

·教育与教学·

多学科交叉背景下“聚合物发光材料合成与器件” 实验与本科教育的融合与促进

任忠杰^{1*} 李茂秋¹ 潘炜砾¹ 闫寿科^{1,2*}

(¹北京化工大学材料科学与工程学院 北京 100029)

(²青岛科技大学高分子学院 青岛 266042)

摘要: 基于新时代对“复合型、应用型”人才的需求,为落实本科教学与科研齐飞、理论与实践相结合的教育理念。本文重点针对北京化工大学交叉班以及精英班学生的多学科交叉背景,以聚合物发光材料合成、性能测试及构效关系等一系列科研实验为载体,系统设计并实施教育改革。通过科研实践培养学生的科研思维,激发学生的科研兴趣,锻炼学生自主发现问题、分析问题、解决问题的能力。同时,在整个教学过程中深度挖掘课程思政元素,鼓励学生将个人发展与强国建设紧密联系起来,实现价值引领与能力培养的有机统一。

关键词: 聚合物电致发光材料;结构与性能;多学科交叉;本科教育

Integration and Promotion of “Synthesis and Device Fabrication of Polymer Light-Emitting Materials” Experiments within Undergraduate Education in a Cross-disciplinary Context

REN Zhong-jie^{1*}, LI Mao-qiu¹, PAN Wei-luo¹, YAN Shou-ke^{1,2*}

(¹School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

(²School of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042)

Abstract: Addressing the need for “interdisciplinary and application-oriented” talents in the new era, this paper implements an educational reform that integrates undergraduate teaching with scientific research and theoretical knowledge for practical application. Centered on a series of experiments involving the synthesis and characterization of polymer light-emitting materials, a systematic pedagogical framework has been designed for the cross-disciplinary and elite students at Beijing University of Chemical Technology. Through research practice, this approach cultivates scientific thinking, stimulates research interest, and enhances students’ autonomous capabilities in problem identification, analysis, and resolution. Furthermore, ideological and political elements have been strategically integrated throughout the course to encourage the students to align their personal growth with national development goals, achieving a synergistic combination of value guidance and competency development.

Keywords: Polymeric electroluminescent materials; Structure and property; Interdisciplinary; Undergraduate education

引用: 任忠杰, 李茂秋, 潘炜砾, 闫寿科. 多学科交叉背景下“聚合物发光材料合成与器件”实验与本科教育的融合与促进. 高分子通报, 2026, 39(4), 694–700.

2025-12-15 收稿, 2026-01-19 录用, 2026-03-05 网络出版

基金项目: 国家自然科学基金 (基金号 52273164, 22575014)

* 通信联系人: 任忠杰, E-mail: renzj@mail.buct.edu.cn; 闫寿科, E-mail: skyan@qust.edu.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.25.350

Citation: Ren, Z. J.; Li, M. Q.; Pan, W. L.; Yan, S. K. Integration and promotion of “synthesis and device fabrication of polymer light-emitting materials” experiments within undergraduate education in a cross-disciplinary context. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2026, 39(4), 694–700.

专业理论知识是高等教育人才培养的基石, 是学生构建知识体系、形成专业思维的根本保障。然而, 随着科学技术的快速发展, 诸多前沿科学问题与重大技术突破日益呈现出复杂性与综合性, 单一学科的知识与方法已难以满足解决复杂综合性问题的需求。在此背景下, 多学科交叉融合成为推动科技创新的核心驱动力。作为高等教育的“摇篮”, 中国高校正在打破传统学科壁垒, 整合不同领域的理论、技术和方法, 在学科的交汇处发现新问题、走出符合中国国情的新道路^[1]。在理工科领域, 作为化工特色高校的北京化工大学积极结合高效、绿色、智能化的产业发展趋势, 搭建交叉学科创新平台, 拓宽了工科类高校学科交叉的道路^[2]; 在生物医学领域, 四川大学华西临床医学院医学技术学院也依托四川大学综合优势, 与四川大学机械工程学院联合设立“医学技术与智能制造双学士学位”项目, 在学科融合的交汇点寻求新的发展路径^[3]。在人文社科类领域, 中国人民大学展示了学科交叉发展需要经历的完整路径: 前学科建设期、学科专业建设期、优势学科形成期、交叉学科建设期等阶段, 是一个从多维奠基到特色凸显, 再到创新引领的发展过程^[4]。因此, 无论是逻辑精密的理工、生动实践的医学, 还是深邃思辨的人文社科类专业, 现代高等教育发展都不再仅局限于单一专业的深度发展, 更需着力于拓宽交叉学科视野。

