

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 4 期

(总第 92 期)

华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室编

2025 年 5 月 9 日

新闻动态

- 成都市委常委、组织部部长邓涛一行来实验室参观调研..... 1
- 江苏省生产力促进中心纪委书记凌家俭一行来实验室参观调研..... 2
- 筑牢科研安全防线 实验室开展节前安全专项检查..... 3

研究进展

发光理论与机制

- 赵祖金教授团队：羰基/氮多重共振分子的自旋翻转过程中高能激发态解析..... 4
- 苏仕健教授团队：含硒给受体体系中的电荷转移态实现高效纯有机室温磷光..... 7
- 苏仕健教授团队：高效窄光谱 OLED 材料设计及效率滚降抑制..... 9

有机光伏材料与器件

- 李宁教授团队：高效钙钛矿太阳能电池的环境友好型反溶剂的高通量识别方法..... 11

新型显示、探测与成像

- 夏志国教授团队：光谱可调的 $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ 近红外荧光透明陶瓷用于激光驱动光源探测..... 14

仪器设备

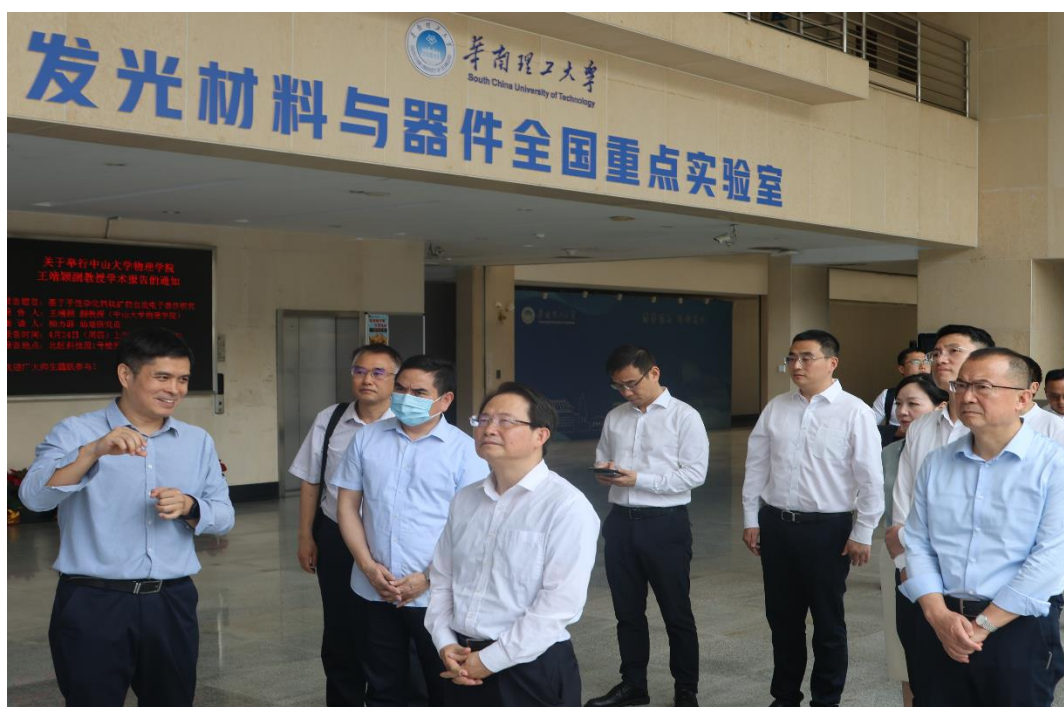
- 磁光克尔测量与显微成像系统..... 18

- 境内外学术交流来访..... 21

新闻动态

成都市委常委、组织部部长邓涛一行来实验室参观调研

4月23日上午，成都市委常委、组织部部长邓涛一行来发光材料与器件全国重点实验室参观调研。



邓涛部长参观实验室

实验室副主任夏志国教授对调研组的来访表示热烈的欢迎，并向调研组介绍了实验室的整体情况，近年来在队伍建设、承担科研项目、研究方向等方面取得的成绩。

调研组参观了实验室的成果展示厅。夏志国为邓涛一行介绍了指纹快速显现试剂、毒品检测试剂盒、高性能单频光纤激光、Micro-LED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。

调研组对实验室取得的原创性成果给予了高度的赞赏。

江苏省生产力促进中心纪委书记凌家俭一行来实验室参观调研

4月21日下午，江苏省生产力促进中心纪委书记凌家俭一行来发光材料与器件全国重点实验室参观调研。



凌家俭书记参观实验室

实验室副主任夏志国教授对调研组的来访表示热烈的欢迎，并向调研组介绍了实验室的整体情况，近年来在队伍建设、承担科研项目、研究方向等方面取得的成绩。

调研组参观了实验室的成果展示厅和小角测试公共平台。夏志国为凌家俭一行介绍了指纹快速显现试剂、毒品检测试剂盒、高性能单频光纤激光、Micro-LED显示和热激子蓝光材料等成果的研究背景及应用。

调研组对实验室各方面取得的成绩给予了高度的赞赏。

筑牢科研安全防线 实验室开展节前安全专项检查

4月29日，为落实学校相关工作要求，进一步加强实验室安全管理，消除隐患，保障“五一”假期期间实验室安全平稳运行，发光全重实验室副主任苏仕健、秦安军分别带队，由行政负责人、楼层安全监督员、物业管理人员等组成11人专项检查组，对实验室安全分级为一、二、三、四级的113间实验室展开节前安全专项检查。



检查组重点核查了危险化学品管理、气体管理、用电安全、化学废弃物、个人防护、消防安全等六大类安全指标，检查出存在安全隐患的实验室45个，共101条。全重发光实验室通过“检查-反馈-整改-复查”闭环机制，建立专项台账跟踪限期整改事项，将加大对实验室特别是一、二级实验室的安全检查力度，此次收到整改通知的实验室均要求限期整改，实验室安全检查小组将进行复查。

