主任邹晓东一行来实验室参观调研.....	3

研究进展

发光理论与机制	
周博教授团队：界面能量传递（IET）点亮 Eu ³⁺ 纳米颗粒长余辉.....	5
新型显示、探测与成像	
宋恩海研究员&朱旭辉教授团队：用于 X 射线成像的零维卤化锰闪烁体的结构设计 with 性能预测	7
李志远教授团队：基于光纤微型传感探针的液-液扩散研究.....	10
彭俊虎教授团队：溶液法制备 Mo-Pr 共掺 In ₂ O ₃ 薄膜晶体管的迁移率与稳定性提升研究.....	12
有机光伏材料与器件	
陈军武教授团队：冷升华准固体添加剂实现高效率与长寿命运行的二元有机太阳能电池	15
无机发光与光纤激光	
甘久林研究员团队：自还原策略实现掺杂 CaZnOS 材料力致发光性能显著增效.....	17
陈东丹副教授团队：基于力致发光材料的柔性光纤应力/温度双模传感.....	20
甘久林研究员团队：协同优化铬离子局域配位态实现自供能近红外外力致发光.....	22

前沿交叉

甘久林研究员团队：面向活体手术：液晶弹性体光纤驱动器实现内窥导航和激光消融治疗 .. 27

甘久林研究员团队：液晶弹性体人工肌肉光纤实现多模态驱动与精确操控..... 29

李志远教授团队：库仑力驱动 “分子-热点” 自发配对赋能单分子拉曼光谱检测 32

仪器设备

脉冲/瞬态电子自旋共振仪..... 35

境内外来访参观与学术交流 37

新闻动态

大湾区高分子创新与发展论坛成功举办

为促进广东省乃至大湾区的高分子产学研工作，2025 年 12 月 12 日至 14 日，“大湾区高分子创新与发展论坛”在华南理工大学北区科技园 1 号楼成功举办。该论坛由广东省化学学会高分子化学专业委员会主办，广东省分子聚集发光重点实验室和华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室承办。中国科学院院士、香港中文大学（深圳）唐本忠教授担任论坛主席，广东省化学学会高分子化学专业委员会主任、华南理工大学秦安军教授，副主任、中山大学张艺教授和副主任、南方科技大学何凤教授担任执行主席。论坛开幕式由秦安军教授主持。



会议现场

开幕式上，唐本忠院士致欢迎辞。他指出，论坛大胆尝试突破传统学术会议的纯学术界主导模式，更主动吸纳产业界力量加入讨论。会议邀请了来自先进高分子材料、电子封装、新能源汽车、新材料解决方案等企业界的技术专家，共同围绕高分子领域的产业痛点与未来机会展开对话，这是一种有益的尝试，让“学

术界”和“产业界”专家真正坐到一起，把问题讲透、把需求讲清、把未来讲明。广东省化学学会秘书长、中山大学李乐教授代表广东省化学学会致辞，他肯定了高分子化学专业委员会过去的成绩和努力，希望新一届专业委员会在秦安军主任的带领下能够促进广东省高分子领域产学研的发展。

来自华南理工大学、香港中文大学（深圳）、香港科技大学、香港理工大学、中山大学、北京师范大学（珠海）、深圳大学、广东工业大学、华南农业大学等大湾区的高校，以及金发科技股份有限公司、比亚迪汽车工业有限公司、佛塑科技集团股份有限公司、广东生益科技股份有限公司、鹿山新材料股份有限公司等大湾区企业的 17 位专家和学者，围绕高分子基础研究和产业应用进行了精彩的分享，并进行了热烈的讨论。

本次论坛以“融合创新，赋能产业：构建高分子产学研合作新生态”为主题，旨在为高校、科研院所与行业企业搭建一个高水平的对话平台，共同探讨高分子科学前沿进展、产业技术瓶颈与未来市场机遇。与会专家和学者对论坛组织工作给予高度评价，大家一致希望该论坛成为一个能够持续聚集高质量学术成果、产业智慧与创新资源的平台，一个能够在未来多年持续举办、不断成长与升级的一个有影响力的论坛。论坛得到太凡科技（广州）有限公司、上海皓鸿生物医药科技有限公司（乐研品牌）和 **Aggregate** 期刊的大力支持。

国务院参事室主任邹晓东一行来实验室参观调研

12月16日，国务院参事室党组书记、主任邹晓东一行来发光材料与器件全国重点实验室参观调研，华南理工大学副校长吴波陪同调研。



邹晓东主任参观实验室

实验室主任马於光院士对调研组的到来表示热烈欢迎，并详细介绍了实验室的发展历程、组织架构、核心研究方向以及近年来实验室在承担国家重大科技任务中所作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，马於光为调研组介绍了多项代表性成果，包括柔性 OLED 显示、热激子蓝光材料和有机光伏电池等成果的研究背景及应用。

调研期间，调研组前往实验室的超快平台、核磁室、小角X射线衍射仪等公共测试平台，实地察看了各类科研设备的运行情况，了解实验室先进的技术支撑体系。

调研组对实验室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

周博教授团队：界面能量传递（IET）点亮 Eu^{3+} 纳米颗粒长余辉

基于闪烁/辐射发光的 X 射线探测与成像已广泛应用于无损检测、安全检查与工业检测等领域。相较之下，X 射线激发的余辉 (PersL) 发光可在光源后持续发光，有望进一步降低背景干扰、提升成像信噪比与分辨率，具备重要的应用价值。然而，在稀土掺杂纳米颗粒体系中实现 Eu^{3+} 的 PersL 发光是一个长期的挑战性课题。即便 Tb^{3+} 常可作为 X 射线能量的“收集/供体”增强 Eu^{3+} 的 RL，简单 Tb/Eu 共掺仍难以获得 Eu^{3+} 的 PersL，且机理认识不够清晰，限制了材料设计与应用推进。

近日，华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室的周博教授团队提出通过“界面能量传递（IET）”策略构筑 $\text{NaYF}_4:\text{Tb}@\text{NaYF}_4:\text{Eu}$ 壳核纳米结构，使 Tb^{3+} 亚晶格承担 X 射线能量吸收、存储与迁移的功能，并在纳米晶核-壳界面建立高效的 $\text{Tb}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{3+}$ 之间 IET 通道，从而在壳层有效激活 Eu^{3+} ，实现强烈红色 PersL。更进一步，研究通过调控界面能量传递路径，实现 RL/PersL 发光颜色的空间可控与可切换；同时提出互补的成像路线：核壳体系用于“延时读出”，而共掺体系可“抑制 PersL、仅保留 RL”，从材料层面为实时成像提供避免鬼影的解决方案。

本研究通过构筑 $\text{NaYF}_4:\text{Tb}@\text{NaYF}_4:\text{Eu}$ 壳核纳米结构，实现了 X 射线激励的 Eu^{3+} 红色余辉发光；优化条件下，核层 Tb^{3+} 与

壳层 Eu^{3+} 的掺杂比例分别约为 80mol% 与 15mol%。对照实验表明，核壳空间分离是获得 Eu^{3+} 的 PersL 的关键：当 Tb^{3+} 与 Eu^{3+} 简单共掺于同一晶格时， Eu^{3+} PersL 不出现，且 Tb^{3+} 自身余辉也被明显抑制。热释光等结果进一步支持 Eu^{3+} 余辉来自 Tb^{3+} 供能，并通过界面能量转移实现能量注入。为实现发光的可调控，研究在核与壳之间引入厚度可调的惰性 NaYF_4 惰性层，连续调节 Tb-Eu 传递路径强度：惰性层增厚后 Eu^{3+} PersL 逐步减弱直至消失，而 Tb^{3+} 的 PersL 显著增强，发光颜色实现连续变化。进一步将纳米颗粒嵌入 PDMS 制备柔性成像薄膜，实现约 19.2 与 16.7 LP mm^{-1} 的成像分辨率，最高光产额约 $29,564 \text{ ph MeV}^{-1}$ ，并在 450 K 下保持稳定的 RL 输出。该体系支持“延时读出”的 PersL 成像，同时也提供“仅 RL、无余辉拖尾”的实时成像材料路线，为不同场景下的高质量 X 射线成像提供了方案。

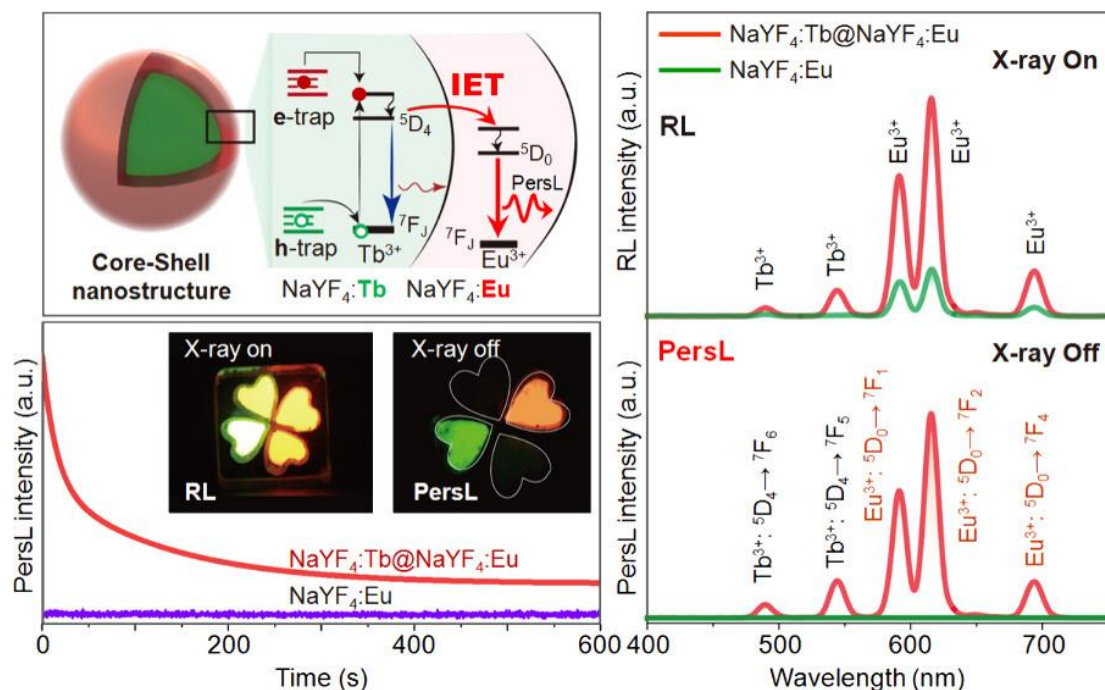


图 1 通过构筑 $\text{NaYF}_4:\text{Tb}@ \text{NaYF}_4:\text{Eu}$ 壳核结构实现 Eu^{3+} 的 X 射线激励的余辉发光