将学科交叉的理念落实到人才培养层面, 正是国家应对新一轮科技革命与产业变革、实施创新驱动发展战略的迫切需求^[5,6]。当前, 我国对具备多学科背景、能够解决复杂实际问题的交叉型复合人才求贤若渴。本科教育作为高等教育的根基和人才培养的关键阶段, 是塑造学生知识结构、创新思维与综合素养的黄金时期。在此阶段有意识地引入交叉学科的训练, 不仅能够激发学生的创新潜能, 打造出更立体的人才培养模式, 为支撑国家科技发展奠定坚实基础。在学科交融科研氛围下, 北京化工大学提出通过“学科交叉班”实现交叉学科人才培养计划。聚合物多层次形态结构与调控科研团队积极响应号召, 结合团队自身的

科学研究方向, 为该计划顺利落地交出满意答卷。

有机发光二极管(OLED)技术作为聚合物多层次形态结构与调控团队的研究方向之一, 特别是核心的“热激活延迟荧光(TADF)聚合物材料”的开发, 是一门极具代表性的多学科交叉研究技术^[7-9]。从TADF聚合物材料的分子设计、有机合成、聚集态结构, 到其光物理、热稳定性以及电化学等各种性能测试分析, 再到最终OLED器件的设计、制备以及性能优化, 这一完整的研究链条深度融合了化学、物理、材料科学与工程等多个学科的理论知识与实验技能。因此, 以“TADF聚合物材料的合成与器件”这一具体科研实践为载体, 探索其与交叉班以及精英班教学的深度融合, 是一个极具价值的研究课题。这不仅是将前沿科学反哺于基础教学的有效途径, 更是培养新材料、新能源等战略新兴产业所需复合型人才的生动实践。

1 学科交叉本科课程改革

1.1 组建学科交叉班

为给本科教育提供学科交叉生长的沃土, 聚合物多层次形态结构与调控团队组建了交叉班。招生对象主要面向全校各专业学习成绩优异的本科学生, 需要满足绩点(GPA)>3.0。申请者应具备独立并活跃的思维能力, 有志在某一科研或工程领域深入学习。学生选拔程序采取双向选择模式。首先, 满足基本条件学生自愿报名, 选择科研团队。然后, 相应的科研团队及所在学院组织面试, 考核后初步确定学科交叉班学生名单, 最后, 经学校审核后, 来自不同专业背景的本科生正式组成一个学科交叉班。

1.2 学科交叉课题研究背景

自1987年, 有机发光二极管(OLED)诞生于伊士曼柯达公司以来, 便备受学术界和工业界的青睐。随着相关研究的不断深入, OLED同时在照明和显示领域都具有广阔的应用前景。回顾OLED发展阶段, 从内量子效率低的荧光材料(第一代)迭代到电生激子全利用的磷光材料(第二代), 再推动到纯有机的热激活延迟荧光材料(第

三代)问世,完美呈现了OLED的迭代发展。此外,针对第四代电致发光材料的研究正在学术界和工业界如火如荼开展。三十多年来,随着OLED器件技术不断发展,电致发光材料已然成为最热门的研究领域之一^[10,11]。如图1所示,OLED通常是由有机半导体层组成的多层器件。OLED发光机理是将电能转换为光能,通过施加外部电场获得源源不断的“电子”和“空穴”,这些“电子”和“空穴”分别经过“电子注入层/电子传输层”和“空穴注入层/空穴传输层”到达“发光层(EML)”,在EML里瞬间碰撞复合形成激子。处于高能状态的激子(激发态)非常不稳定,会尽快回到稳定状态即“基态”。于是将多余的能量以光的形式释放出来。当无数个“电子”和“空穴”同时完成这一过程时,我们看到了材料发出的光,就完成了电生光这一过程。由此可知,电致发光材料(表1)是影响OLED器件效率和发光颜色最关键因素之一。