“安全是科研工作的生命线”，全重始终将实验室安全作为重点工作常抓不懈，秉持“时时放心不下”的责任感，把安全隐患排查纳入日常管理工作，为承担国家重大科研项目提供坚实环境保障。

研究进展

发光理论与机制

赵祖金教授团队：羰基/氮多重共振分子的自旋翻转过程中高能

激发态解析

涉及多个激发态的自旋翻转过程对许多有机分子的功能化应用起着关键作用。由于高能激发态往往通过各种电子跃迁快速失活，因此获得高能激发态参与自旋翻转的直接实验证据是极具挑战性的。

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课题组通过对羰基/氮多重共振分子的对称性的调控，降低高能激发态跃迁速率，成功检测到参与自旋翻转的高能激发态，验证了高能激发态在电子自旋翻转过程中的介导作用，为多重共振分子光物理过程的验证打开新思路。

因此，该工作的目的是获得高能态介导自旋翻转过程的直接实验证据，并验证高能态在该过程发挥的作用。

由于羰基的孤对电子所在的 n 轨道可参与激发态的跃迁，促进电子自旋翻转，该研究设计选用羰基-氮作为多重共振骨架，制备了具有 C_{2h} 对称性的稠环多重共振分子 (*anti*-DIQA0)，并采用具有 C_{2v} 对称性的 *syn*-DIQA0 作为对照。和 *syn*-DIQA0 相比，*anti*-DIQA0 更高的结构对称性很大程度上降低了激发态的跃迁速率。因此，在自旋翻转跃迁过程中，*anti*-DIQA0 能在高能

激发态停留较长时间，从而实现系间窜越、反向系间窜越和内转换过程的探测。

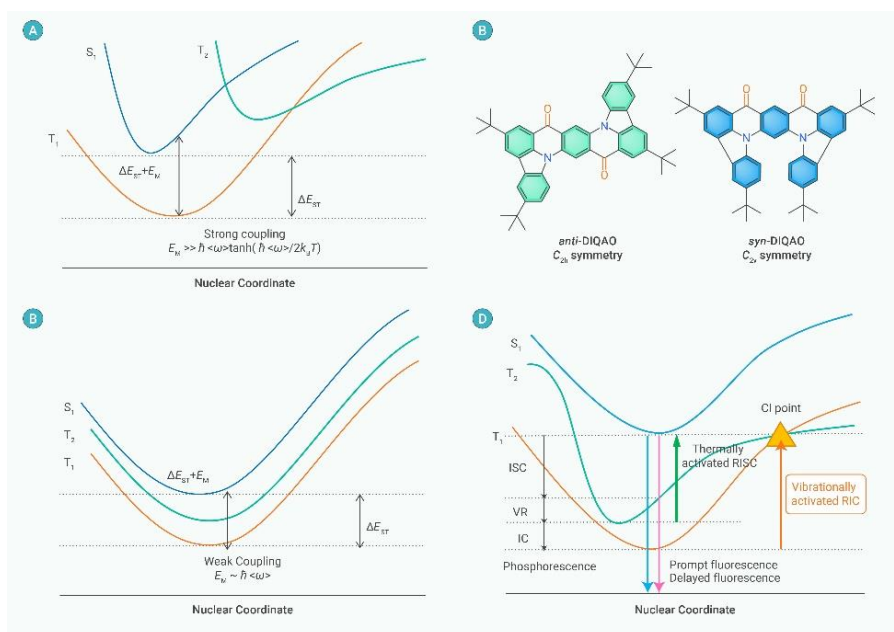


图 1. 分子设计思路导图

作者通过多种实验测试手段实现了 *anti*-DIQA0 的中间态光物理过程的检测。首先，在 77 K 低温时间分辨发射光谱中可以观察到除了 S_1 和 T_1 态之外的长寿命激发态的存在，该激发态和 S_1 态能级接近，且在该长寿命激发态与 T_1 态之间未检测到其它激发态的存在，因此该激发态被归属为第二激发三线态 (T_2)。此外，该简并三线态 T_2 态的发射可直接通过肉眼观测。在 365 nm 紫外灯照射下，分子表现为绿色荧光发射，关闭紫外灯后，绿光亮度逐渐增强，随后转变为红光，并且该现象在甲苯溶液及掺杂薄膜中均可观察到，表明 S_1 态至 T_1 态的转变首先经过 S_1 态至 T_2 态的 ISC 过程，再进行 T_2 态至 T_1 态的内转换，从而实现 S_1 态和 T_1 态的自旋翻转。该过程也通过飞秒瞬态吸收光谱得到验证。然而，在 C_{2v} 对称性的 *syn*-DIQA0 中 T_2 态无法通过实验检测。总的来说，