相关研究成果以“*Enabling Persistent Luminescence of Eu³⁺ in Nanoparticles through Interfacial Energy Transfer for Advanced X-ray Imaging*”为题发表在 *Nano Letters* 上，其中通讯作者为周博教授，第一作者为 2023 级博士生魏国辉。该研究工作得到了国家自然科学基金、中国博士后科学基金、发光材料与器件全国重点实验室等资助。

原文链接：

<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.nanolett.5c01138>

新型显示、探测与成像

宋恩海研究员&朱旭辉教授团队：用于 X 射线成像的零维卤化锰闪烁体的结构设计 with 性能预测

零维锰基有机-无机杂化金属卤化物 (0D Mn²⁺-based OIHM) 由于其局域化的发光中心、大的斯托克斯位移、可忽略的自吸收、锰和卤素原子 X 射线吸收能力、丰富的天然储量、简便的合成方法以及低毒性，使其具有在闪烁体领域的应用潜力。高性能闪烁体材料的发现与合理设计对于推进 X 射线成像和检测技术的发展至关重要，但目前仍是一个重大挑战。

近日，华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室的宋恩海研究员和朱旭辉教授课题组制备了一种高效率的 0D Mn²⁺-based OIHM 闪烁体 (C₃₃H₂₉NP)₂MnBr₄·EtOH，其具有 99.2% 的 PLQY 以及 56363 photons MeV⁻¹ 的光产额 (C₃₃H₂₉NP⁺ = (3-(咪唑-9-基)丙基)三苯基溴磷鎓离子)。同时引入了面密度 (σ) 的概念

来评估 0D Mn^{2+} -based OIHM 的闪烁性能。这项研究不仅开发出了一种可以用于 X 射线成像的高闪烁性能的 0D Mn^{2+} -based OIHM，而且还确立了关键的结构与性能之间的关系，为先进闪烁体材料的设计与制备提供了更深入的见解。

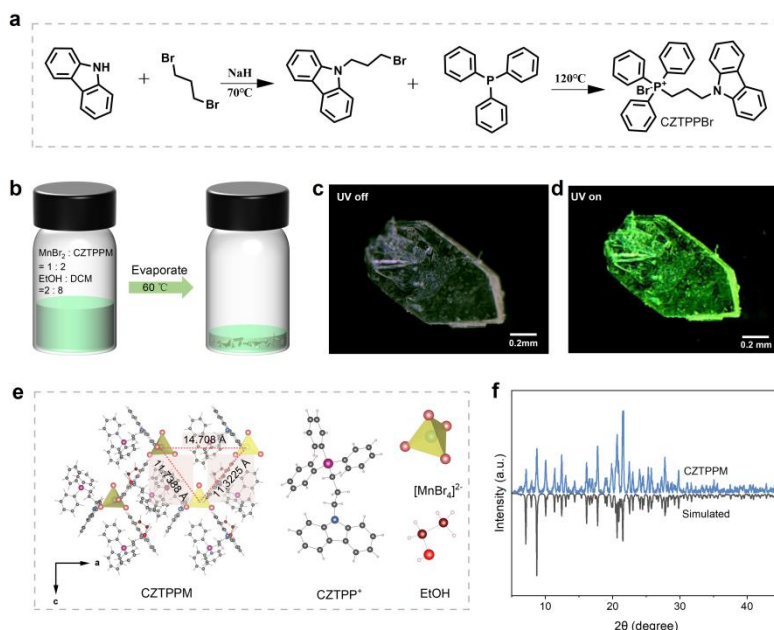


图 1 材料制备与结构表征

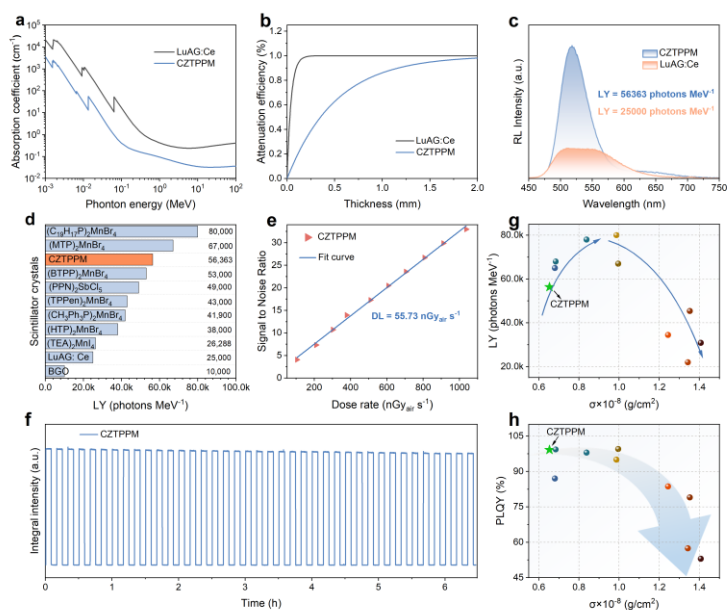


图 2 闪烁性能测试

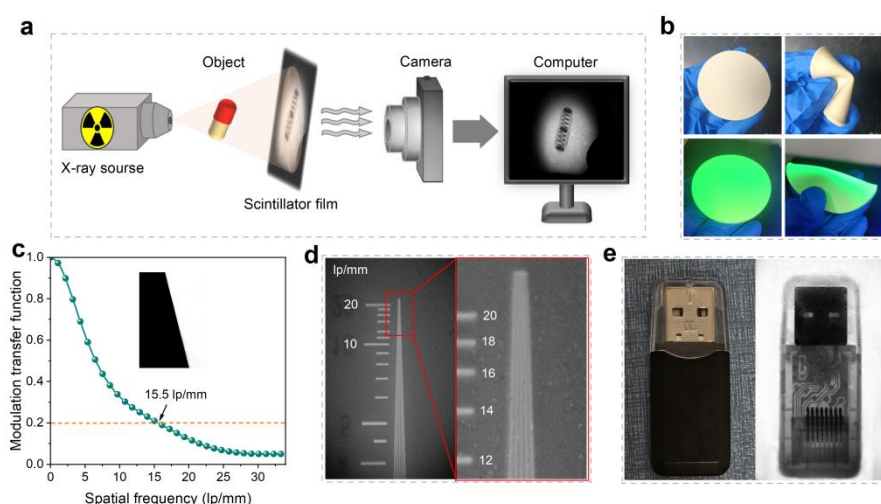


图 3 成像演示

通过引入刚性、大体积的有机盐 (3-(吡啶-9-基)丙基)三苯基溴化磷 $\text{C}_{33}\text{H}_{29}\text{NP}^+\text{Br}^-$ (CZTPPBr)，成功研制出一种高效的零维杂化金属卤化物闪烁体 $(\text{C}_{33}\text{H}_{29}\text{NP})_2\text{MnBr}_4 \cdot \text{EtOH}$ (CZTPPM)。X 射线单晶结构分析表明，被有机分子隔离的 $[\text{MnBr}_4]^{2-}$ 发光中心之间的最小 Mn-Mn 距离超过 11 Å。在紫外光激发下，CZTPPM 表现出强烈的绿色发射，光致发光量子产率达到 99.2%，并且具有较低的热猝灭特性 (320 K 时的发光强度为 80 K 时的 86.9%)。此外，CZTPPM 晶体还展现出卓越的闪烁性能，光产额高达 56363 Photons/MeV，以及 $55.73 \text{ nGy}_{\text{air}} \text{ s}^{-1}$ 的 X 射线检测限和 15.5 lp/mm 的空间分辨率，具有实现高质量 X 射线成像的潜力。更重要的是，我们综合考虑光致发光量子产率 (PLQY) 和 X 射线吸收系数，引入了面密度 (σ) 来预测 0D Mn^{2+} -based OIHM 的闪烁效率，从而为先进闪烁体材料的设计与制备提供了深入的见解。

值得指出的是，通过加热失去乙醇分子后， $(\text{C}_{33}\text{H}_{29}\text{NP})_2\text{MnBr}_4$ 形成新的稳定晶体相。对于其与溶剂等分子相互作用，以及发光和闪烁体特性正在进行深入研究。

相关研究成果以“*Structural Design and Performance Prediction of Zero-Dimensional Manganese (II) Halide Scintillators for X-ray Imaging: A case study of $(C_{33}H_{29}NP)_2MnBr_4 \cdot EtOH$* ”为题发表在 *Advanced Optical Materials* 上，其中通讯作者为宋恩海研究员和朱旭辉教授，第一作者为刘礼菊博士生。该研究工作得到了国家自然科学基金、广东省杰出青年科学基金、华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室等科研项目的资助。

原文链接：<https://doi.org/10.1002/adom.202503244>

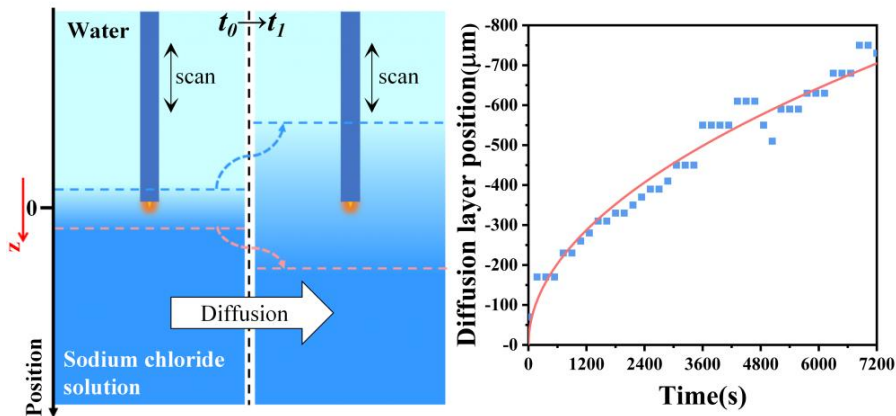
李志远教授团队：基于光纤微型传感探针的液-液扩散研究

作为一个古老的科学问题，液-液扩散至今没有完善的理论。水-氯化钠和乙醇-水体系作为两个具有代表性的扩散体系，对它们的研究将有助于深化对氯化钠-水和乙醇-水微观结构的认知。然而，目前对它们的测量方法均存在空间分辨率低的局限，无法准确研究扩散过程。

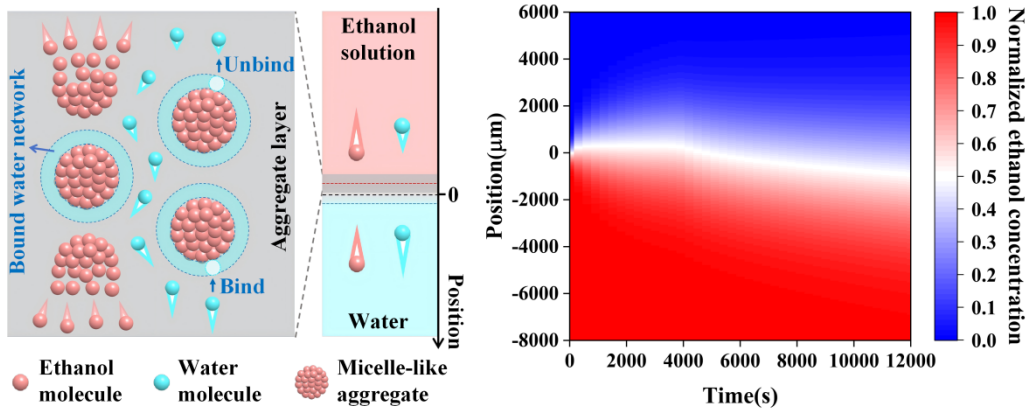
近日，华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室的李志远教授课题组利用自制的光纤等离子激元微型传感探针，以高空间分辨率实现了对水-氯化钠和乙醇-水体系的非菲克扩散过程的研究，有望拓展光纤传感领域的应用。