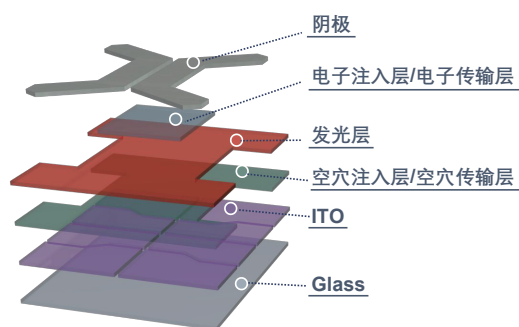


图1 有机电致发光器件

Figure 1 Organic light-emitting diode

表1 3代电致发光材料的分类

Table 1 Classification of the three generations of electroluminescent materials

发光材料	发光机理	优缺点
荧光材料 (第一代)	仅利用单重态激子发光	激子利用率为25%
磷光材料 (第二代)	通过隙间窜越利用单重态和三重态激子发光	激子利用率达100%; 但含重金属
热激活延迟荧光材料 (第三代)	通过反向隙间窜越收集单重态和三重态激子发光	激子利用率达100%; 且不含重金属

在OLED器件中,发光材料起着举足轻重的作用。基于小分子TADF材料的研究已取得长足进展,其器件效率屡创新高。然而,这类材料通常依赖真空蒸镀工艺制备,存在能耗与成本高等

问题,限制了其在大面积柔性器件中的应用潜力。相比之下,TADF聚合物凭借其优异的溶液可加工性,为实现低成本、大面积的印刷OLED技术提供了更具吸引力的发展路径。然而,目前聚合物TADF材料的发展仍面临关键挑战:其一,基于聚合物的OLED器件外量子效率普遍落后于小分子体系;其二,目前已报道的高效率TADF聚合物多集中于蓝绿光区域,而性能优异的橙红至红色发光体系仍相对稀缺,制约了全彩显示与白光照明的发展。因此,开发高效长波长的TADF聚合物,已成为推动该领域向前发展的关键环节。

总之,OLED显示器具有能耗低、分辨率高、宽视角、色彩对比度高以及响应时间更快等优势,更重要的是,当功能层使用高分子量的聚合物材料时,能实现溶液加工,可作为柔性显示和透明显示潜在材料,有望将显示器的设计推动到一个更高的维度,不仅满足人民日益增长的物质文化需求,也符合我国绿色发展的战略需求。目前,OLED技术仍然面临着材料设计和器件结构的关键挑战。因此,在本科教学中推进热激活延迟荧光聚合物材料合成及器件性能测试实验,通过科研进课堂方式,一方面突显学科交叉课程教学的实用价值,在实验设计中,从热激活延迟荧光聚合物材料的合成阶段来看,需要学生具备有机化学和材料学相关知识储备;从性能测试这阶段要求学生熟练运用光物理和电化学相关知识。学生从课堂中能学到多学科交叉理论知识体系。另一方面通过走进实验室,可以培养学生的实践能力,鼓励学生投身国家科技事业,激发学生的社会责任感,使得科研、本科教育和课程思政相互融合与促进。

1.3 课前研讨

1.3.1 实验流程

本实验流程大致分为3部分。第一阶段:利用有机合成法制备红光热激活延迟荧光聚合物材料pNAI37系列,然后通过至少3种表征手段(如核磁共振氢谱、核磁共振碳谱、质谱、元素分析等)表征该物质化学结构,该阶段要求学生具有有机化学和材料学知识储备;第二阶段:利用荧光光谱仪探究pNAI37系列的光物理性能,确保该材料具有TADF性能。再通过示差扫描量热法和热失重法表征材料热稳定性,确保材料具有良好的热稳定性,可以满足后续表征及OLED器件制备的

需求。更重要的是,利用循环伏安法测定红光热激活延迟荧光聚合物的氧化和还原电位,通过计算获得最高占据分子轨道(HOMO)以及最低未占分子轨道(LUMO)能级,通过电化学性能测试为 OLED 器件结构设计提供数据支撑。该阶段要求学生具有基本光物理与电化学的知识。第三阶段:根据前期数据总结,设计能级匹配的器件结构,通过制备基于 pNAI37 系列的 OLED,并且测试器件性能(如最大外量子效率、亮度、色坐标等)。该实验完整流程如图 2 所示。