结合稳态和瞬态光谱,证明了 T_2 态在多重共振分子的自旋翻转过程中的介导作用。

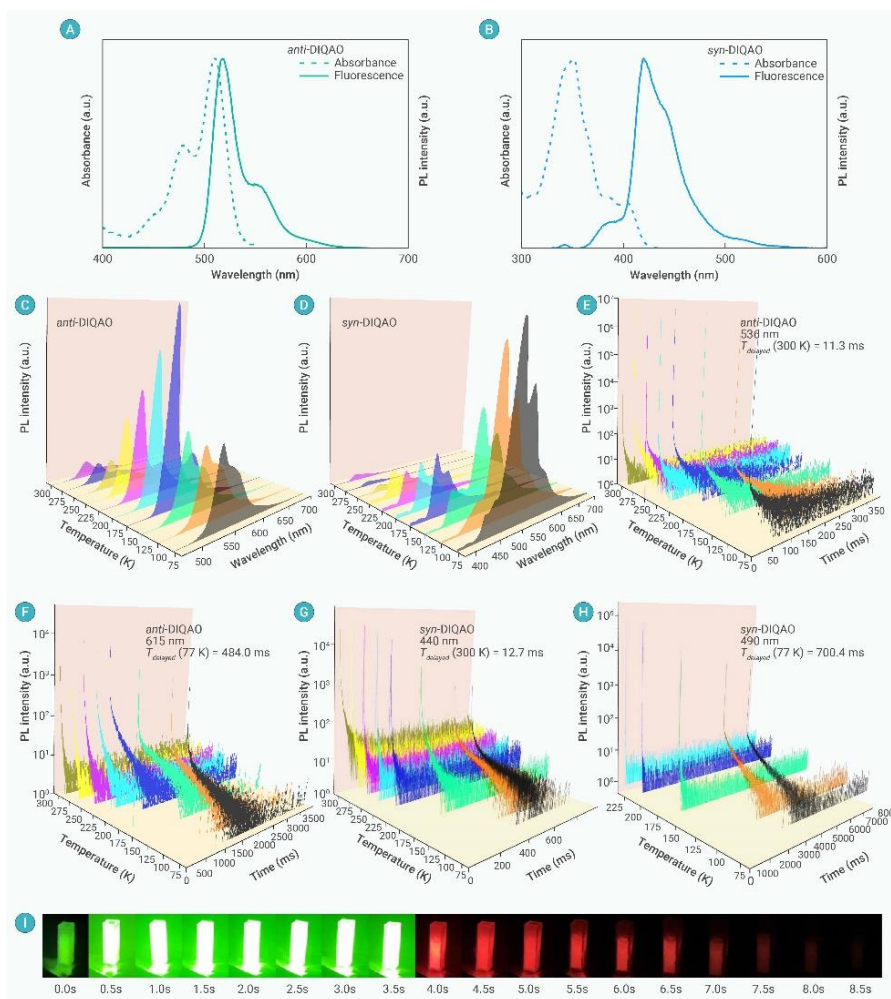


图 2. 稳态及瞬态发光表征

为了探究 *anti*-DIQA0 的电致发光特性, 作者将该分子作为发光客体应用于有机发光二极管(OLED)中, 通过和主体材料(CBP)搭配, 制备了窄光谱绿光 OLED 器件, 发射波长位于 536 nm, 半峰全宽为 34 nm, 外量子效率为 19.6%; 借助敏化工艺, 将 4CzIPN 用作敏化材料, 通过敏化材料和发光客体间高效的 Förster 能量转移, 外量子效率成功提升至 32.6%, 高亮度下的效率滚降也得到抑制, 是同期报道的羰基-氮多重共振分子的最佳电致发光性能之一。

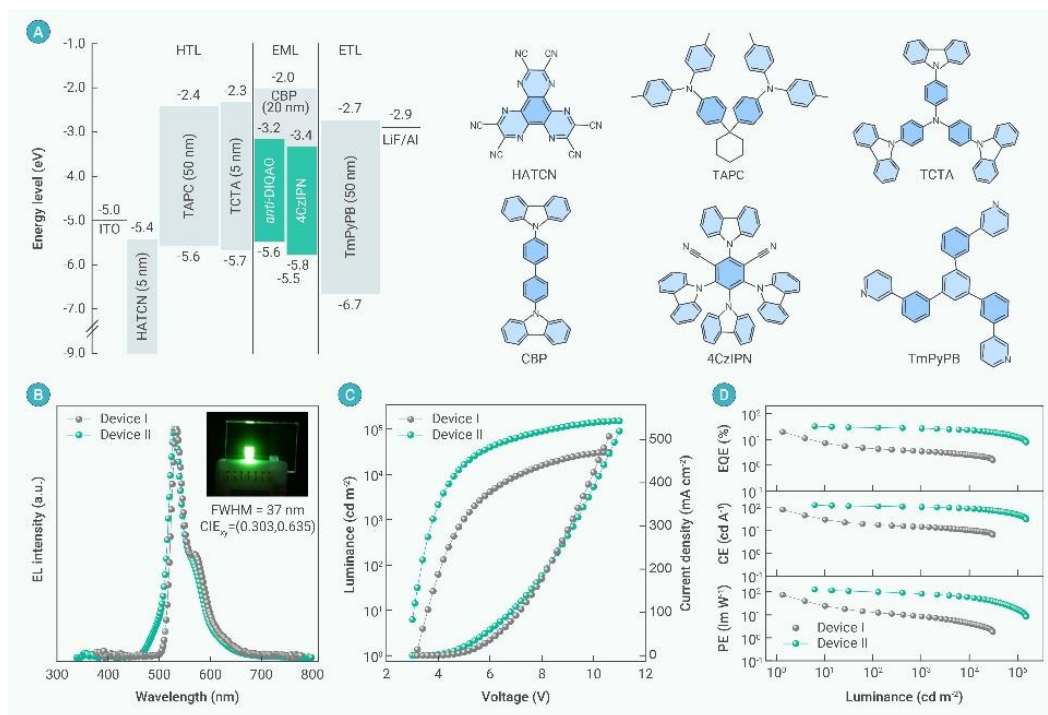


图 3. 电致发光性能表征

相关研究成果以“*Deciphering intermediate excited states in spin-flip transition in carbonyl-nitrogen multi-resonance molecule*”为题发表在 *The Innovation Materials* 上，其中通讯作者为赵祖金教授，第一作者为付燕博士和庄凝硕士。该研究工作得到了国家自然科学基金(22375066、U23A20594)和广东省基础与应用基础研究基金(2023B1515040003)等的资助。