使用微型传感探针以 15.3 μm 的空间分辨率和 3 min 的时间间隔对水-氯化钠溶液扩散过程进行原位监测。实验结果表明在水-氯化钠溶液扩散过程中，扩散系数为常数，但是扩散层中心往水一侧移动，这是不满足传统菲克扩散定律的。通过在菲克定律中引入等效表面张力，建立了一个非菲克扩散模型，准确解释了

实验中观察到的非菲克扩散现象。这一成果丰富了液-液扩散理论，揭示了液体中离子引起的相互作用可以导致异常扩散行为。



使用微型传感探针以 $15.3\ \mu\text{m}$ 的空间分辨率和 $5\ \text{min}$ 的时间间隔对乙醇溶液-水扩散过程进行原位监测。实验结果表明乙醇-水体系存在奇异扩散行为：扩散过程有效扩散系数逐渐减小且扩散层中心呈现三段式移动，这严重违背了传统菲克扩散定律。实验中还观察到扩散过程伴随着乙醇分子的自组装现象，其阻碍了乙醇分子和水分子的扩散。结合分子自组装、过剩体积以及界面张力效应，准确解释了实验中观察到的奇异扩散现象。这一成果丰富了液-液扩散理论，揭示了复杂微观物理化学相互作用会显著影响宏观扩散行为，为理解乙醇-水混合物的分子结构提供了更深入的见解和新的思考角度。



这两项成果都展示自制的光纤微型传感探针在液-液扩散研究中的实用性和强大能力，有望拓展其应用于重要系统中传质过程及其他物理化学过程的研究。

相关研究成果以“*In Situ Monitoring of Water–Sodium Chloride Diffusion via a Fiber-Integrated Plasmonic Microsensor*”和“*Exotic Ethanol–Water Diffusion Mediated by Molecular Self-Assembly*”为题发表在 *The Journal of Physical Chemistry Letters* 上，其中通讯作者为李志远教授，第一作者为黄容涛博士生。该研究工作得到了国家自然科学基金（12434016）、广东省科技专项（2020B010190001）等科研项目的资助。

原文链接：

<https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.5c01634>

<https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.5c03413>

彭俊彪教授团队：溶液法制备 Mo-Pr 共掺 In_2O_3 薄膜晶体管的迁移率与稳定性提升研究

基于 In_2O_3 的 TFTs 具有高迁移率，但其栅偏压稳定性和光照稳定性不佳。稀土掺杂可以提高稳定性，但会牺牲迁移率，可通过共掺杂补偿。机器学习可根据少量数据预测最佳工艺参数，避免了试错法的盲目性。

近日，华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室的彭俊彪、宁洪龙和姚日晖教授课题组为了在保持稀土掺杂金属氧化物半导体 TFT 稳定性的同时提升迁移率，设计了 InPrMoO TFTs，其展现出优异的电学性能。构建了集成物理模型与机器学习的多

目标预测模型，预测最佳工艺参数。预测结果经实验验证，大部分薄膜性能的相对误差小于 5%。最终制备的 TFT 展现出 $\mu_{\text{sat}} = 13.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $I_{\text{on}}/I_{\text{off}} = 3.82 \times 10^6$, $SS = 0.40 \text{ V/dec}$ 的性能，效率优于传统试错法，有望拓展机器学习技术在氧化物 TFT 性能优化的应用。

论文旨在解决 MOTFT 中迁移率与稳定性之间长期存在的权衡难题。其核心难点在于： V_O 作为本征施主可提升载流子浓度和迁移率，但过量 V_O 在光照或电场作用下易被激发为深能级缺陷，导致 NBIS 等条件下 V_{th} 漂移严重，稳定性恶化；单一元素掺杂虽可改善某一方面性能，却牺牲迁移率。传统试错法优化工艺参数效率低下，难以应对多变量强耦合的非线性系统。

针对上述难点，研究提出 Mo-Pr 共掺杂并引入机器学习辅助优化。 Mo^{6+} 具有高氧结合能和小离子半径其掺入可强化 In-O 网络、抑制 V_O 生成，并提供额外电子补偿因 V_O 减少导致的载流子损失；同时。 Pr^{3+} 则通过电荷转移跃迁将入射光能转化为非辐射弛豫或红光发射，抑制光生载流子对稳定性的影响。二者协同作用，在 0.8 mol% Mo 掺杂时实现最优平衡，由此制备的 TFT 展现出优异综合性能。

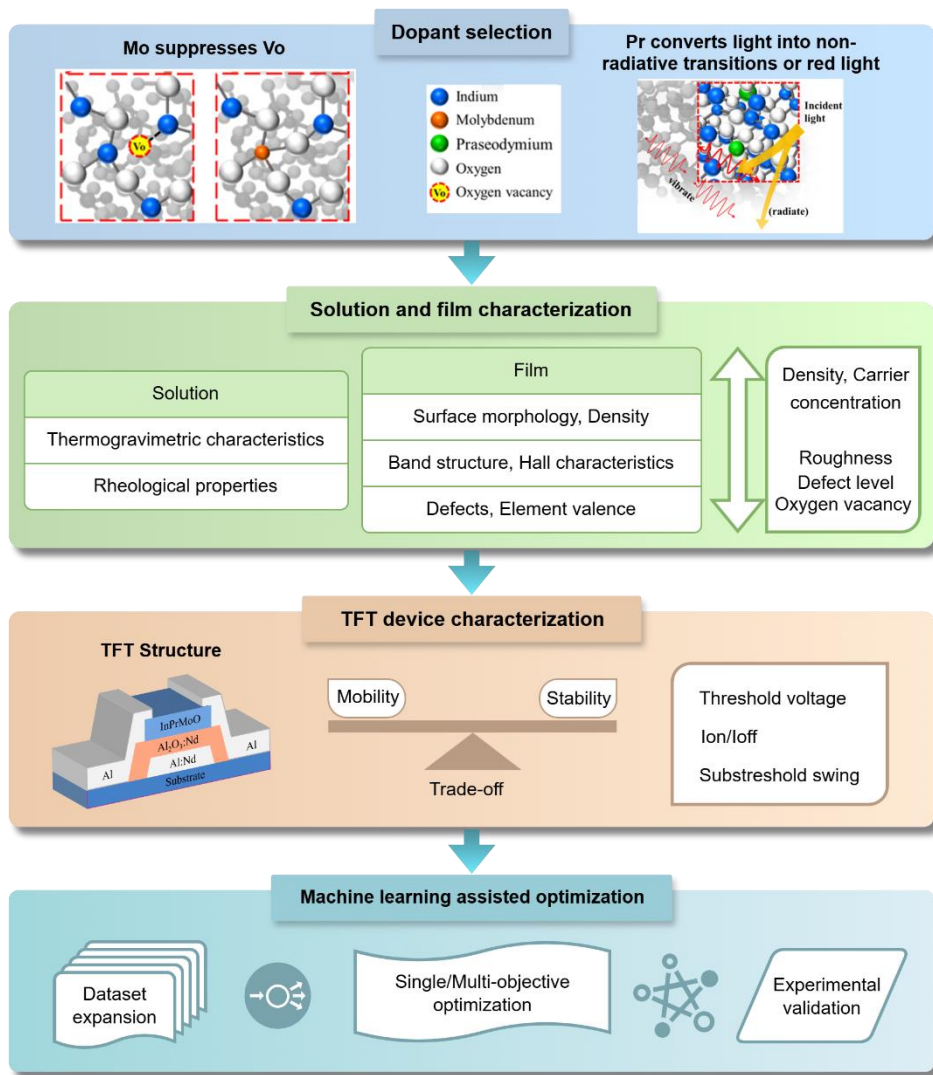


图 1 研究设计示意图

研究构建了融合物理模型与机器学习的多目标优化框架。基于 450 组实验数据,采用 KNN 算法扩展数据集以增强泛化能力,并利用 LGBM 建立薄膜性能与工艺参数间的非线性映射关系。模型成功预测最优工艺条件,实验验证显示多数薄膜特性预测相对误差低于 5%。TFT 性能进一步提升。研究不仅通过共掺杂机制突破了迁移率-稳定性权衡取舍,更建立了数据驱动的高效开发范式。

相关研究成果以“*Enhanced Mobility and Stability in Solution-Processed Mo–Pr Co-Doped In₂O₃ TFTs Guided by Machine*

Learning Optimization”为题发表在 *Electron* 上，其中通讯作者为宁洪龙、姚日晖教授，第一作者为程伟鑫硕士生。该研究工作得到了广东省璀璨行动(CC/XM-202401ZJ0201)、国家自然科学基金(62174057)、广东省自然科学基金(2024A1515012216, 2023A1515011026)等科研项目的资助。

原文链接：<https://doi.org/10.1002/elt2.70020>

有机光伏材料与器件

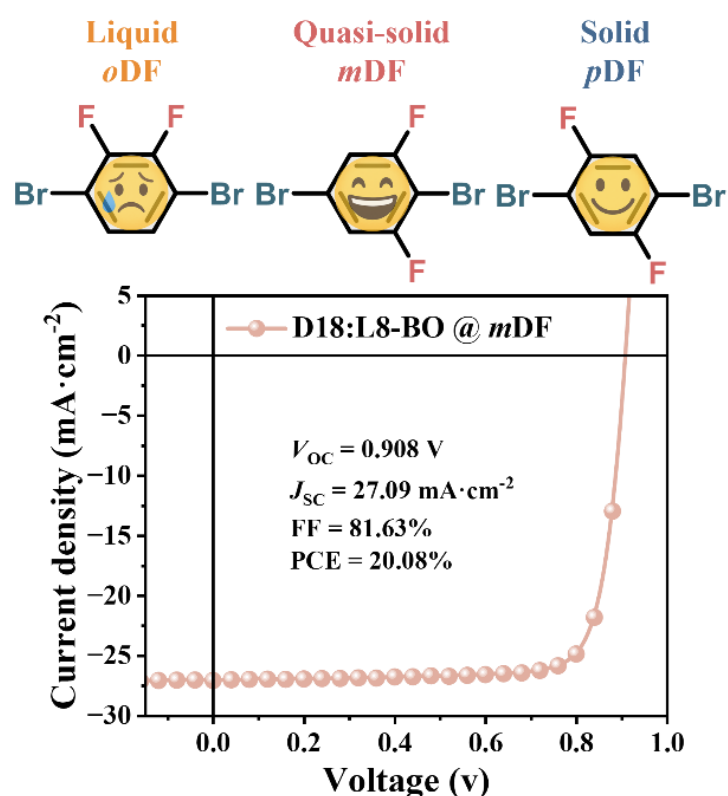
陈军武教授团队：冷升华准固体添加剂实现高效率与长寿命运行的二元有机太阳能电池

有机太阳能电池（OSCs）具备轻量、柔性和溶液可加工等优势，在便携设备与建筑一体化光伏等领域前景广阔。Y 系列非富勒烯受体的突破使单结与叠层器件效率均超 20%，但商业化仍受长期稳定性和规模化制备限制。高效 BHJ-OSCs 的关键在于构建兼具高界面面积与连续电荷通道的最优给-受体网络形貌。当前的形貌优化策略中，因多功能且效果显著，添加剂工程已成为最受关注的研究方向。

