

# 陕西省自然科学奖公示信息

(2025年度)

## 一、项目基本情况

项目名称	光存储材料中多场协同调控的荧光模式选择及信息存取机制研究
主要完成人	高当丽，王育华，张翔宇，庞庆，辛红，柴瑞鹏
主要完成单位	西安建筑科技大学，兰州大学，长安大学

## 二、提名意见（适用于提名单位）

提 名 者	陕西省教育厅	提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input checked="" type="checkbox"/> 二等奖
-------	--------	------	--

提名意见：

步入 21 世纪以来，人工智能、5G、云计算、物联网等技术加速迭代，数据规模与产品数量呈爆发式增长。海量数据存储需求与产品安全检测压力凸显，亟需高效、安全的数据存储与防伪技术的新理论、新方法。

项目组成员长期深耕半导体光功能材料开发、光电特性与机理研究以及信息存储与加密应用探索。本项目以光功能材料在信息存储与防伪领域的应用为研究目标，以“构建多场协同调控下多色多模荧光材料的时空动态演化高通量信息存储体系”为创新研究主线，系统探究了无机光子信息存储材料的合成、荧光特性、存储机制及应用，提出了“多色多模正交复用提升信息存储容量”的策略。其中，五模荧光粉设计及动态图案演化，为“防伪与存储赋予了时间维度标识”，突破了传统单模防伪的静态局限；基于多场协同调控的“宽光谱充电与寻址陷阱多级信息存储”理念，为高通量信息存储材料设计奠定了理论基础；对陷阱类型、载流子路径的探索，以及对局域余辉机理模型的实验验证，为信息存储与同步光学防伪技术向“多维度、可调控、高通量”的方向发展提供了坚实的理论与实验基础。

该项目历时近十年，发表SCI论文60余篇，引用850余次。其中，五篇代表作在Web of Science上引用290余次，单篇他引超过100次，引用覆盖39个国家和地区。授权发明专利3项，专利转化横向项目1项。此外，项目负责人受邀约合著了“*Persistently Luminescent Materials: From Development to Applications*” (Wiley)及《碳中和原理与技术》专著。项目负责人为陕西省青年科技新星，陕西省百名优秀青年科技新星，荣获陕西高等学校科学技术奖2次和陕西省科学技术奖1次。带领团队在新型多色多模发光材料的开发、机理研究及应用探索等关键科学问题上取得了具有重要科学意义的创新和突破，提升了团队在光学领域的自主创新能力和国内外影响力。

提名该项目为陕西省自然科学奖 二 等奖。

说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。项目组与提名单位沟通后，做出提名等级意见；提名项目提交后，提名等级建议不得变更。

### 三、项目简介

本项目为基础研究，隶属于无机非金属半导体与信息功能材料研究领域。

步入 21 世纪以来，人工智能、5G、云计算、物联网等技术加速迭代，数据规模与产品数量呈爆发式增长。美国《数据时代 2025》报告显示，全球数据总量已从 2018 年的 33 ZB 增长至 2025 年的 175 ZB；伴随商品供给的增长，假冒产品问题日益突出，其涉案价值从 2016 年的约 1070 亿美元攀升至 2021 年的约 2060 亿美元。在此背景下，亟需高效、安全的数据存储与防伪技术的新理论、新方法。

作为第四代信息存储与同步防伪的候选材料之一，余辉储能材料正受到广泛关注。但其应用面临信息存储容量低、信息读出的荧光模式单一且缺乏可控性等关键科学问题，核心症结在于余辉机理尚未明晰。针对上述关键科学问题，在国家自然科学基金项目（编号：11604253）、陕西省青年科技新星项目（编号：2015KJXX-33）、陕西省自然科学基金基础研究计划面上项目（编号：2018JM1036）及中国博士后面上项目（编号：2015M570816）的资助下，经过近十年的深入研究，团队揭示了高效余辉材料设计的普适方法，建立了局域陷阱余辉机理，提出了一系列提升存储容量、实现荧光模式按需选择的措施与方法。重要科学发现如下：