1.3.2 课前知识储备

为了培养学生的自主学习能力,课前通过建立线上学习群的方式引导学生查阅“热激活延迟

荧光聚合物材料合成与表征”研究领域的相关文献,大致了解 OLED 领域发展的历程、电致发光材料的分类、3 代电致发光材料的发光机理以及热激活延迟荧光材料合成与表征的基本实验流程和相关技术手段。引导学生课前思考实验过程中可能会遇到的问题,并给出合理解决方案,例如:

(1)如何合成 pNAI37 系列^[12]。pNAI37 系列合成路线和结构式如图 3 所示,具体合成步骤如下:所用 NAI-DMAc-2Br 和 Cz-C20-2Br 的质量在合成这一系列化合物有所不同。所需 NAI-DMAc-2Br 的质量不同(合成 pNAI3710 时加入 69.4 mg;合成 pNAI3705 时加入 34.7 mg;合成 pNAI3702 时加入 13.9 mg);所需 Cz-C20-2Br 的质量也不同(合



图 2 实验流程图

Figure 2 Scheme of the experimental procedures

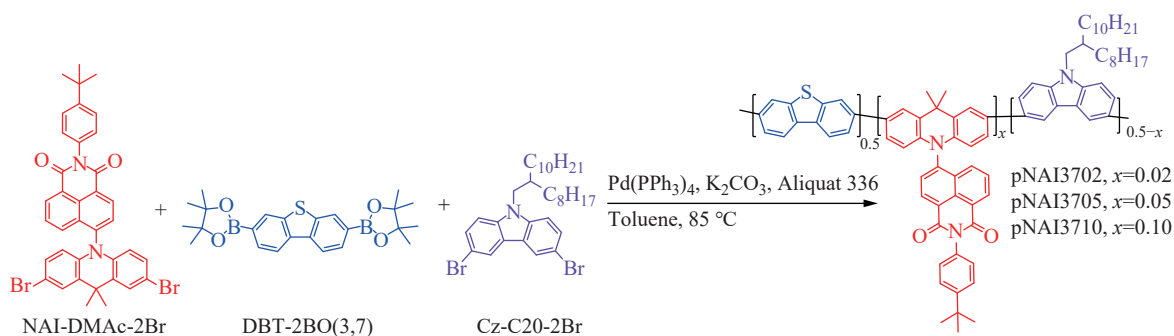


图 3 pNAI37 系列合成路线和结构式

Figure 3 Synthetic route and chemical structures of the pNAI37 series

成pNAI3710时加入242.2 mg; 合成pNAI3705时加入272.5 mg; 合成pNAI3702时加入290.7 mg)。此外还需要加入218.1 mg的DBT-2BO(3,7)、30 mg的Pd(PPh₃)₄作为反应催化剂、5 mL碳酸钾水溶液(2 M)提供碱性环境、15 μL的Aliquat 336和10 mL的无水甲苯。控温85 °C, 磁力搅拌72 h, 随后添加0.5 mL的溴苯进行封端。再磁力搅拌12 h后, 将反应混合物全部倒入甲醇中, 沉淀出红色物质。然后, 减压抽滤红色沉淀物, 并将其重新溶解在20 mL甲苯中, 加入500 mg二乙基二硫代氨基甲酸钠三水合物和8 mL蒸馏水, 控温90 °C并且磁力搅拌18 h取固体备用。随后, 无需柱层析纯化, 利用该系列聚合物在不同溶剂中溶解性的差异, 采用沉降析出法, 将粗产物用THF再次溶解, 并缓慢滴入大量甲醇中。沉淀逐渐析出, 将其过滤后放入真空干燥箱干燥4 h后再次纯化。采用索氏提抽法进一步纯化, 使用正己烷作为萃取溶剂, 然后将抽提后的固体真空干燥, 得到一系列目标聚合物^[13]。