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可原位去除的准固体添加剂，实现了高效率且长寿命运行的二元有机太阳能电池，有望拓展有机光伏活性层添加剂领域的应用。

文章揭示了添加剂的物理状态（液态、类固态、固态）对有机太阳能电池（OSC）活性层成膜动力学具有决定性影响。研究

团队选用三种同分异构体 *o*DF（液态）、*m*DF（类固态）和 *p*DF（固态）作为原位可移除（in situ removable, ISR）添加剂，在旋涂干燥过程中调控 PM6:L8-BO 体系的相分离与结晶行为。其中类固态的 *m*DF 表现出独特的“冷升华”特性：它在溶剂挥发初期延缓干燥过程，为分子重排提供更宽的时间窗口；而在中间阶段却能加速 L8-BO 的结晶，促进更紧密的 π - π 堆积、更大的相干长度以及优化的垂直相分布（底部富集给体 PM6，顶部富集受体 L8-BO），从而构建出高纯度、高有序性的双连续互穿网络。*m*DF 与受体 L8-BO 之间具有最强的非共价相互作用（DFT 计算显示结合能最负），但又能在成膜后完全挥发，不留残余。这不仅有效抑制了非辐射复合损失（表现为更高的电致发光量子效率 EQE_{EL} 和更低的 ΔE_3 ），还避免了传统高沸点液体添加剂（如 DIO）因残留导致的光热不稳定性问题。



相关研究成果以“*Cold-Sublimating Quasi-Solid Additive Enables High Efficiency and Long Operational Stability Binary Organic Solar Cells*”为题发表在 *Advanced Energy Materials* 上，其中通讯作者为陈军武教授，第一作者为张泽升博士生。该研究工作得到了中国国家自然科学基金(项目号:52573195、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)的资助等科研项目的资助。

原文链接:

<https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aenm.202505276>

无机发光与光纤激光

甘久林研究员团队：自还原策略实现掺杂 CaZnOS 材料力致发光性能显著增效

力致发光 (ML) 是材料在机械刺激下直接发光的智能光学现象，它无需外部光源即可实现自供能发光，但面临发光强度低、自恢复性不足的瓶颈。当前优化策略多基于特定材料的经验性试错，缺乏普适理论模型，难以精准建立缺陷结构与性能的构效关系。因此，发展普适可靠的 ML 性能优化策略仍是关键科学挑战。

近日，华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室甘久林研究员团队，基于创新的“自还原”策略，在经典力致发光材料 CaZnOS 中实现 ML 强度提升 4 倍的显著效果。该策略成功拓展

至全系列稀土离子掺杂体系，展现出优异的普适性。这一研究工
作为高性能 ML 材料的定向设计提供了一条新路径。

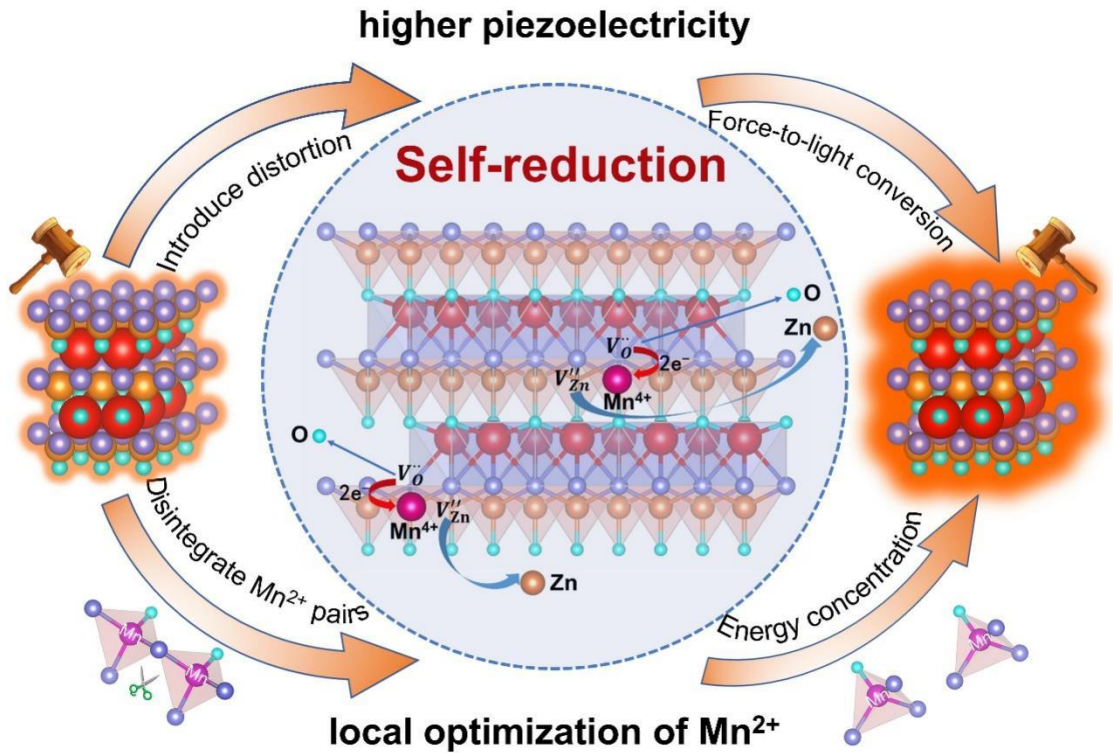


图 1 通过自还原策略增强力致发光（ML）的示意图

该研究提出了一种 $\text{Mn}^{4+} \rightarrow \text{Mn}^{2+}$ 自还原策略，通过诱导晶格缺陷并促进其非中心对称六方结构畸变，显著增强了 CaZnOS 的自供能 ML 性能。该方法增强了内部压电响应，并将最大 ML 强度提高了多达 4 倍。X 射线吸收近边结构、扩展 X 射线吸收精细结构、电子顺磁共振、压电响应力显微镜和密度泛函理论 DFT 计算均表明，涉及 V_{O} 和 V_{Zn}'' 的复合缺陷是 ML 性能显著增强的关键。压电响应力显微镜和密度泛函理论 DFT 计算提供了一个系统框架，将自还原行为、局域晶格畸变、增强的压电响应、载流子传输动力学和光子发射机制联系起来此外，为进一步推广该策略，将 Mn^{4+} 与稀土离子共掺 CaZnOS，并利用 Mn^{4+} 的自还原协

同增强两者的 ML 输出，实现了近红外 ML 发射的普遍增强。例如，与单掺杂体系相比， Yb^{3+} 共掺杂体系的近红外区域 ML 强度增强了约 3.3 倍。基于这些发现，本研究开发了一种多层正畸传感器，能够实现实时咬合成像和咬合力监测。该器件在 0-12 N 范围内表现出灵敏的响应，并通过神经形态图像识别在咬合定位中实现了 96.89% 的准确率。该研究为 ML 性能优化提供了一条可推广的路径，并为发展先进的智能传感技术铺平了道路。

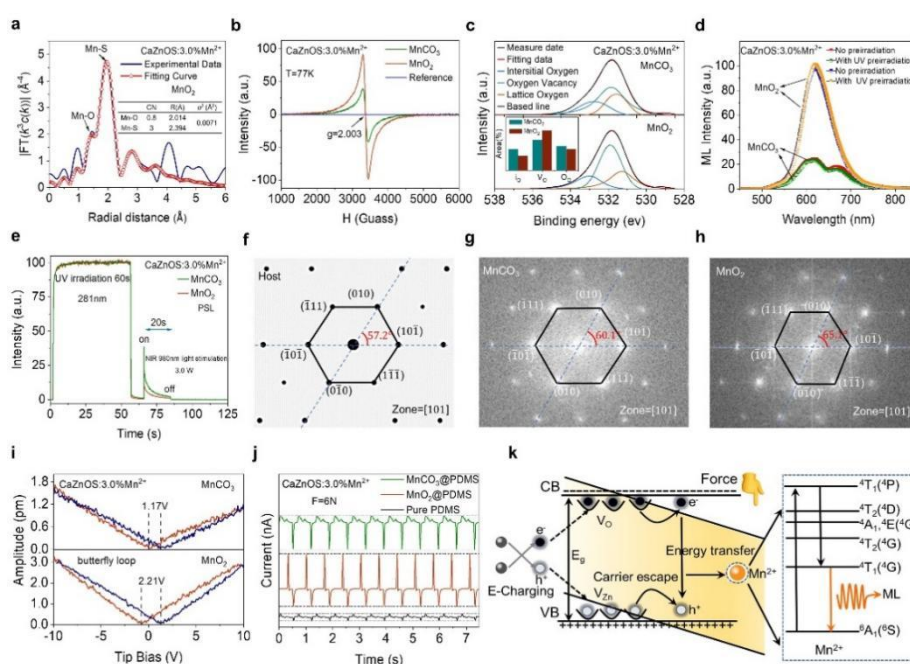


图 2 ML 性能增强的机理分析

相关研究成果以“*Boosting Mechanoluminescence Performance in Doped CaZnOS by the Facile Self-Reduction Approach*”为题发表在 *Advanced Materials* 上，其中通讯作者为甘久林研究员和香港大学熊普先博士后，共同第一作者为许胜彬博士生、肖密博士生和熊普先博士后。该研究工作得到了广东省重点研发计划项目和国家自然科学基金的资助。

原文链接：<https://doi.org/10.1002/adma.202511643>

陈东丹副教授团队：基于力致发光材料的柔性光纤应力/温度双模传感

力致发光（ML）材料和上转换发光（UCL）材料在智能皮肤、应力传感及光学测温等领域展现出巨大潜力。在众多基质中，CaZnOS 凭借多阳离子位点及优异的激活剂相容性，成为实现多模态调谐发光的理想半导体材料。然而，能源材料的研究不能仅局限于单一功能的优化。现有的双传感研究多面临发光波段重合、多物理参数解耦复杂等挑战，且功能单一的材料难以满足应用场景复杂化和信息传递精确化的要求。因此，开发高性能多功能化荧光材料势在必行。

