

# 2025 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

## 一、项目名称

有机室温磷光

## 二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省教育厅

**提名意见：**我单位认真审阅了该项目全部材料，确认真实有效，且符合填写要求。该项目在国家自然科学基金等项目的支持下，经过多年的研究，在有机光电子领域取得了重要创新突破，有很好的学术价值，促进了半导体材料、光学工程、发光物理学、光电探测等多学科的交叉发展。相关成果发表在 *Nature Photonics*、*Nature Communications* 等国际顶级期刊，得到了国内外同行的广泛关注与认可，5 篇代表性论文被 SCI 总他引 1330 次。其中，2 篇代表性论文入选 ESI 热点论文，4 篇代表性论文均入选 ESI 高被引论文。

该项目突破室温磷光需要铱、铂等贵金属元素的传统认知，在无重金属有机室温磷光领域进行了开创性研究。提出了“发色团限域”的新机制，显著提升了有机半导体的自旋轨道耦合作用，有效抑制三重激发态的非辐射跃迁，创制了一系列有机室温磷光半导体材料；提出了三重态能级梯度设计新策略，揭示了三重态激子辐射跃迁与磷光性能间的构效关系，成功实现了室温磷光寿命与偏振性的精准调控；提出了“亮态三重态”的新思路，初步构建了高激子利用率有机闪烁体的辐射发光理论框架，突破了传统高效闪烁体需要金属的局限，开创了有机室温磷光在闪烁体领域的新应用，展现了有机室温磷光在光电探测领域的广阔前景。

该项目指明了有机室温磷光的发展方向，推动了“有机超长磷光材料”和“有机室温磷光材料”相关学科 Top10 热点前沿的形成与发展，达到了国际领先水平。

同意推荐该项目申报陕西省自然科学奖一等奖。

## 三、项目简介

该项目成果属于有机光电子学中的前沿交叉学科方向，涉及有机室温磷光半导体的设计开发、性能优化，以及功能应用。高性能有机半导体的研发是该领域持续发展的关键驱动力。磷光半导体具有高的激子利用以及丰富的激发态性质，在照明显示、医学成像、智能传感以及射线探测等领域发挥重要作用，但是关键材料与核心专利受制于欧美、日韩等国家。因此，亟需开发自主知识产权的磷光新材料，抢占未来有机半导体产业的制高点，从源头上解决“卡脖子”问题。该项目突破传统磷光半导体需要贵金属元素的局限，在国际上率先开展了无贵金属的有机室温磷光研究，取得了一系列重要科学发现和创新突破。主要科学发现如下：

**1.提出了发色团限域的新机制，显著提升了有机半导体的自旋轨道耦合作用，有效抑制三重激发态的非辐射跃迁，创制了一系列有机室温磷光半导体材料。**传统有机半导体材料由于弱的自旋轨道耦合作用与强的激子非辐射跃迁，难以实现室温磷光。该项目创新性地提出了发色团限域的新机制，精准调控激发态中的( $n, \pi^*$ )电子组份，有效增强了自旋轨道耦合作用；同时，阻断 $\pi$ 电子离域和诱导分子间多重氢键网络形成刚性的分子环境，实现了原子级的发色团限域作用，促进了三重态激子的高效产生与稳定。构筑了分子态和聚集态的多重发光中心，精准调控三重态激子的辐射跃迁行为，实现了激发波长依赖的动态多彩室温磷光，解决了单组份有机半导体三重态激子难调控的挑战。这一发现理论上突破了经典"卡莎规则"激子单一辐射跃迁行为的限制，创制了首例单组份多彩有机室温磷光半导体。

**2. 提出了三重态能级梯度设计新策略，揭示了三重态激子辐射跃迁与磷光性能间的构效关系，成功实现了室温磷光寿命与偏振性的精准调控。**有机室温磷光半导体单重激发态与三重激发态之间的能隙宽，导致室温磷光的性能难以实现精准化和可控性调节。该项目创新性地提出三重态能级梯度调控策略，通过精确调控分子内/间能量转移速率，首次实现了有机室温磷光寿命两个数量级的精准调控。通过逐步将主体材料的三重态能级从 3.19 eV 降低至 2.66 eV，为客体材料三重态激子提供了合适的能级跳板，有效调控了从单重态激子到三重态激子的系间窜越速率，成功实现了有机室温磷光寿命从 3.9 ms 到 376.9 ms 宽范围的可控调节。同时，协同调控共价键与弱相互作用，实现了圆偏振荧光到圆偏振室温磷光的精准调控。为创制高性能的有机室温磷光半导体和实现功能化应用奠定了基础。