苏仕健教授团队：含硒给受体体系中的电荷转移态实现高效纯有机室温磷光

重金属配合物磷光材料因其高效的系间窜越与三线态发射特性，已广泛应用于 OLED 器件。相比之下，纯有机磷光材料由

于缺乏重原子效应，实现高效的三线态激发态利用面临显著挑战。发展无需重金属元素、具备高效室温磷光性能的纯有机发光体系，亟需构建合理的分子设计策略和激发态调控机制，以提升其发光效率与稳定性。

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含硒给受体体系中的电荷转移态，实现了纯有机材料中的高效室温磷光，有望拓展其在 OLED 领域的应用。

分子的构象往往会影响其激发态特性。在给体受体型的室温磷光材料中，不同的给受体间扭转角还没有被研究。我们通过结合含硒给体吩噻硒与含硒受体硒吨酮实现了高效的纯有机室温磷光材料，SeXPXSe。并且进一步探讨了其扭转角对自旋轨道耦合作用的影响。基于理论计算，我们发现当给受体间扭转角趋近 90° 时， T_1 与 S_0 间的自旋轨道耦合作用逐渐变小，而当扭转角趋于 0° 时， T_1 与 S_0 间的自旋轨道耦合作用逐渐增强。在 90° 的构象下，分子的 T_1 局域于含硒受体上，给体上的硒原子不参与跃迁，从而导致了重原子效应较弱，并且不利于轨道角动量变化。而在 0° 的构象下，分子的 T_1 离域分布于整个分子，并呈现弱电荷转移态，从而促进了重原子效应，并且引入了额外的轨道角动量变化。因此，更加平面的给受体构象更加有利于自旋轨道耦合作用。在 SeXPXSe 中，其最优构象的扭转角为 35° ，较小的扭转角有效促进了自旋轨道耦合作用，从而实现了高达 60% 的磷光量子效率以及 2.6 ms 的短磷光寿命，并且在纯有机磷光 OLED 中实现了 14.7% 的外量子效率以及高达 81.7% 的激子利用率。通过以上研究，我们明确揭示了在给受体型的室温磷光材料中平面电荷转移

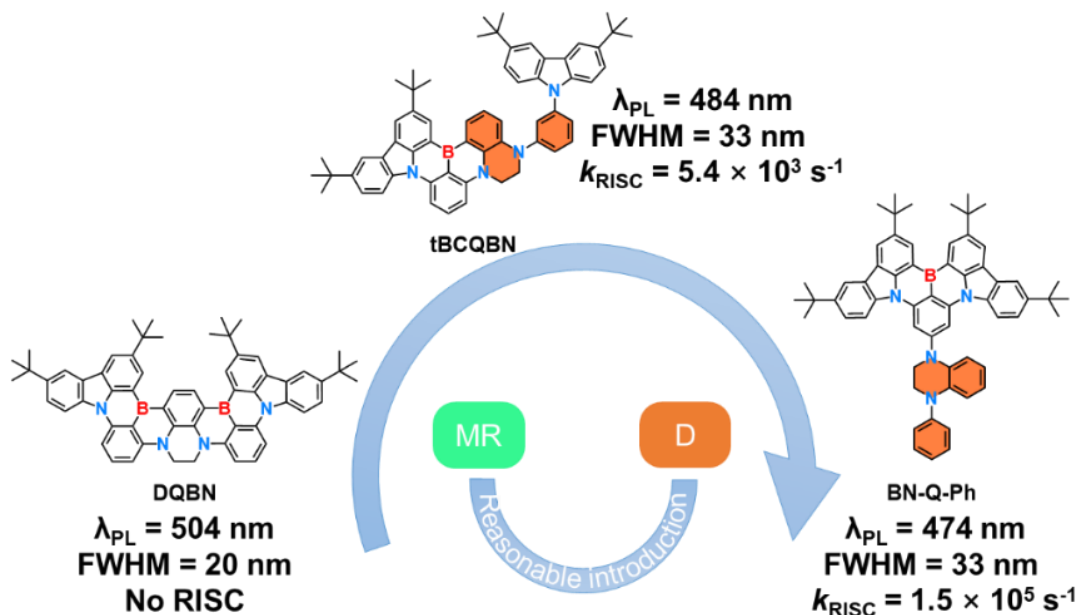
率低，器件在高亮度下效率滚降显著。如何平衡窄光谱特性与高效 TADF 性能，是 OLED 材料设计的核心挑战。

近日，华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室的苏仕健教授课题组通过结合给体四氢喹啉 (THQX) 和硼氮多重共振结构，实现了高效窄谱带蓝绿光发射，并显著抑制了效率滚降 (1000 cd m⁻² 亮度下效率保持为 19.0%)，为高性能 OLED 材料开发提供了参考。

MR-TADF 材料通常由于 ΔE_{ST} 过大导致 RISC 速率低，三线态激子聚集猝灭引发效率滚降。团队创新性地将给体 THQX 通过不同方式与硼氮多重共振结构结合，调控分子内电荷转移特性，得到了三种硼氮基发射体 (DQBN、tBCQBN、BN-Q-Ph)。其中，DQBN 具有对称双硼结构，但由于较大的 ΔE_{ST} (0.28 eV) 几乎没有延迟荧光，tBCQBN 具有非对称单硼结构引入了部分长程电荷转移 (LRCT)，缩小 ΔE_{ST} 为 0.05 eV，从而实现了高效 TADF。BN-Q-Ph 通过外围 THQX 连接增强 LRCT 成分，使 S₁ 与高能 T₂ 态之间的自旋轨道耦合显著提升，RISC 速率达 $1.5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ (较 tBCQBN 快两个数量级)。基于 BN-Q-Ph 的 OLED 器件实现了 476 nm 处半峰宽为 36 nm 的窄光谱发射，最大外量子效率为 28.7%，在 1000 cd m⁻² 下仍保持 19.0% 的外量子效率，改善了效率滚降问题。这项研究工作通过精准调控给体与 MR 结构的结合，为高色纯度、