近日，华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室陈东丹副教授团队提出了一种基于经典基质 CaZnOS 的镧系/镧系（ $\text{Nd}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ ）激活剂组合策略，开发出一种能够同时表现对应力和温度敏感的新型智能发光材料。有望拓展其在应力和温度双模态传感中的潜在应用。

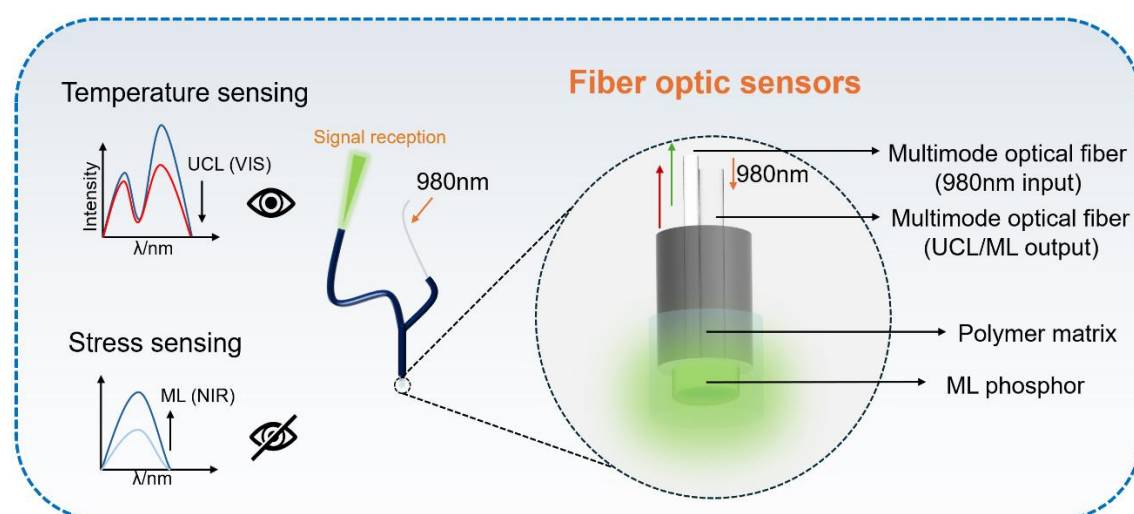


图 1 应力/温度双模式传感的光纤传感器示意图

通过高温固相法成功合成了 $\text{CaZnOS:Nd}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ 荧光粉，实现了高效的近红外光致发光（NIR ML，源自 Nd^{3+} ）与上转换发光（UCL，源自 Er^{3+} ）的集成。通过采用碱土金属共混合策略（ $\text{Ca/SrZnOS:Nd}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ ），进一步增强了材料的发光性能。材料表现出具有低应力阈值和高稳定性的近红外光致发光（NIR ML），能够有效避免环境光的干扰，显著增强 ML 信号的信噪比。同时，其上转换发光（UCL）性能在温度传感方面展现出极佳的灵敏度和检测精度。该材料在远程应力和温度分布检测方面展现出巨大的潜力。此外，本研究将实验表征手段与密度泛函理论（DFT）计算相结合，明确了光致发光（ML）过程中缺陷的具体类型及其来源。研究证实，ML 的产生机制源于基质中缺陷的协同效应与发射过程中的压电效应。通过分析分波态密度（PDOS）以及费米能级局部微环境的变化，外源离子的掺杂极易在 CaZnOS 基质中诱导形成氧空位（ V_{O} ）与锌空位（ V_{Zn}'' ）等缺陷，这些缺陷作为空穴和电子的捕获中心，能够有效促进电子跃迁与能量存储过程，为完善 ML 材料的发光机理提供了重要的理论支撑。基于该材料优异的动态/静态光学特性，设计并构建了一种双模态光学传感器件。该装置在远程应力和温度检测方面具有卓越的应用潜力，其独特的光纤传输技术不仅保证了数据传输的安全性和准确性，还有效提高了其在复杂环境下的稳定性和可靠性。对推动发光材料的实际应用具有重大意义。

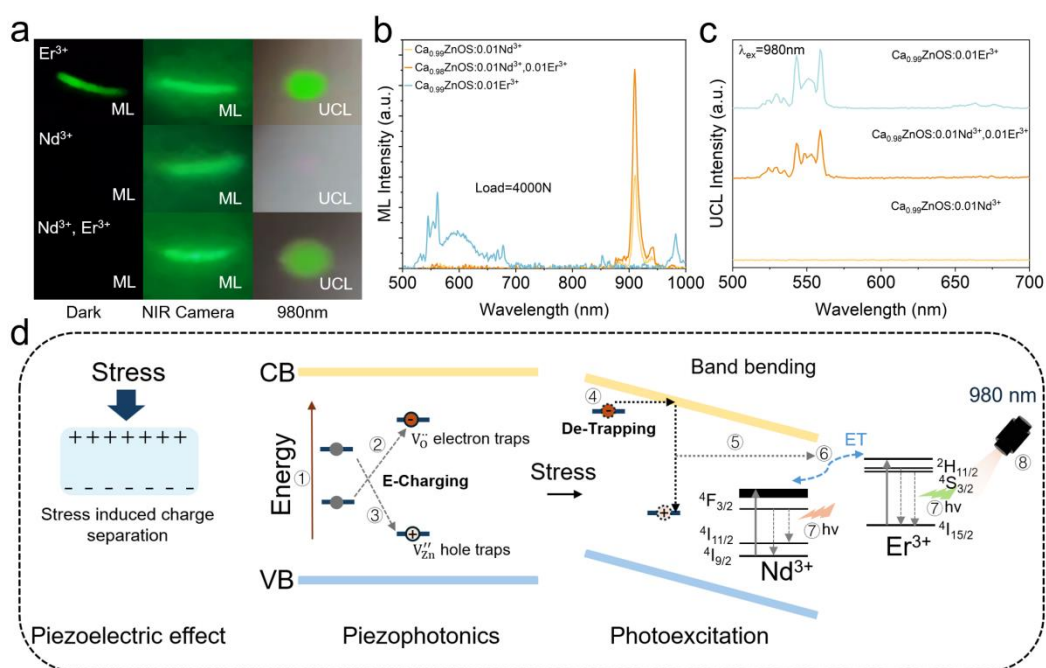


图 2 基于 $\text{CaZnOS}:\text{Nd}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ 材料的发光性能及应力发光机理

相关研究成果以“*Flexible Optical Fiber Stress/Temperature Dual- Mode Sensing Based on CaZnOS: Nd, Er*”为题发表在 *Advanced Functional Materials* 上，其中通讯作者为陈东丹副教授、甘久林研究员和香港大学熊普先博士后，共同第一作者为郑盼硕士生、肖密博士生和熊普先博士后，该研究工作得到了广东省重点研发计划和国家自然科学基金的资助。

原文链接：<https://doi.org/10.1002/adfm.202505094>

甘久林研究员团队：协同优化铬离子局域配位态实现自供能近红外力致发光

力致发光（ML）是一种将机械能直接转换为光能的物理现象，作为“力-光转换”材料，其机理复杂但应用前景广阔。近红外发光自供能 ML 材料，在生物成像、传感及人机交互等下一代生物医学领域展现出重要潜力。然而，由于对其发光机制的认识尚

不充分，目前近红外 ML 材料在发光效率与循环稳定性方面仍难以满足实际应用需求。

近日，华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室的甘久林研究员团队通过调控 MgO 基质中 Cr^{3+} 离子的局部配位环境，成功实现了具备高循环稳定性(>10000 次)且光谱可调(650-1000 nm)的近红外力致发光。基于此，团队进一步开发了多层明场传感与成像的验证系统，为高精度、交互式近红外触觉感知提供了创新技术路径。

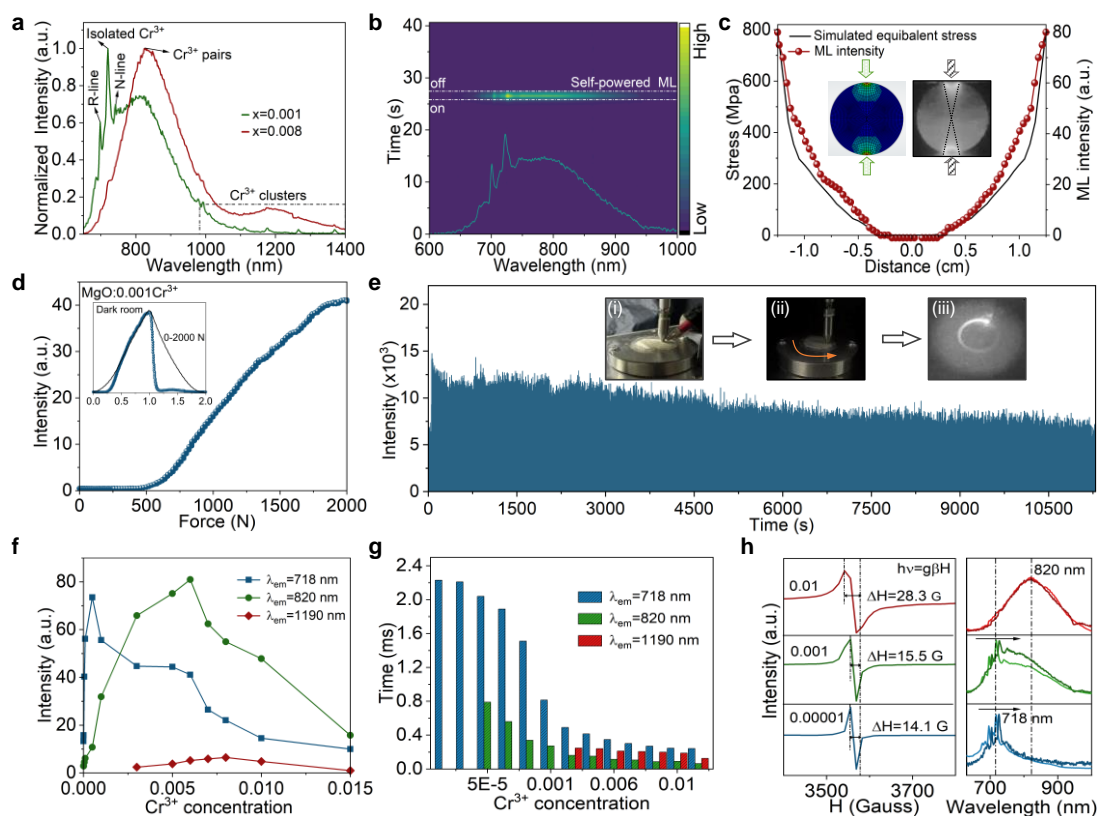


图 1 (a) $\text{Mg}_{1-x}\text{O}: x\text{Cr}^{3+}$ 的归一化光谱 (b) $\text{MgO}: \text{Cr}^{3+}$ 的 ML 二维图 (c) ML 实验和模拟应力分布对比图 (d) $\text{MgO}: \text{Cr}^{3+}$ 的 ML 强度随着力变化的对比图 (e) ML 循环稳定性 (f) $\text{Mg}_{1-x}\text{O}: x\text{Cr}^{3+}$ 的 PL 强度 (g) $\text{Mg}_{1-x}\text{O}: x\text{Cr}^{3+}$ 的荧光寿命 (h) $\text{MgO}: \text{Cr}^{3+}$ 的 EPR 曲线和相应的 ML 和 PL 光谱