**3. 提出了亮态三重态的新思路，突破了传统高效闪烁体需要重金属的局限，开创了有机室温磷光半导体在 X 射线成像领域的新应用。**传统有机闪烁体自旋轨道耦合效应较弱，辐射发光多建立在通过单重态激子辐射跃迁的理论框架，高达 75%的三重态激子未被利用，闪烁体的辐射发光性能差，难以实现高质量 X 射线成像。该项目提出了“亮态”三重态构筑高效 X 射线有机闪烁体的新思路，发现了一条全新的激子辐射跃迁路径，实现了激子的 100%利用，解决了传统有机闪烁体激子利用率低的瓶颈，创制了高性能的有机闪烁体，检测限低至 33 nGy/s，是医学 X 射线成像使用剂量的 1/167。该项目揭示了三重态激子行为对闪烁体性能之间的影响规律，初步构建了有机室温磷光闪烁体的辐射发光理论框架，突破了闪烁体必须依赖重金属元素的传统认知，为有机闪烁体实现高质量 X 射线成像奠定了基础。

相关成果发表在 Nature Photonics、Nature Communications 等国际顶级期刊，得到了国内外同行的广泛关注与认可，5 篇代表性论文被 SCI 总他引 1330 次，单篇最高他引 575 次，包括 Nature Photonics、Chemical Reviews 等国际知名学术

期刊重点评述与引用。2 篇代表性论文入选 ESI 热点论文，4 篇代表性论文均入选 ESI 高被引论文。

该项目围绕有机半导体创制、室温磷光性能的精准调控及 X 射线成像应用等关键科学技术问题，系统开展了有机室温磷光材料的基础与应用研究，突破了制约该领域发展的多项瓶颈，推动了“有机超长磷光材料”（2019 年）与“有机室温磷光材料”（2020 年）入选相关领域 Top10 热点前沿，为引领该研究方向的发展做出了重要贡献。研究成果构建了具有完整自主知识产权的新材料体系，为我国抢占有机半导体领域未来产业制高点奠定了坚实基础，并为满足新一代信息显示、智能传感、高质量成像与探测等国家重大战略需求提供了关键材料支撑与技术保障。

#### 四、客观评价

**对应发现点 1：**通过发色团限域作用构筑多重发光中心策略，实现激发依赖的多彩室温磷光工作发表后，被 Nature Photonics 以题为《Colour-tunable ultra-long emission》进行了专题报道（附件 2-1）。报道指出“该成果是有机磷光领域又一令人兴奋的研究进展”（report further exciting progress in the area...，附件代表性引文）。针对激发依赖的多彩室温磷光功能应用方面，Nature Photonics 的专题报道指出“该工作开辟了激发依赖的有机磷光材料在相关领域的新应用”（Excitation-dependent UOP opens the door to several potential applications, such as ...）。欧洲科学院外籍院士香港理工大学 Wai-Yeung Wong 教授在文章（J. Mater. Chem. C 2021, 9, 727）中对该成果给予充分肯定，指出“黄等人首次实现了激发波长依赖的单组分多彩有机超长磷光”（Huang and co-workers have first realized the color-tunable single component ULP by tuning excitation wavelength, 附件 2-2）。美国西北大学诺贝尔奖获得者 J. Fraser Stoddart 教授和天津大学胡文平教授对该设计策略给予肯定，在文章（Adv. Mater. 2021, 33, 2105405, 附件 2-3）指出“在单一晶体中，利用分子限域构建多重磷光中心是一种设计多彩室温磷光材料的有效策略”（This work demonstrates that the construction of multiple phosphorescence-emitting centers in one crystal serves as an effective strategy for designing multicolor RTP materials）。