(2) 如何判断该材料具有TADF性能。可以从几个方面验证。一方面: 通过时间依赖密度泛函理论(TD-DFT)计算预测 ΔE_{ST} , 同时可以通过实验验证, 测试该化合物低温磷光光谱, 得到该化合物最低激发三重态(T₁)和最低激发单重态(S₁)能级, 计算T₁和S₁态能级差(ΔE_{ST}), 为确保其有TADF性能, 该值应该小于0.2 eV。另一方面: 通过瞬态光致发光(PL)衰减特性的观察可判断其是否表现为双组分衰减, 即分别对应快速荧光衰减和延迟荧光衰减。此外, 通过测试变温瞬态PL衰减特性, 探索该化合物是否具备热活化特性。

(3) 器件制备的结构, 有哪些功能层。器件结构通常采用三明治型多层结构, 以我们合成的红光聚合物材料为例, 溶液加工器件拟采用器件结构: 在刻蚀ITO的玻璃基底上依次旋涂空穴注入层。空穴传输层以及pNAI37系列聚合物发光层。然后依次真空蒸镀电子传输层、电子注入层以及金属阴极。

1.4 课程创新设计

传统的教学课程中, 以老师向学生单向传授教科书上的理论知识为主, 为了提高教学质量, 进一步促进“以学为主”的教育理念。本科教育也在不断改革。如何让教学课堂多样化, 调动学生学习的主动性, 让所学知识具有实用性, 熟练

运用所学知识解决实际科研问题是教学改革的重要方向之一。交叉班课程教学创新点一: 学生来自不同学科背景, 多元的学科组成孕育了天然的学科交叉交流氛围, 为跨学科交叉思维碰撞和团队协作提供沃土。创新点二: 教学内容交叉整合, 教师不单一传授某一门学科知识, 而是重点性传授多学科交叉知识, 为学生进行学科交叉科学研究打下坚实基础。创新点三: 引入科研实验, 推动理论与实践一体化。让学生走进实验室, 通过与团队的在读博士、硕士研究生进行交流, 融入研究生的生活中去。理论结合实际, 旨在培养具有多学科交叉知识背景、综合素质优异的人才。创新点四: 相较于专业课程上固定的实验安排, 本实验选用较前沿的高效率热激活延迟荧光聚合物材料, 这类电致发光材料成本较低, 合成简单, 性能优异。在OLED技术领域具有广阔的应用前景, 前沿的研究领域激发学生科研前瞻意识。

1.5 实施阶段

该交叉班课程教学主要包括4个阶段。旨在基于“热激活延迟荧光聚合物材料合成与表征”实验的基础上, 让学生不仅能学到多学科交叉的知识体系, 并且将所学理论知识应用到实际的科学研究中, 解决实际问题。本课程立足于学科交叉背景, 在着重培养学生综合素质的同时, 以理论联系实际为导向, 通过促进科研与本科教育的深度融合, 实现教与学的相辅相成, 最终提升课程的实用性与创新性。

该课程主要分为4阶段进行。第一阶段: 课前讨论, 由学生自主学习。通过线上建立学习群方式, 引导学生自主查阅有机电致发光领域相关文献, 对该领域研究有基本知识储备。例如: 电致发光机理, 具有代表性的有机合成反应以及光物理测试的机理和目的等。此外, 学生需要参加实验室安全培训, 并且通过学校统一的实验室准入安全考试, 方可进行后续科研相关的专业训练。

第二阶段: 理论学习, 由教师线下传授知识。教师与学生面对面讲解学科交叉理论知识, 较前一个阶段的自主学习更加系统而全面。将第一阶段学生自主学习得到的关于有机电致发光领域的碎片化认知整合成完整的知识体系。首先传授该领域基本知识, 规范使用该领域的科研术语, 为全校来自不同专业的学生建立起无障碍沟通的“专业术语”。基于此, 教师扩充讲解实验流程, 以及