传统的力致发光材料设计通常只考虑基质结构的影响，侧重于晶格工程和缺陷工程以实现高性能自供能力致发光。本研究通过优化孤立的 Cr^{3+} 、 Cr^{3+} 对和 Cr^{3+} 团簇之间的局部配位关系，实现具有超 10000 次循环发光稳定性的近红外 ML。 Cr^{3+} 离子的异价取代可产生各种镁空位和 Cr^{3+} 发光中心。原位光学和结构表征表明，发光分别来自孤立的 $\text{Cr}^{3+} (^2\text{E}_g \rightarrow ^4\text{A}_{2g}, 718 \text{ nm})$ ， Cr^{3+} 对 ($^4\text{T}_{2g} \rightarrow ^4\text{A}_{2g}, 820 \text{ nm}$)和 Cr^{3+} 团簇($\text{Cr}^{3+}\text{-Cr}^{3+} \rightarrow \text{Cr}^{2+}\text{-Cr}^{4+}$ 价间电荷跃迁, 1190 nm) (图 1)。基于实验与第一性原理计算，本研究建立了一个局部缺陷-畸变-压电耦合 ML 模型，重点关注材料内部载流子的起源与迁移过程。 Cr^{3+} 对和镁空位的形成会导致 MgO 基质的局部晶格变形，产生压电性。局域压电场会在外部机械刺激下引发压电极化电荷的产生，进而影响电子-空穴对的分离与复合过程。电子和空穴的复合会产生能量，激活 Cr^{3+} 产生 ML 发射。 Cr^{3+} 对和缺陷诱导的电子杂化能够在能带内产生中间态，这有利于电子从缺陷态转移到 Cr 态 (图 2)。该近红外 ML 材料具有优异的循环稳定性、光电响应和优异的生物组织穿透性。结合多模态信号输出，本研究设计了一种多层光学传感器来实现生物应力的检测。将多模态信号与人工神经网络算法相结合，实现全方位的生物成像与传感交互 (识别率 96.33%) (图 3)。本研究工作不仅提供了一种高重复性的近红外 ML 荧光粉，而且为材料-性能-器件的合理设计建立了一体化的思维模式。

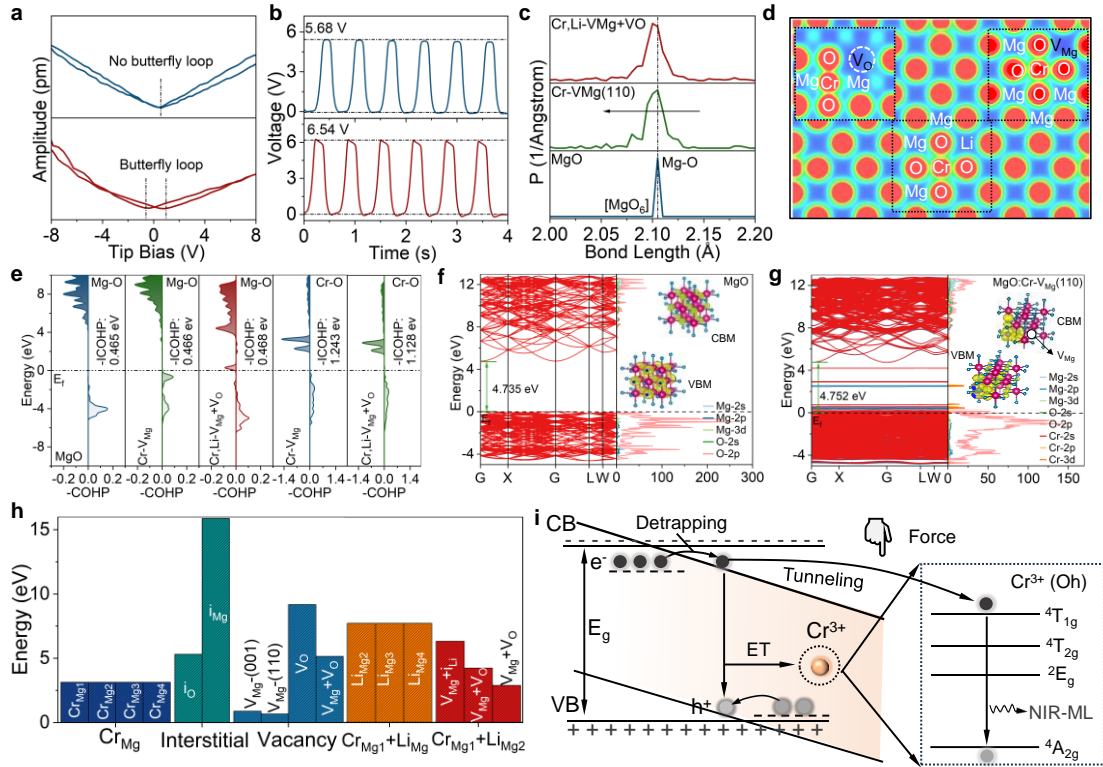


图2 (a) $\text{Mg}_{0.999}\text{O}:0.001\text{Cr}^{3+}$ 和 MgO 的 PFM 的振幅和蝴蝶曲线 (b) $\text{Mg}_{0.999}\text{O}:0.001\text{Cr}^{3+}$ 和 MgO 的稳定电压输出 (c) 不同的计算模型下的 Mg-O 键长分布 (d) 电荷分布的二维切片 (e) 不同模型下的 COHP 曲线 (f) MgO 的能带、电子态密度和费米能级 (g) $\text{MgO}:\text{Cr}$ 的能带、电子态密度和费米能级 (h) 不同类型缺陷的形成能 (i) ML 机理示意图

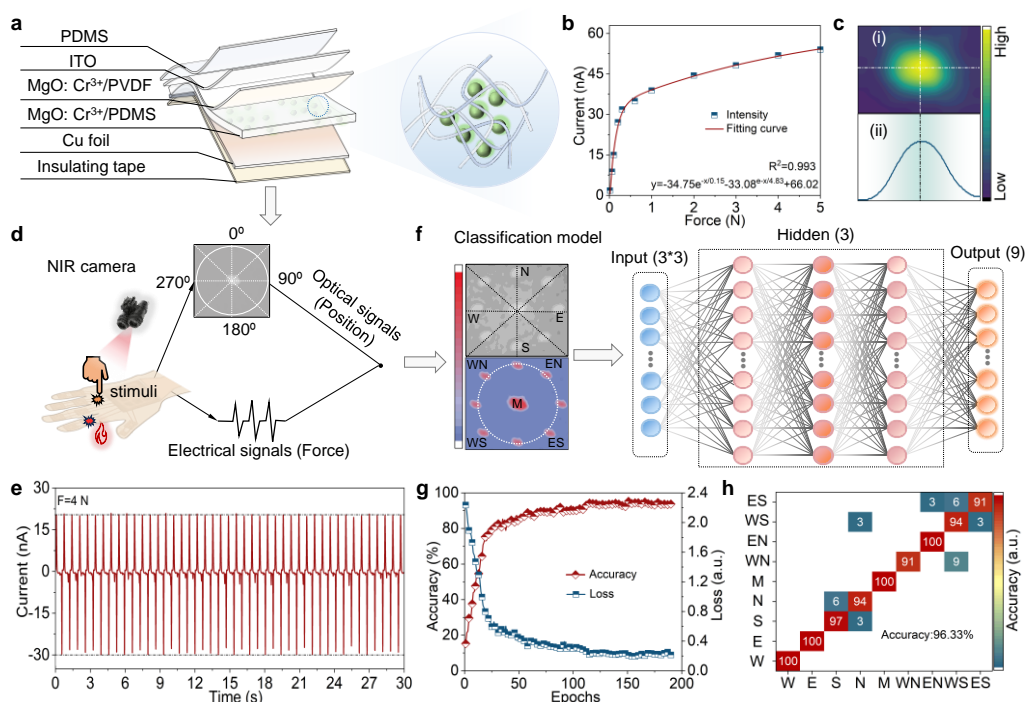


图3 (a) 多层结构传感器: $\text{MgO: Cr}^{3+}/\text{PDMS}$ 和 $\text{MgO: Cr}^{3+}/\text{PVDF}$ 被包裹在铜膜和 ITO 膜 (b) MgO: Cr^{3+} 的稳定电流输出从 0.01 到 5N (c) 光学信号输出的传感器 (d) 多层柔性结构中的原位光电输出原理图以及相应概念验证触觉传感系统的应用 (e) 在持续机械刺激下传感器的电学循环测试 (f) 九个不同位置的 ML 图片以及相应的二维空间光学映射和神经网络架构 (g) 识别准确率和损失函数。(h) 九个不同位置的预测的混淆矩阵

相关研究成果以“*Synergistic Optimization Between Chromium Local Coordination States Toward Self-Powered High-Repeatability Near-Infrared Mechanoluminescence*”为题发表在 *Advance Science* 上, 其中通讯作者为甘久林研究员和香港大学熊普先博士后, 共同第一作者为肖密博士生和刘高超博士生, 该研究工作得到了广东省重点研发计划项目和国家自然科学基金的资助。

原文链接: <https://doi.org/10.1002/advs.202518364>

前沿交叉

甘久林研究员团队：面向活体手术：液晶弹性体光纤驱动器实现内窥导航和激光消融治疗

液晶弹性体（LCE）作为一种备受关注的新型智能材料，在光热驱动模式下展现出非接触操控、高时空精度及抗电磁干扰等独特优势，尤其适用于生物医学领域。然而，该技术的临床转化仍面临两大关键挑战：一是传统 LCE 的相变温度多高于 80°C，存在组织热损伤风险；二是依赖自由空间光路的驱动方式在人体内部等封闭环境中难以有效实施。

近日，华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室的甘久林研究员团队利用低温相变的光热响应 LCE 光纤，实现生理温区适配、生物组织内的安全驱动。该 LCE 光纤首次应用同轴挤出技术获得芯-包结构，实现了超低光学损耗、大驱动应变的同时保持生物适应的低表面温度。结合标准医用内窥镜部件，利用 LCE 光纤的可逆致动性能，可为内窥镜提供转动弯曲的动力，实现了大鼠和兔子活体体内的肠道内窥导航和激光消融治疗，极大地拓展柔性致动器在生物医疗领域的应用。

为了解决光热响应驱动液晶弹性体的生物医疗应用瓶颈，本研究通过分子设计和光子工程合成低温相变 LCE 以克服这些困难。首先，通过调节交联密度和介晶单体的浓度优化，硫醇-烯交联的 LCE 网络在 37.6°C 实现生物相容相变。其次，利用同轴挤出制备低损耗的 LCE 光纤（传光损耗 $<0.76\text{ dB cm}^{-1}$ ），使其具有