**对应发现点 2：**德国科学院院士维尔兹堡大学 Frank Würthner 教授肯定了三重态梯度设计策略调控室温磷光的工作（Trends Chem., 2025, 7, 208），指出该研究通过三重态梯度设计策略实现了纯有机体系的高效室温磷光，证明了在电荷分离的 S1 态与局域化于单一组分的三重态之间存在显著自旋轨道耦合的普适性设计（The concept of CT complexes with often substantial SOC's originating between (partially) charge-separated S1 states and (higher) triplet states localized primarily on

one of the two constituting components, either donor or acceptor), 突破了高效室温磷光材料必须依赖重金属的传统认知 (also proved to be successful even in the absence of heavy metals), 通过调控客体材料结构与能级实现了磷光寿命的宽时域调控 (This has been demonstrated by a significant number of donor-acceptor combinations, in which powders provided intense RTP and luminescence decay that can be extended up to hours for systems with both low radiative and non-radiative rates); 吉林大学于吉红院士肯定了该研究工作 (Chem. Soc. Rev., 2023, 52, 8005), 指出该工作通过三重态梯度能级设计, 调控主客体三重态能级差, 构筑了寿命可调的主客体有机室温磷光半导体材料体系..... (Huang et al. constructed a multi-host/guest ultra-long organic phosphorescence system using 10-phenylphenothiazine (PzPh) as a guest. Extensive tunable lifetimes were obtained by varying the host matrix, with these mH/G ultra-long RTPs also exhibiting excitation-dependent. RTP materials of this type are more complex..... 附件 2-4); 中国科学院上海药物研究所程震研究员重点介绍了该工作, 并引用主客体材料构筑机理 (Chem. Rev., 2023, 123, 13966), 指出这种实现长寿命磷光寿命调控的方法, 使其能够广泛应用于各种实际领域 (The present work offers a method to realize lifetime-tuning long-lived phosphorescence toward widespread real applications.....附件 2-5)。

**对应发现点 3:** 利用“亮态”三线态激子实现高效有机磷光闪烁体的工作发表后, 日本国家材料科学研究院 Hong-Tao Sun 教授在 Nature Photonics (2021, 15, 171) 发表题为《Metal-free scintillators excite X-ray community》的评论文章, 指出申请人的工作通过一个普适性的分子设计策略获得了高效的纯有机闪烁体, 解决了如何构建高效闪烁体这一挑战 (address this challenge by introducing a general molecular design principle for ..., 附件 2-6); 突破了传统高效闪烁体需要金属的局限性, 这一里程碑式的发现为低成本、柔性的辐射发光材料开辟了新思路 (This milestone finding surely signifies the start of a new avenue of research for low-cost, flexible, metal-free radioluminescence materials)。闪烁体领域的知名专家、福州大学杨黄浩教授在综述 Acc. Chem. Res. (2023, 56, 37) 中指出该工作通过捕获三重态激子, 有效提升 X 射线发光 (These organic phosphors harvested triplet exciton to efficiently enhance X-ray luminescence)。北京师范大学闫东鹏教授和哈佛大学 Rui Gao 博士重点介绍了该工作 (Sci. Bull., 2022, 67, 1015.), 指出该工作提出了一种基于分子磷光体构建高性能有机闪烁体的新路径“this work presents a new route to generating organic scintillators based on molecular phosphors”; 中国科学院院士香港中文大学(深圳)唐本忠教授和郑州大学臧双全教授肯定了研究工作 (J. Am. Chem. Soc., 2023, 145, 27095.), 指出该工作为开发高性能的闪烁体开辟了新的方向 (phosphorescent scintillators and thermally activated delayed fluorescence (TADF) scintillators have been reported in succession, which significantly increased the triplet exciton utilization rate and pointed a new direction for the development of

high-performance X-ray scintillators, 附件 2-7); 南京大学蒋锡群教授高度肯定了该工作 (Chem. Soc. Rev., 2024, 53, 10970.), 指出该工作首次报道了具有卓越能量转换能力的 X 射线有机磷光体的设计原则 (...firstly reported the design principles for X-ray-activated organic phosphors with exceptional energy transformation capabilities, 附件 2-8)。

五、代表性论文专著目录（不超过 8 条，其中代表性论文不超过 5 篇，代表性专著不超过 3 部）

（按照表格所示栏目填写支撑本项目重要科学发现的代表性论文专著详细情况，不超过 8 篇，按重要程度排序。所列论文专著应公开发表 2 年以上即 2023 年 8 月 1 日以前公开发表。所列代表作及论文应以省内单位或个人为主要完成单位，署名第一单位（标号为 1 的单位）应为国内单位。