低效率滚降的 OLED 器件开发提供了思路。

相关研究成果以 “*Enhancing TADF Emission and Mitigating Efficiency Roll-off in OLEDs via Reasonable*



Tetrahydroquinoxaline-Integrated Organoboron Based Emitters” 为题发表在 *Journal of Materials Chemistry C* 上，其中通讯作者为苏仕健教授，第一作者为谢洪伟硕士生。该研究工作得到了国家重点研发计划、国家自然科学基金及博士后创新人才支持计划项目的资助。

有机光伏材料与器件

李宁教授团队：高效钙钛矿太阳能电池的环境友好型反溶剂的高

通量识别方法

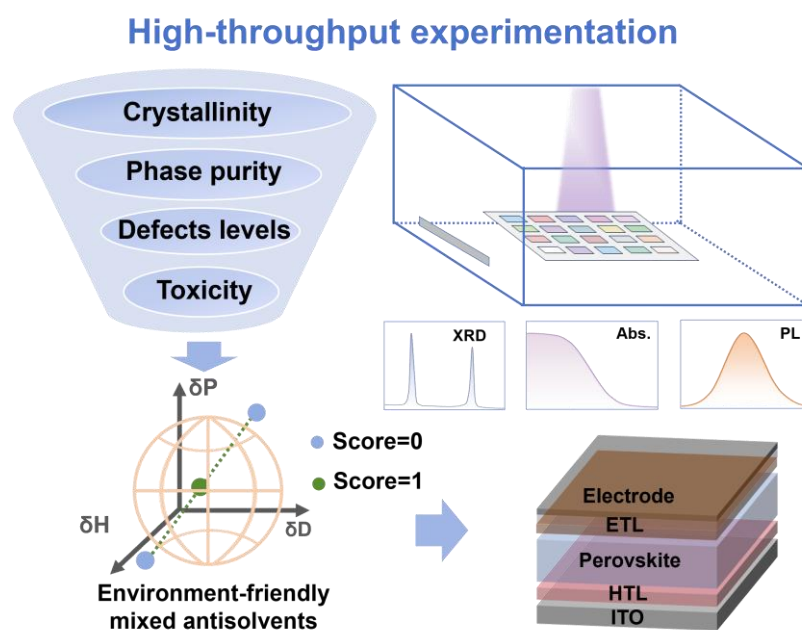
高通量实验方法能够进行海量实验样品的快速表征和筛选，提高实验数据的维度和准确性，并大幅降低实验的人工和时间成

本。反溶剂结晶已被广泛用于制备高质量的钙钛矿薄膜，常用反溶剂的种类有限且毒性较高，因此开发环境友好型反溶剂组合是非常重要的。基于高通量实验和表征，深入探究钙钛矿溶剂化学和配位相互作用，为探究反溶剂使用的一般方法提供了高效可靠的研究策略。

近日，华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室的李宁教授课题组利用高通量实验方法筛选了 40 种钙钛矿反溶剂及其相关组合，根据汉森溶解度参数 (HSPs) 确定有利于形成高质量钙钛矿薄膜的特定范围。通过混合反溶剂方法调整 HSPs 获得低毒性反溶剂组合，并针对不同的钙钛矿组分进行验证。为基于钙钛矿的光电技术的可持续开发和生产铺平了道路。

在本研究中，利用高通量实验方法对 40 种反溶剂及其相关组合进行了系统筛选。采用一步旋涂法制备了钙钛矿薄膜，并通过 X 射线衍射 (XRD)、吸收光谱和稳态光致发光 (PL) 光谱等一系列表征手段筛选出潜在的反溶剂。引入 HSPs 来分析反溶剂的作用机制。在 HSPs 理论中，色散参数 (δD)、极性参数 (δP) 和氢键参数 (δH) 共同描述内聚能和溶解度。随后筛选出有助于形成高质量钙钛矿薄膜的反溶剂。基于适用的反溶剂在 HSPs 空间的位置拟合构建了汉森球，球内为反溶剂分布的最佳区域。其基本机制得到了进一步阐明：位于该最佳区域之外的反溶剂要么会导致 N,N-二甲基甲酰胺 (DMF) 的快速萃取，因结晶时间不足而限制晶粒的生长，要么无法充分萃取 DMF。进一步探讨了低毒性混合型反溶剂系统的一般设计规则。通过组合汉森球外的反溶剂而设计的混合反溶剂成功地微调了溶解度特性，改善了钙钛

矿的结晶过程，显著提高了钙钛矿薄膜的结晶和质量。环境友好型溶剂的设计规则针对不同的钙钛矿组分进行了验证，这项研究工作不仅加深了我们对钙钛矿体系中溶解化学和配位相互作用的理解，还建立了一种利用 HSPs、高通量表征和设计绿色反溶剂的可靠方法，证明了高通量实验在钙钛矿溶剂筛选与优化的先进性。



相关研究成果以 “*A High-Throughput Approach to Identifying Environment-Friendly Artificial Antisolvents for Efficient Perovskite Solar Cells*” 为题发表在 *ADVANCED MATERIALS* 上，其中通讯作者为李宁教授，第一作者为尚影博士生。该研究工作得到了国家自然科学基金(52394273 和 52373179) 和 TCL 科技创新基 (20242065) 的资助。

新型显示、探测与成像

夏志国教授团队：光谱可调的 $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ 近红外荧光透明陶瓷 用于激光驱动光源探测

大功率宽带近红外（NIR）光源在医学诊断、无创成像和有机成分检测以及远距离海上安全等领域受到了广泛关注。与传统的卤素灯和 NIR 荧光转换发光二极管（pc-LED）不同，激光驱动的 NIR 荧光块体材料（单晶、陶瓷和玻璃-陶瓷）解决了 LED 芯片的“效率下降”和封装树脂“热导率差”的问题，能够承受数百倍的激发密度。与高散射特性的粉末样品相比，块状材料中的泵浦光路径更长，允许更高的吸收效率和光提取效率。其中，半透明陶瓷因其优良的散热和发光效率、经济的制备工艺、可控的荧光层厚度和激活剂浓度而备受关注。