完整芯-包光波导结构。最后，通过耦合石英光纤传输近红外激光实现远程驱动，在保持表面温度低于 48 °C 的同时实现至少 30% 的大收缩应变。低温 LCE 光纤可代替传统医用内窥镜，实现体内探索与内窥导航。若干根光纤与内窥镜、高能激光光纤等有机集成为新型柔性内窥系统，先在体外测试其驱动性能，证实了该系统具有>94°的全向弯曲能力。将该系统通过微创手术推进至大鼠和兔子活体的肠道内，验证其由激光引导的内镜导航和通过光热控制消融肿瘤的能力。本研究展现了 LCE 光纤的低温驱动特性与封闭空间内活动的优势，将柔性光热驱动与生物适配的机械性能相结合，实现在狭小解剖空间中安全且精确的干预。

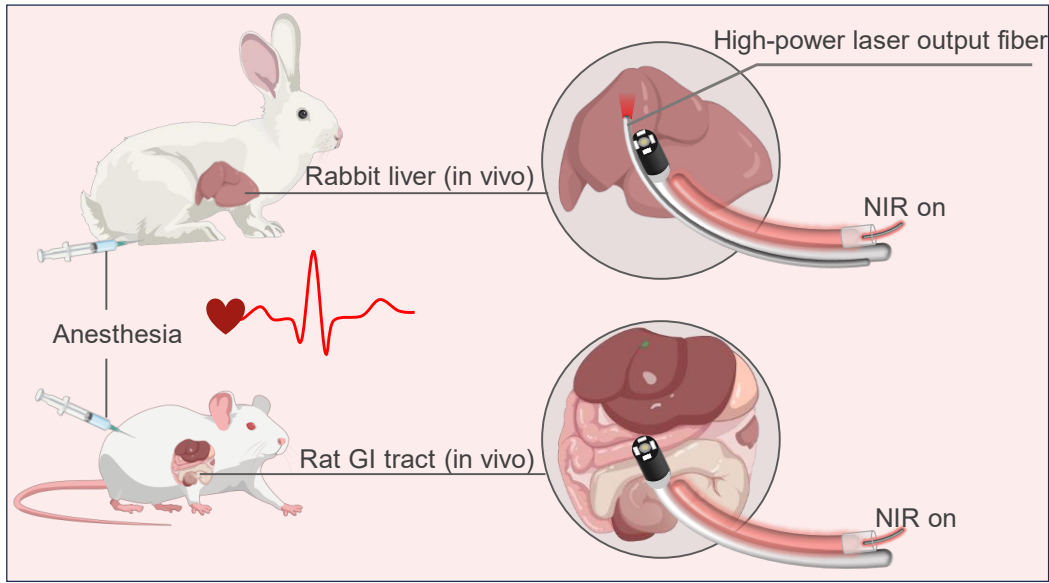


图 1 低温驱动 LCE 光纤在生物活体体内进行内窥导航与激光消融

相关研究成果以“*Biocompatible Liquid Crystal Elastomer Optical Fiber Actuator for In Vivo Endoscopic Navigation and Laser Ablation Therapy*”为题发表在 *Advanced Materials* 上，其中通讯作者为甘久林研究员、杨中民教授，第一作者为罗佳佳硕士生、刘

灏琚博士生。该研究工作得到了国家自然科学基金、广东省重点研发计划和 TCL 科技创新基金的资助。

原文链接：<https://doi.org/10.1002/adma.202516047>

甘久林研究员团队：液晶弹性体人工肌肉光纤实现多模态驱动与精确操控

光驱动人工肌肉响应外界刺激并产生可控形变与运动，具备非接触控制、响应快速以及抗电磁干扰等优势。然而，当前光驱动人工肌肉仍依赖外部空间光进行侧面照射，在实际操作中往往需要光源随动定位，导致光照分布不均、系统稳定性不足，尤其在封闭或狭窄空间内失效，严重制约了其驱动的可靠性与精准度。

近日，华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室的甘久林研究员团队利用基于液晶弹性体的柔性致动光纤，实现了将光传输与光驱动集成于同一根光纤器件上，使之同时具有高驱动应变、低传光损耗和大运动范围。通过集成多根致动光纤得到具有多模态运动的仿生机械臂，实现多向弯曲、可控收缩与大幅度扭转等运动状态，突破了光驱动人工肌肉运动场景的限制，有望拓展柔性致动器、仿生机器人和生物医疗领域的应用。

为了解决光驱动人工肌肉无法深入封闭空间的限制，我们提出一种新型的智能响应柔性光纤，使其同时具有光纤传输功能与光热驱动性能。该柔性光纤的纤芯为光热响应驱动的液晶弹性体纤维，结合两步法和套管法制备得到，包层的材料是折射率较低的透明弹性体，通过旋涂法均匀地包覆于纤芯表面。将液晶弹性体光纤的纤芯与石英光纤横截面端对端耦合，激光沿石英光纤从

激光器直接输入至液晶弹性体光纤内，极大地降低了光泄露和光损耗，提高激光的利用效率。通过调节液晶单体与光热响应掺杂剂的比例，液晶弹性体光纤可以实现低至 0.37dB/cm 的低传输损耗与高于 5 cm 的长传输距离，突破了众多柔性光波导驱动器的缺陷：驱动范围短及运动模式受限。液晶弹性体光纤在受到光纤输入的近红外光刺激下，能够产生 $>40\%$ 的收缩应变，得益于其高有序参数 (0.65)。在大负载（超过 4000 倍自重）的情况下，其依然能够产生 $\approx 20\%$ 的收缩应变，展示了其高工作能力。通过设计组装，将液晶弹性体光纤集成具有多种运动模态的柔性仿生机械臂。如，由四根柔性光纤集成的收缩人工臂可以获得驱动应力的大幅提升。基于液晶弹性体光纤的扭转臂可以实现超过 180° 的大范围扭转，通过调控输入光功率可精确控制旋转角度。此外，通过集成液晶弹性体光纤和柔性支撑柱，设计并制备了一个可以达到多向弯曲的柔性机械臂，通过时域控制不同方位的光纤输入激光功率，实现了弯曲方向的自定义与精确操控。为了展示液晶弹性体光纤作为人工肌肉的独特优势，将液晶弹性体光纤集成于仿生手掌，埋入柔性皮肤之下，以模拟人的骨骼肌在身体内的活动，通过时空调控输入，使仿生手能够产生类似人手的抓取、抓握保持与定点释放等复杂动作。另外，为了进一步展示液晶弹性体光纤在封闭环境中使用的优异特性，将液晶弹性体光纤、微型内窥镜、高能激光输出头和持物钩等功能部件合理地组装，集成为管内操控系统。该系统可深入幽闭试管内部，由内窥镜观察管内情况，液晶弹性体光纤带动系统产生相应的运动，实现了管道内激光写字、分岔管道的物件移位等需要精确操控和深入内部的高难

度复杂任务。可见，液晶弹性体光纤作为人工肌肉能够被精确操控以完成大幅度驱动，通过设计与组装，还能实现多模态运动和封闭环境内的复杂操作。

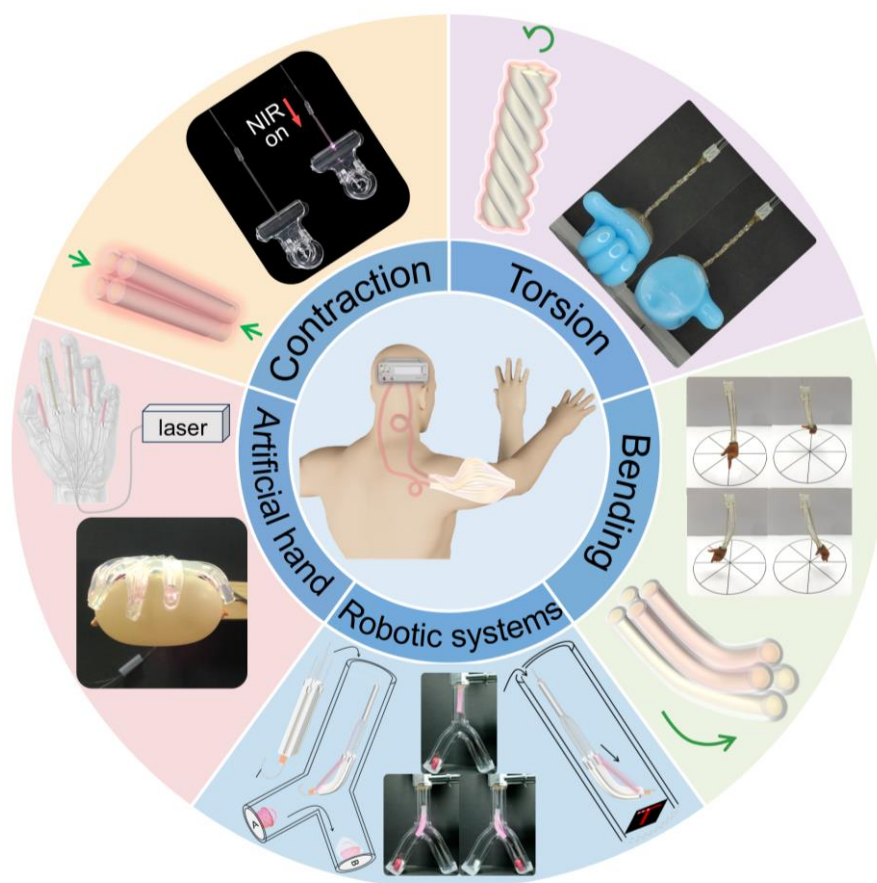


图 1 液晶弹性体光纤实现多模态运动与复杂环境中的精准操纵

相关研究成果以“*Multimodal actuation and precise control in liquid crystal elastomer optical fiber artificial muscles*”为题发表在 *Advanced Materials* 上，其中通讯作者为甘久林研究员、杨中民教授，第一作者为刘灏珺博士生。该研究工作得到了国家自然科学基金、广东省重点研发计划、广州市重点研发项目的资助。

原文链接：<https://doi.org/10.1002/adma.202505776>

李志远教授团队：库仑力驱动 “分子-热点” 自发配对赋能单

分子拉曼光谱检测

单分子层面的分子探测与识别是分子科学、化学分析和生物医学领域长期追求的目标。由于拉曼散射本征截面极小，传统拉曼光谱难以实现单分子灵敏度。尽管表面增强拉曼散射技术（SERS）在一定程度上提升了信号强度，但热点分布随机、分子进入热点概率低以及荧光背景干扰等问题，严重制约了其在真实复杂体系中实现稳定、可重复的单分子检测与识别能力。

近日，华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室李志远教授团队，提出并实现了一种基于库仑吸引力驱动“分子-热点”自发配对机制的电磁-化学协同增强新型单分子表面增强拉曼光谱（SM-SERS）策略，实现了对多种分子的单个可视、逐个计数、精准鉴别，有望拓展拉曼光谱在分子科学、新材料、医学、药学、农学等领域前沿应用。