“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”、“第一作者（含共同第一作者）”和“国内作者”，均应基于论文的全部作者进行填写，不得只填写本项目完成人或少填漏填。

其中，“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”和“第一作者（含共同第一作者）”的姓名表述应与论文原文的署名保持一致，“国内作者”填写作者的中文姓名。

该表所列论文专著的知识产权归国内所有且无争议，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年省部级（政府）科学技术奖励项目和本年度其他陕西省科学技术奖提名项目中作为支撑材料出现。用于提名陕西省科学技术奖的情况，已征得未列入项目主要完成人和主要完成单位的作者的同意，其中，未列入项目主要完成人的第一作者、通讯作者（含共同第一作者、共同通讯作者）已出具知情同意书面签字意见，与其他作者的有关知情证明材料均存档备查。）

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码 （xx 年 xx 卷 xx 页）	发表 时间	通 讯 作 者	第 一 作 者	国 内 作 者	他引 总次 数	检索数 据库	知识产 权是否归国 内所有
1	Colour-tunable ultra-long organic phosphorescence of a single-component	Nature Photonics	Long Gu, Huifang Shi, Liliang Fan	2019 年 13 卷 406-411	2019	Zhongfeng	Long Gu	谷龙，史慧芳，边丽芳，顾	575	Web of science	是
2	Wide-range lifetime-tunable and responsive ultralong organic phosphorescent multi-host/guest system	Nature Communications	Zongliang Xie, Xiayu Zhang, Heilan Wang	2021 年 12 卷 3522	2021	Tao Yu and	Zongliang Xie	谢宗良，张夏宇，王海兰	203	Web of science	是

3	Circularly Polarized Organic Room Temperature Phosphorescence from Amorphous Copolymers	Journal of the American Chemical Society	Long Gu, Wenpeng Ye, Xiao Liang, Huili Ma, Wenpeng Ye, Lulu Song, Lie	2021 年 143 卷 18527-18535	20 21 - 11	Zhongfu Gu	Lo ng Gu	谷龙, 叶文鹏, 梁啸, 吕安群, 马会利	188	Web of science	是
4	Organic phosphors with bright triplet excitons for efficient X-ray-excited luminescence	Nature Photonics	Xiao Wang, Huifang Shi, Huili Ma, Wenpeng Ye, Lulu Song, Lie	2021 年 15 卷 187-192	20 21 - 01	Zhongfu An, Xia	Xiao Wang, Huifang Shi, Huili Ma, Wenpeng Ye, Lulu Song, Lie	王晓, 史慧芳, 马会利, 叶文鹏, 宋露露, 吕安群	276	Web of science	是
5	Organic phosphorescent scintillation from copolymers by X-ray irradiation	Nature Communications	Nan Gan, Xin Zou, Mengyang	2022 年 13 卷 3995	20 22 - 01	Long Gu	Nan Gan, Xin Zou, Mengyang	甘楠, 邹欣, 董孟阳, 王崇	88	Web of science	是
6	《有机电子学》	科学出版社	黄维、密保秀、高志强	2011 年 3 月 第 1 版	20 11	黄维、	黄维	黄维、密保秀、高		中国图书书目	是
7	《生物光电子学》	科学出版社	黄维、董晓臣、江联辉	2015 年 1 月 第 1 版	20 15	黄维、	黄维	黄维、董晓臣、江联辉		中国图书书目	是
8	《有机半导体存储器》	科学出版社	黄维、解令海、位明友	2020 年 12 月 第 1 版	20 20	黄维、	黄维	黄维、解令海、位明友		中国图书书目	是
合 计									1330		

## 六、主要完成人情况（不超过 6 人）

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
黄维	1	学术委员会主任	教授	西北工业大学	西北工业大学	本项目主要负责人，对发现点一、二、三做出重要贡献，提出了有机室温磷光新材料的设计思路，构建了有机室温磷光性能提升与功能应用的发展框架，是代表性论文 1-5 的通讯作者。在该项目投入工作量占本人工作量 50%以上。
安众福	2	副院长	教授	南京工业大学	南京工业大学	本项目主要负责人，对发现点一、二、三做出重要贡献。提出了发色团限域的新机制，揭示了电子组态、分子结构以及聚集形态对磷光性能的影响规律，开创了有机室温磷光半导体在 X 射线成像领域的新应用，是代表性论文 1、3-5 的通讯作者。在该项目中投入工作量占本人工作量 80%以上。
谷龙	3	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对发现点一、二、三做出重要贡献。提出了多重发光中心设计策略，开拓了室温磷光材料在多重信息加密与紫外光探测等领域的新应用，是代表性论文 1、3 的第一作者。代表性论文 5 的通讯作者。在该项目中投入工作量占本人工作量 80%以上。