华南理工大学发光材料与器件全国重点实验室的夏志国教授课题组通过放电等离子体烧结制备出了热导率 $19.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的 $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ 透明陶瓷，获得了峰值 890 nm（半峰宽 315 nm）、外量子效率 73% 的宽带近红外发光，并在 $10 \text{ W}/\text{mm}^2$ 蓝光激光二极管（LD）泵浦下，获得了超过 2 W 的宽带近红外输出功率，光转换效率 22%。采用这种激光荧光近红外光源搭建的原型器件，可实现人体心率和鸡蛋气室的实时监测，夜视照明距离可达 100 m。这种激光驱动的近红外探测/成像光源将在夜视补光、生物学等领域具有广泛应用前景。

研究团队开发出了 $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ 荧光透明陶瓷及其制备技术，

获得了峰值 686–928 nm 宽带可调、最高外量子效率 73% 的近红外发光，发射半峰宽可达 315 nm，如图 1 所示。电子顺磁共振（EPR）测试发现，不同于传统反尖晶石结构中的 Cr^{3+} 离子对发光，正尖晶石结构 $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ 的发光是由孤立 Cr^{3+} 离子产生的，而发射光谱随 Cr^{3+} 离子掺杂浓度变化的原因在于结构中存在着多种孤立 Cr^{3+} 离子发光中心。团队发现 Al 含量以及 Li 含量都能显著调控其发射光谱，并结合固体核磁和拉曼光谱进一步分析其晶体结构特征，确认光谱调控的机理在于结构中的反位缺陷和阳离子空位的影响。DFT 理论计算表明，阳离子空位能够显著降低 Cr^{3+} 离子在 Al^{3+} 格位的形成能，并带来较大的局域结构畸变，同时 Cr^{3+} 离子周围的电子云产生重排，导致发射光谱红移。

得益于 $\text{MgAl}_2\text{O}_4:6\%\text{Cr}^{3+}$ 透明陶瓷 $19.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的高导热率，研究团队在 $10 \text{ W}/\text{mm}^2$ 蓝光 LD 泵浦下获得了超过 2 W 的宽带近红外输出功率，光转换效率达到了 22%。采用这种激光荧光近红外光源搭建的原型器件，可轻易穿透手指和新鲜的鸡蛋，实现人体心率和鸡蛋气室的实时监测，成像分辨率为 7 lp/mm。最后，团队利用封装的大功率近红外光源，实现了 100 m 距离的夜视补光。这项工作将为光谱可调型大功率宽带近红外发光材料与器件的理性设计及其应用方案提供参考。