该研究围绕单分子拉曼光谱面临的三大核心难题——信号增强不足、分子-热点耦合随机性以及荧光背景干扰展开系统性突破。研究团队构建了一种由金纳米球颗粒-金镜等离激元纳米间隙与单层二维半导体材料（WS₂）复合组成的单分子 SERS 检测基底，实现了电磁增强与化学增强在同一纳米腔内的协同增强。

在该体系中，金纳米间隙产生的强局域等离激元场可提供高达 10^9 – 10^{11} 量级的电磁增强，而单层 WS₂ 通过其能带结构与分子轨道之间的电荷转移共振，进一步显著放大分子的有效拉曼极化率，从而引入额外 4–5 个数量级的化学增强。两种机制的协同作

用，使整体拉曼增强因子达到 $\sim 10^{14}$ - 10^{16} 量级，成功进入单分子水平检测区间。

更为关键的是，研究揭示了一种库仑吸引力驱动的分-热点自发配对机制。实验表明，目标拉曼分子在 WS_2 表面表现出正的表面电势，而金纳米球颗粒带负电荷，二者之间的静电吸引可诱导金纳米球颗粒自发、精准地落位到已吸附分子正上方，形成高度稳定的一对一分子-热点构型。这一机制从根本上解决了传统 SERS 中分子随机进入热点、概率极低的关键瓶颈，使得大面积、高均匀性的单分子拉曼活性位点成为可能。

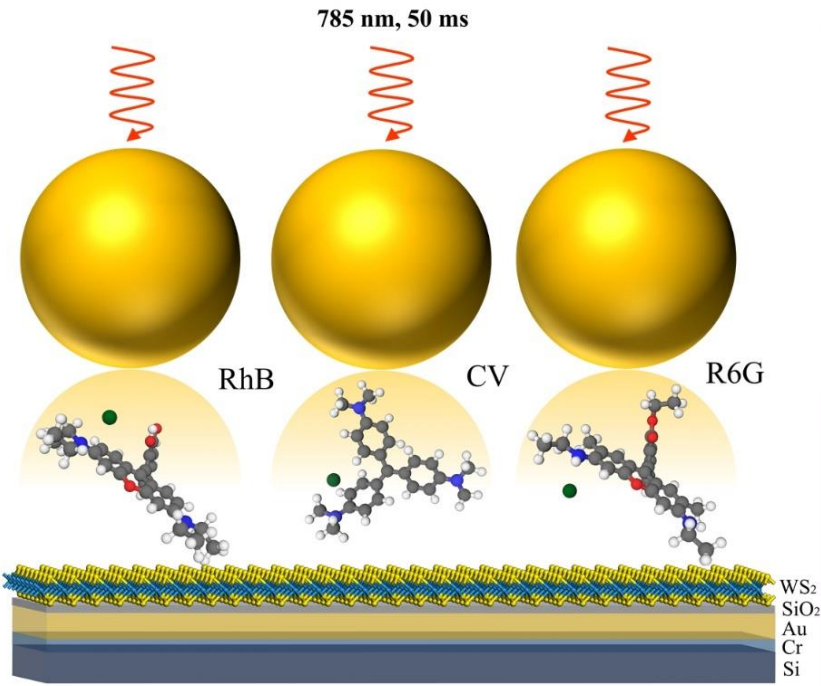


图 1 三种混合分子的 SM-SERS 拉曼检测与识别示意图

此外，研究采用 785 nm 近红外激光激发，可以有效抑制荧光背景信号的产生，同时在极低浓度 (10^{-16} M) 条件下仍可在 50 ms 内获得高信噪比的单分子拉曼指纹。借助该平台，研究团队不仅实现了罗丹明 B、罗丹明 6G 和结晶紫等分子的单个可视和

逐个计数，还首次在混合体系中完成了不同分子的快速区分与精准识别，达到了传统光学技术在分子混合物单分子检测方面的能力极限。该单分子 SERS 基底的发明有望为单分子在环境和外场变化下的物理和化学过程的超灵敏光学检测提供了前所未有的强有力技术手段。

相关研究成果以 “*Coulomb Attraction Driven Spontaneous Molecule-Hotspot Pairing Enables Universal, Fast, and Large-Scale Uniform Single-Molecule Raman Spectroscopy*” 为题发表在 *Opto-Electronic Advances* 上，以 “*Seeing, Counting, Identifying, and Distinguishing Single Molecules from Their Mixtures via Raman Spectroscopy*” 为题发表在 *Nano Letters* 上，其中通讯作者为华南理工大学李志远教授，第一作者为洪丽红博士后。该研究工作得到了国家自然科学基金（12434016），广东省科学技术项目（2020B010190001）等科研项目的资助。

原文链接：

<https://doi.org/10.29026/oea.2025.240309>

<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5c03057>

仪器设备

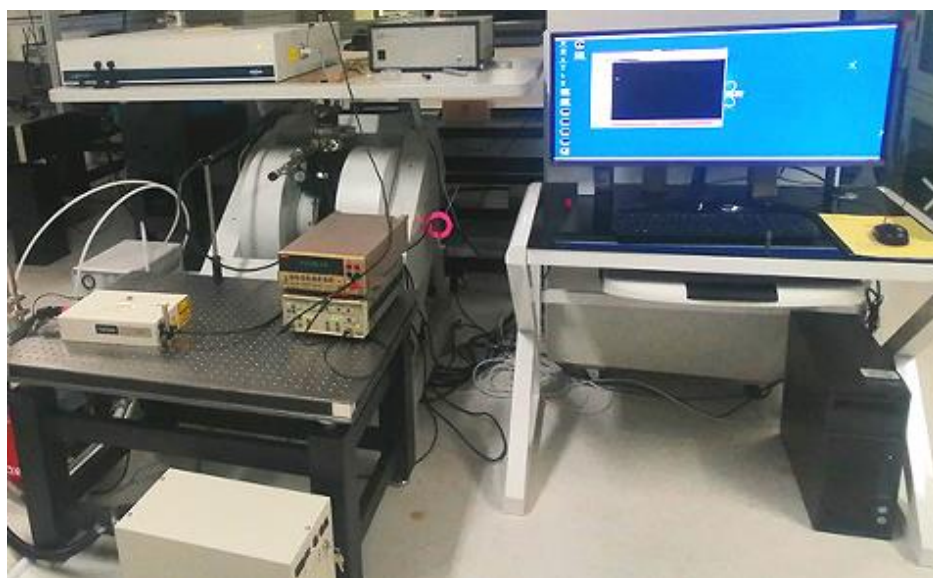
脉冲/瞬态电子自旋共振仪

●仪器信息

品牌：Bruker

型号：E580

放置地点：华南理工大学北区科技园 1 号楼 S102A 室



●应用领域

化学、材料、生物、量子信息等领域，用于分析生物/化学分子的结构、配位环境分析、蛋白质/RNA/DNA 结构解析和快速动力学过程研究，也用于量子计算研究，测量自旋弛豫时间测量、零场分裂的测量、高自旋态等。

●功能简介

1. 稳态 EPR，获得超精细耦合、 g 因子信息；
2. 瞬态 EPR，获得自旋极化情况下谱图信息；

3.脉冲 EPR，获得自旋动力学、零场分裂等参数。

●技术参数

1.测试模式：脉冲、瞬态、稳态

2.微波频率：9.2-9.9 GHz（X 波段）

3.光源：355、532nm，10-15Hz

4.温度范围：2.5-300 K（常用液氮制冷，80-300K）

5.微波衰减：0 ~60 dB，步长：1 dB；

6.时间分辨率：优于 2 ns

7.样品腔类型：高 Q 谐振腔、MD5 谐振腔、MS3 谐振腔

●送样要求：

1.粉末，稀溶液和薄膜样品；

2.建议采用石英级别的核磁管密封样品以隔绝水氧；

3.若有特殊要求请联系负责人。

●预约方式：

1.大仪预约平台：<https://yqgxgl.scut.edu.cn>

2.预约咨询微信群：



3.收样地点：华南理工大学北区科技园 1 号楼 S102A 室；

境内外来访参观与学术交流

●12月2日，大湾区科创科普考察研讨班一行来发光材料与器件全国重点实验室参观调研。实验室副主任夏志国热情接待了调研组，并向调研组详细介绍了实验室整体情况。

●12月4日，常州市委组织部副部长、市委人才办主任吴寅一行来发光材料与器件全国重点实验室参观调研。实验室副主任周玉热情接待了调研组，王剑斌老师向调研组详细介绍了实验室整体情况。

●12月16日，陕西高校技术转移中心研修班一行来发光材料与器件全国重点实验室参观调研。实验室王剑斌老师热情接待了调研组，并向调研组详细介绍了实验室整体情况。

●12月15日，西湖大学刘志常教授，在全重 501 学术报告厅作“分子张力工程”学术报告。报告主要介绍其课题组利用张力作为调控手段，通过开发以分子弓（弓形张力大环）为代表的张力分子体系，主要集中在：通过张力诱导的构象调控多维超结构分级组装；运用张力精准调控反应进程和选择性；利用张力调控分子的物理化学性质等系列研究工作。

●12月11日，美国南佐治亚大学王笑军教授，在全重 301 中心会议室作“Unlocking the Potential of Up-Conversion Charging for Information Storage in Phosphors”学术报告。报告主要介绍其课题组提出的一种上转换充电（UCC）方法，该方法可在钆镓石榴石:铬³⁺（Gd₃Ga₅O₁₂:Cr³⁺）荧光材料中实现快速、高分辨率的数

据存储。并阐述了这种方法的优点：提升了记录效率；具备长期数据保留能力；优异的可重写性。

●12月16日，法国索邦大学 André-Jean Attias 教授，在全重 501 学术报告厅，作“Necessary and sufficient condition for efficient organic room-temperature phosphorescence from host-guest doped crystalline systems”“2D host-guest supramolecular chemistry for an on-monolayer graphene emitting platform”系列学术报告，分别介绍其课题组聚焦于长寿命室温磷光（RTP）有机材料以及分子发色团与石墨烯的电子解耦系列研究。

●1月5日，德国于利希研究中心彭子键博士，在全重 402 会议室作“高通量手段加速钙钛矿太阳能电池的老化研究：从能量损失到失效机理”学术报告。报告围绕钙钛矿器件在光和热的加速老化条件下的性能衰减问题，系统探究了薄膜、半器件和完整器件中能量损失与失效机理的演变过程。重点介绍了高通量测试、成像表征与数据分析在钙钛矿稳定性研究中的应用，展示自动化实验与数据驱动方法的结合，加速稳定钙钛矿材料与器件结构的发现与优化。

●12月30日，华南师范大学樊贞研究员在光电楼 211 会议室作“面向类脑计算的铁电突触和压电神经元”学术报告。报告主要介绍课题组聚焦于利用铁电材料中的特有原理构筑新型人工神经元和突触器件，在人工突触方面和人工神经元方面取得的系列研究进展。