实验过程中可能遇到的各种类型问题，鼓励学生积极面对挑战，传授解决问题的思路，培养学生的科研思维。

第三阶段：实验阶段，由学生自主实验操作。主要采用方式：让交叉班学生分批来实验室，深度融入研究生实验中。正如俗话说“授人以鱼不如授人以渔”，由研究生一对一带教相关实验操作，刚进入实验室第一个学期仔细观摩研究生实验操作。在前期观摩阶段将培训本实验相关安全教育放在首位，防患于未然。例如：使用新试剂前，须查阅相关性质，及时做好防护。在化学合成阶段：观摩一学期后基本熟练掌握合成实验具体流程，例如：溶剂无水无氧处理，合成反应进程实时监测，反应后处理纯化操作等。在此基础上教师鼓励本科生积极动手完成实验流程，此外，本科生刚开始进行实验操作时，研究生实时指导至完全熟练。在光物理测试阶段：先由仪器负责人进行荧光光谱仪相关原理和知识培训，具备相关测试基础后进行一系列光物理测试。期间穿插安全培训，例如：激光器的安全使用等。在器件制备阶段：和前一个阶段相似，首先由仪器负责人进行旋涂设备以及真空蒸镀设备培训，了解相关仪器使用基础知识后，方可进行相关实验操作。学生不仅可以学习实验操作，而且能更深入了解真实的科研生活，揭开科研实验的神秘面纱。在学生心中种下科研的种子，最后应用所学的知识体系以及操作完成自己实验，自主完成数据处理，数据分析。

第四阶段：课后拓展与能力拔高阶段。最终学生需要合力完成完整的实验报告，在组会上进行实验成果演讲展示等，进行课后拓展学习。在该阶段主要培养和拔高以下几个方面的能力：学生通过自主进行分子式结构谱图分析以确认化合物结构，从而培养自身分析能力；通过对器件性能数据的处理，对比不同器件结构带来的数据差异，深入理解器件结构对性能的影响机制；通过小组展示与讨论，学生需要综合分析光物理数据与器件性能数据，探寻影响性能的内在规律，从而熟练运用多学科知识解决学科交叉领域的科研问题，培养学生独立思考能力和解决问题的综合能力。此外，本课程引导学生关注有机电致发光材料领域的“卡脖子”问题，紧跟学科发展前沿，

并鼓励他们尝试提出自己的解决方案，为推动该研究领域的工业化发展贡献智慧。

2 思政元素以及评价方案

为满足社会对复合型人才的需求，在整个教学过程中充分引入思想政治教育，使传授知识与思想政治深度交叉融合，已成为育人的关键路径。在设计学科交叉班教学内容时，充分引入思想政治教育，将知识传授与三观塑造同步推进，构建多维度、全过程育人格局，逐步引导学生树立科教兴国的信念。目前，在教学改革过程中，课程思政的引入主要依托以下几方面开展。

一方面是3代有机电致发光材料发展历程。以每一代电致发光材料在OLED领域的迭代发展历程为主线，重点讲授具有里程碑意义的电致发光材料、新的发光机理问世，材料的更迭推动着该领域发展。这与创新驱动发展战略以及社会主义现代化强国建设相呼应，激励学生为推动国家科技进步而顽强拼搏。

另一方面是分析国内外电致发光材料的工业化应用现状，引导学生比较我国与其他国家在该领域工业化进程差异。以小组讨论形式为主，结合前沿技术以及市场格局变化，让学生切实体会到培养自主创新能力的紧迫性，引导学生深入思考原创性研究的来源及价值，在此过程中，鼓舞学生主动建立学科交叉知识体系，将自身打造成具有多学科知识的创新型和复合型人才，将来为推动OLED领域的发展作出贡献。

此外，在教学过程中以我国OLED领域在研制过程中遇到的“卡脖子”材料为线索，将基础理论、能力培养以及价值引领等融入相应教学中，并建立相应的教学评估体系。为契合这种“知识传授、能力培养、价值引领”三位一体的育人理念，我们构建了一个与之匹配的综合考核方案(表2)。该方案的核心在于实现3个目标的协同评价：第一，聚焦认知维度，考核学生对理论知识的理解内化与迁移应用能力；第二，聚焦过程维度，通过开放性课题等路径设计，考核其科研实践中的创新潜能和动手能力；第三，聚焦价值维度，通过分析一些社会共性热点事件并表达个人观点等评价方法，考核其社会责任感与正确的价值判断。此多元评价体系旨在超越单一的知识考查，实现综合评估。

表2 课程思政建设的综合考核方案

Table 2 Comprehensive evaluation framework for curriculum ideology and politics construction

教学目标	考核内容	思政建设目标
理论知识传授	课堂上传授的基本理论	让学生了解该领域的发展历程与前沿动态
学术能力培养	课堂上小组讨论, 实验室实践操作	挖掘学生创新潜能, 提高团队协作能力和动手能力
正确价值塑造	科研态度, 创新思维, 家国情怀	树立正确的世界观、人生观、价值观