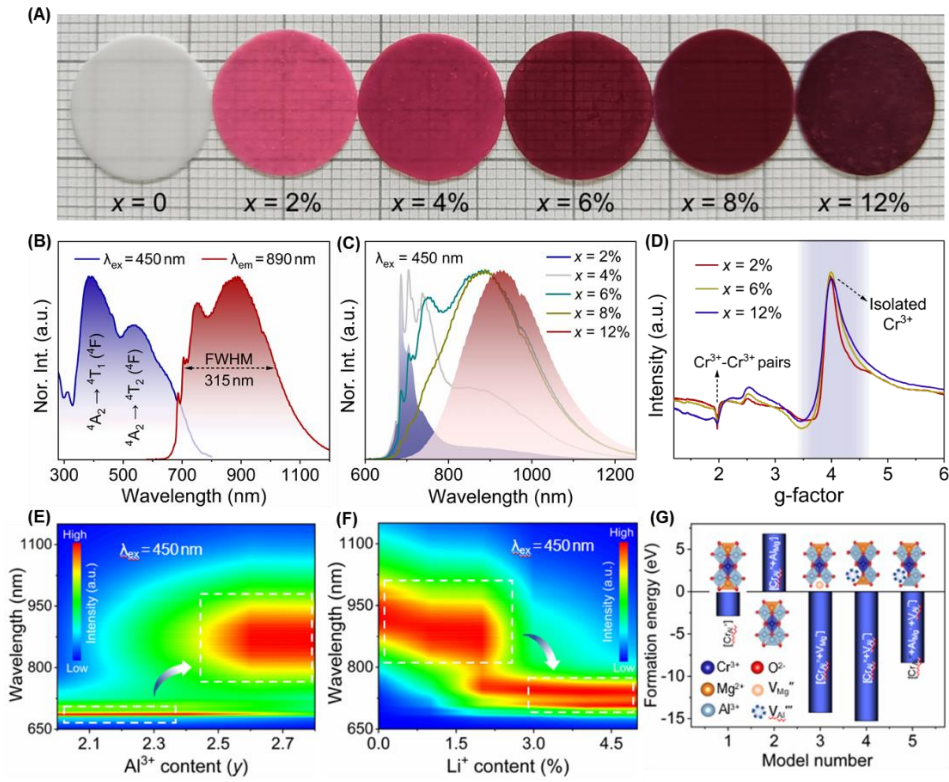


图 1. $\text{MgAl}_2\text{O}_4: x\text{Cr}^{3+}$ NIR 荧光透明陶瓷的照片及发光机理分析

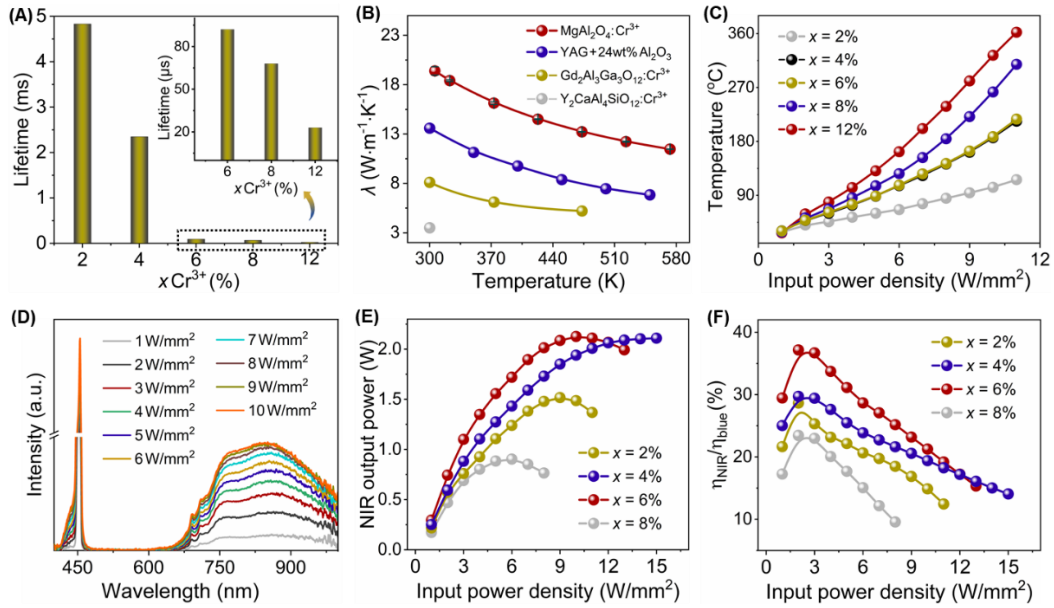


图 2. $\text{MgAl}_2\text{O}_4: x\text{Cr}^{3+}$ NIR 荧光透明陶瓷的激光荧光性能表征

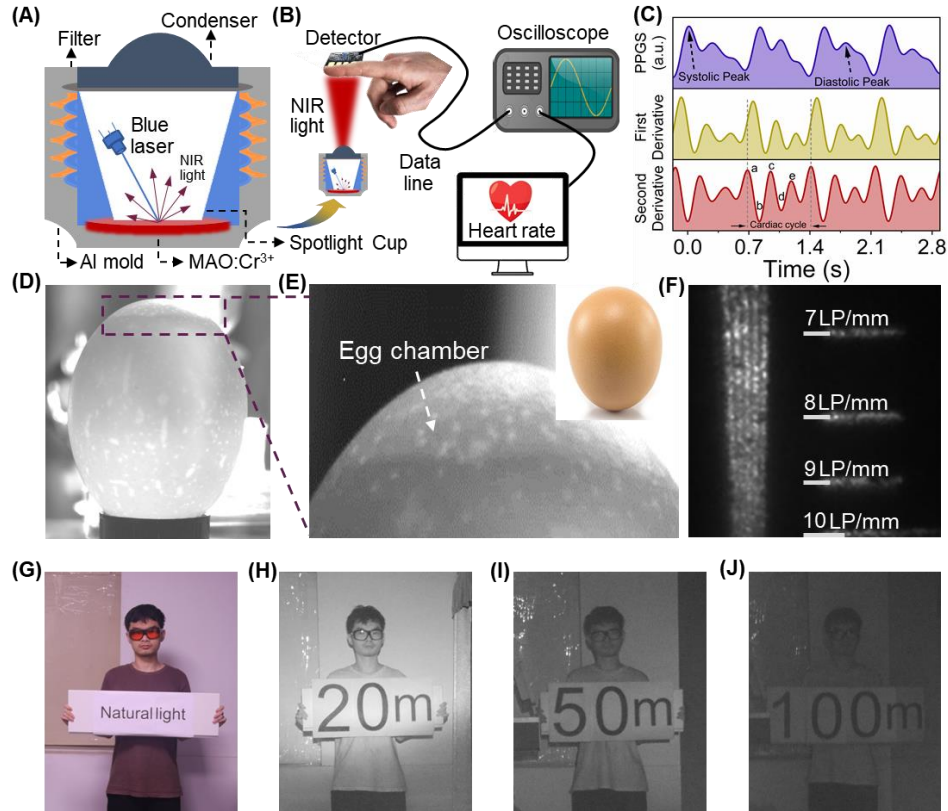


图 3. 蓝光激光驱动的 $\text{MgAl}_2\text{O}_4:6\%\text{Cr}^{3+}$ 宽带 NIR 光源及其在心率监测、鸡蛋气室和远距离夜视照明领域的应用展示。

相关研究成果以 “ *$\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ translucent ceramics with tunable broadband near-infrared luminescence for laser-driven light source detection*” 为题发表在 *InfoMat* 上，其中通讯作者为夏志国教授，第一作者为刘高超博士生。该研究工作得到了国家自然科学基金（52425206）和国家重点研发计划（2021YFB3500401）等科研项目的资助。