史慧芳	4	无	教授	南京工业大学	南京工业大学	对发现点一、三做出重要贡献。提出了有机室温磷光新材料设计思路,厘清材料结构与磷光性能的构效关系,开拓了材料在生物光子学领域的新应用,是代表性论文 1、4 的共同第一作者。在该项目中投入工作量占本人工作量 80%以上
王晓	5	无	副教授	厦门大学	西北工业大学	对创新点三做出重要贡献。提出“亮态三线态”有机闪烁体的新思路,突破了传统高效闪烁体需要金属的局限,开创了有机室温磷光在闪烁体领域的新应用,是代表性论文 4 的第一作者。在该项目中投入工作量占本人工作量 80%以上
于涛	6	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对创新点二做出重要贡献。提出三重态梯度能级设计的新思路,实现了高效室温磷光材料构筑及其寿命、圆偏振等性质的精准调控,系统揭示了电子组态、分子结构、能量转移过程等因素对室温磷光性能的调控机制,为创制高性能的有机室温磷光半导体新材料奠定了理论基础,是代表性论文 2 的通讯作者。在该项目中投入工作量占本人工作量 80%以上

## 七、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	本项目依托西北工业大学柔性电子研究院、柔性电子全国重点实验室、柔性电子材料与器件工信部重点实验室以及陕西省柔性电子重点实验室等主要平台完成。学校在该项目中，发挥了主导性和引领性的作用，为提升我国在该领域的国际竞争力作出了卓越贡献。项目团队依托学校多学科交叉和国家级科研平台，聚焦室温磷光的核心科学问题与关键技术，建立了从理论创新到应用开发的完整研究体系，创新性地构建了具有自主知识产权的多种高性能有机室温磷光半导体。材料的量子产率、磷光寿命及环境稳定性均达到国际领先水平，填补了国内该领域的多项技术空白。同时，学校为项目的实施提供了充足的人力、物力和财力支撑，帮助建成材料制备、性能表征和器件制备等各类实验室，同时学校在人才引进和培养方面给予了大力支持，是该项目的主要完成单位。
南京工业大学	2	本项目依托南京工业大学柔性电子（未来技术）学院所属的柔性电子全国重点实验室、国家先进生物与化学制造协同创新中心、柔性电子材料与器件国际联合研究中心以及教育部柔性电子国际合作联合实验室等多个国家级与部级高水平科研平台，紧密融合光学工程、材料科学与柔性电子学等交叉学科优势共同完成。学校在项目中始终发挥核心主导作用，在有机室温磷光半光导体的设计合成、机理研究、性能优化与应用拓展等方面提供了全方位的资源与技术支持，为我国在该前沿领域抢占国际制高点、提升全球竞争力作出了重大贡献。单位在项目实施过程中投入了充足的人力、设备和经费支持，建成涵盖材料制备、性能测试与器件集成等的先进实验室体系，并在高层次人才引进与专业团队培养方面持续给予政策保障，是该项目不可或缺的主要完成单位。

## 八、完成人合作关系说明

### 完成人合作关系说明

黄维（完成人1）、安众福（完成人2）、谷龙（完成人3）、史慧芳（完成人4）在2012年1月-2019年1月在有机磷光材料的设计合成方面展开合作研究，共同完成代代表性论文1。

黄维（完成人1）、安众福（完成人2）、谷龙（完成人3）、于涛（完成人6）在2012年1月-2021年1月在有机磷光材料的性能调控展开合作研究，共同完成代代表性论文2和代表性论文3。

黄维（完成人1）、安众福（完成人2）、谷龙（完成人3）、史慧芳（完成人4）、王晓（完成人5）在2012年1月-2022年7月在有机磷光材料在闪烁体中的应用展开合作研究，共同完成代代表性论文4和代表性论文5。