3 基于学科交叉课程改革成效

在本科教育阶段, 通过有意识地引入交叉学科的训练, 将前沿科研成果有机融入本科教育体系, 有效构建了科研支撑教学、科教协同育人的长效机制, 成果显著, 说明此方法的实践可行性。近5年学生在各种竞赛中多次获得校内外奖项。将来, 我们将以交叉班为本科复合型人才培养模板, 在多学科交叉融合背景下完成更多创新型科研项目, 持续推动本科教育课程教学改革, 为新时代复合型人才培养提供可复制的实践路径。

4 结语

以“TADF聚合物材料的合成与表征”这一前沿交叉研究为核心, 将多学科交叉理念深度嵌入聚合物多层次形态结构与调控团队组建的交叉班以及精英班学生的课程当中, 激发学生对科研的兴趣, 锻炼学生自主发现问题、分析问题、解决问题的能力。教学体系中, 通过该课程的实施, 学生不仅系统掌握了从分子设计、有机合成到光物理测试、器件制备的完整科研链条, 巩固了专业知识, 更在实践中切实提升了动手能力, 实现了知识、能力与价值观的综合发展。更重要的是, 本课程成功将本科教育与课程思政有机结合。在实验探索中, 让学生深刻体会到国家在新型显示、新材料等战略领域对核心技术的迫切需求, 从而

将个人学习与强国建设紧密联系起来。

参考文献

- 李兵, 徐辉, 程志宇, 陶诚, 周洪. 多学科交叉视角下的科技人才研究主题分析. *科学学研究*, **2025**, 43(5), 964-975.
- 张晓晴, 于乐, 邵百一, 李东旭. 化工特色高校交叉学科建设实践探索. *化工高等教育*, **2025**, 42(4), 10-29.
- 余伟, 徐月萌, 艾丽, 瞿箐, 李真林. 科教融创的医工复合型人才培养探索与实践. *华西医学*, **2025**, 40(10), 1658-1662.
- 胡莉芳, 范凯璇. 历史视角下的学科交叉与大学发展——以中国人民大学为例. *中国人民大学教育* 月刊, **2025**, 4, 76-88.
- 王群, 李杨, 卢松涛, 康红军, 洪杨, 吴晓宏. 学科交叉视域下化学创新人才培养的探索. *大学化学*, **2024**, 39(8), 132-135.
- 隋刚, 王亚琴, 王双红, 段顺, 张晨. 基于科教融合的高分子材料与工程一流专业创新人才培养探索. *高分子通报*, **2025**, 38(3), 509-514.
- 华磊, 闫寿科, 任忠杰. 聚合物热激活延迟荧光材料的分子设计与器件性能. *高分子学报*, **2020**, 51(5), 457-468.
- 刘振宇, 饶俊峰, 祝守加, 王兵洋, 余帆, 冯全友, 解令海. 溶液加工型自主体热活化延迟荧光材料的研究进展. *化学学报*, **2023**, 81(7), 820-835.
- 马金珠, 李阳, 高珊, 赵越, 丁磊, 周东营, 樊健. 基于吩嗪受体单元的高效近红外热激活延迟荧光. *化学学报*, **2025**, 83(1), 17-24.
- 刘迪萱, 钟锦耀, 唐彪, 曹秀华, 许伟, 周尚雄, 史沐杨, 姚日晖, 宁洪龙, 彭俊彪. 柔性印刷OLED研究进展. *液晶与显示*, **2021**, 36(2), 217-228.
- 王思怡, 钟文楷, 黄飞. 可拉伸高分子光电器件的研究进展. *高分子学报*, **2024**, 55(9), 1091-1110.
- Hua L.; Liu Y.; Zhao H.; Chen S.; Zhang Y.; Yan S.; Ren Z. Constructing High-efficiency orange-red thermally activated delayed fluorescence polymers by excited state energy levels regulation via backbone engineering. *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, 33(36), 2303384.
- 华磊. 基于大分子工程的热活化延迟荧光材料及其高效电致发光器件. 北京化工大学博士论文, **2023**.