仪器设备

磁光克尔测量与显微成像系统

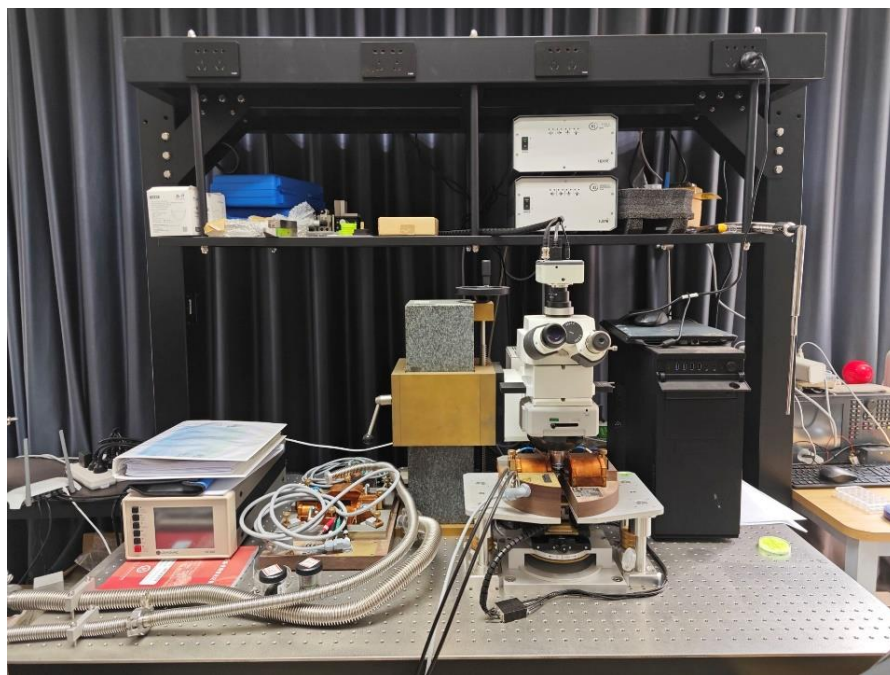
●仪器信息：

品牌：evico magnetics GmbH

型号：em-Kerr-highres

放置地点：华南理工大学北区科技园 1 号楼 N205A

设备管理员：郑楠 13316062353



●应用领域：

磁光克尔测量与显微成像系统是一种基于磁光克尔效应的先进表征手段，主要用于磁性材料磁畴结构可视化、磁化过程观测及表面磁滞回线的磁光测量（MOKE 磁强计）。其研究对象涵盖铁磁、亚铁磁、反铁磁等多种磁性材料，包括薄膜、块体及微纳结构样品。

●功能简介:

系统配置了多方向电磁场发生器,可施加任意取向的面内磁场与垂直面外磁场。通过选通图像增强器或脉冲 LED 光源,可实现纳秒级时间分辨的磁化过程动态捕捉。样品台采用 xyz 压电陶瓷位移平台,可自动补偿样品漂移,确保无畸变差分成像。系统配备宽域变温单元,温度调控范围覆盖 4 K 至 850 K,满足极端条件下的磁特性研究需求。该设备通过多模态联用能力,为磁性材料的多尺度研究提供强有力的技术支撑。

●技术参数:

1. 物镜: 20x0.50 pol、50x0.80 pol、100x1.3 pol 非磁物镜以及 20x/0.22, 60x/0,70 长工作距离物镜;

2. 起偏器: 薄片型,可旋转角度 100 度;

3. 显微镜物镜到底座垂直工作距离可大范围调整,最大可用工作距离: 150 mm;

4. 相机: 高灵敏度 CMOS 相机, 65 帧/sec; 像素 1900(H)x1200(V); 宽动态范围: 5000:1;

5. 电磁铁: 偶极电磁铁: 磁铁高度可调,和样品台独立; 面内磁场强度: 10^{-4} T - 0.3T; 样品尺寸: 5-35mm;

6. 变温系统: 温度范围: 4.2-873K。

●送样要求:

1. 可测试磁性片状、块状和薄膜样品。样品尺寸不超过 20 mm×20 mm, 高度不超过 5 mm, 形状规则, 以便固定; 样品表面整洁光滑, 表面粗糙度小于 10 nm, 以保证光反射信号清晰; 磁化强度不低于 20 emu/g, 磁信号过弱会导致成像困难。

2. 如有特殊需求（如测试低温）请联系仪器管理员。

●预约方式：

1. 预约咨询 QQ：2371956832
2. 收样地点：华南理工大学北区科技园 1 号楼 N205A
3. 收样时间：工作日 8:30-12:00，14:30-17:30。

境内外学术交流来访

●4月3日，天津大学马骁楠教授在全重501会议室作题为“有机光电材料激发态暗过程的电子-振动耦合效应研究”的学术报告。报告主要介绍基于飞秒瞬态吸收(fs-TA)等超快光谱实验及热振动关联函数(TVCF)等理论方法对有机发光材料激发态动力学的研究工作，为新型光电功能材料的理性设计提供了新思路。

●4月7日，德国埃朗根-纽伦堡大学 Christoph J. Brabec 教授在全重 N308 报告厅作题为 "Long-term stable and highly efficient printed multi-junction solar cells" 的学术报告。报告聚焦有机基多结太阳能电池及混合多结器件，深入解析印刷制备技术、器件稳定性强化及光电转换效率优化的创新策略。

●4月20日，北京大学刘志伟研究员在全重501会议室作题为“‘皮实’的稀土发光配合物”的学术报告。报告主要介绍了课题组在稀土发光配合物的光致发光与电致发光的研究进展，重点聚焦于稳定性提升方面的研究，为构建分子基稀土光功能材料提供了新思路。

●4月16日，中国科学院化学所董焕丽研究员在全重 W301 会议室作题为“有机发光晶体管材料与显示器件”的学术报告。报告主要介绍了有机半导体领域的发展历程、研究现状和当前瓶颈，详细阐述了团队在超越传统的高迁移率有机半导体材料创制和高迁移率发光有机半导体与发光晶体管器件创新方面的探索性工作。

●4月22日,浙江大学邱建荣教授在全重602会议室作题为“光与物质相互作用”的学术报告。报告主要介绍了飞秒激光在透明介质内部诱导的空间选择性纳米分相和离子交换,利用这个基于这种新的观察的制备技术,实现了在无色透明的玻璃材料内部带隙和发光大范围连续可控的三维半导体纳米晶结构。

●4月24日,中山大学物理学院王靖颖副教授在全重501会议室作题为“基于手性杂化钙钛矿的自旋电子器件研究”的学术报告。报告主要介绍了课题组在开发手性材料中自旋-电极化-光活性等多物理量耦合机制下的器件应用,同时为开发低功耗自旋存储器件及电场可控磁逻辑器件奠定实验基础。