1. 提出了多模记忆荧光动态智能防伪材料的概念：开发了四模、五模长余辉荧光材料，提出了基于余辉材料的多色多模记忆荧光动态时空演化的智能防伪策略，揭示了光/热诱导的陷阱双稳态选择机制，突破了传统单模防伪的静态局限，为更复杂的光学智能防伪技术设计与开发提供了新思路。其“五模发光”体系也为后续多刺激响应材料（如X射线、热、机械应力响应材料）提供了理论启发。

2. 构建了多场协同控制的荧光模式选择潜指纹成像范式：合成了 $\text{Zn}_2\text{GeO}_4\text{:Mn,Li,K}$ 纳米余辉材料，通过 $\text{Li}^+$ 和 $\text{K}^+$ 共掺杂的带隙/缺陷工程，实现高亮度、长持续时间的绿色多模式发光，可在非荧光、荧光及长余辉基底上有效消除背景干扰，清晰呈现三级以上细节，揭示了不同发光模式规避背景干扰的机制，形成多模式发光用于潜指纹成像技术手段，为突破传统方法在复杂基底检测中的局限提供了思路，也为高灵敏度检测提供材料支撑和技术保障。

3. 建立了宽光谱充电与可寻址陷阱耦合的多波长复用光信息存储理论：合成  $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 共掺杂铈镓酸盐材料，该材料具有红绿双色长余辉发光特性，且可通过单/双光子过程被紫外-可见-近红外光有效重复充电，发现了红绿长余辉呈现相反的温度依赖特性，提出基于不同陷阱类型与双发光中心耦合的温度依赖发光机制，揭示了宽光谱充电与热调控多维信息存储原理，为多路光存储材料设计和高效光存储技术突破提供了理论支撑和技术原型。

该项目历时近十年，累计发表SCI论文60余篇（含一区论文10余篇），被引850余次。其中5篇代表性论文被引290余次，单篇最高他引100余次。第一完成人荣获陕西省青年科技新星、百人优秀青年科技新星称号，并获校首批“雁塔青年学者”项目资助。

## 四、客观评价

【限2页。围绕科学发现点的原创性、公认度和科学价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价内容要有客观依据，主要包括国内外同行在重要学术刊物（专著）和重要国际学术会议等公开发表的学术性评价意见，国内外重要科技奖励等，可在附件中提供证明材料。非公开资料（如私人信函等）不能作为评价依据。】

该项目研究成果受到国内外同行的广泛关注与认可,5篇代表性论文被中外学者引用290余次,单篇最高他引100余次。研究首次提出余辉材料的多模信息存储与同步加密应用,建立了多模荧光机理,为材料、物理、化学学科的发展提供了重要推动。第一完成人长期深耕无机发光材料领域前沿研究,担任*Nanomaterials*客座编辑,为60余种国际期刊的审稿人,并入选《*Journal of Materials Chemistry C*》年度杰出审稿人(全球共21人, [Journal of Materials Chemistry C: outstanding peer reviewers](#))。

代表性论文1被西安交通大学物理学院杨生春教授在 *Chem. Eng. J* (2023, 455, 140752, 高被引论文) 中引用,用于阐释光激励荧光过程的多模荧光机理;被华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室夏志国教授课题组及其他课题组先后在 *Nat. Commun.* (2022, 13(1), 7589, 高被引论文)、*Adv. Funct. Mater.* (2024, 34, 2405048)、*Light-Sci. Appl.* (2024, 13, 286) 等成果中正面引用,赋予防伪标识时间维度的信息,突破了传统单模防伪的静态局限。另外,还有多篇综述文章包括 *Coordin. Chem. Rev.*, 2025, 540, 216770; *Adv. Opt. Mater.*, 2023, 11(2), 2201827; *J. Mater. Chem. C*, 2023, 11(26), 8649-8687 等引用了该工作。该论文首次提出“单材料多模式”信息加密防伪策略,被后续研究视为解决“静态防伪易复制”问题的关键突破,单篇他引 100 余次。

代表性论文2被北京理工大学沈国震教授课题组引用,该团队针对传统加密技术中传感器与处理器分离导致的数据传输易泄露问题,基于本研究提出的多模防伪理念,在传感器中集成加密功能(实现数据生成与加密在同一设备完成)以提升安全性,并介绍了光突触阵列通过调节刺激次数和顺序实现信息加密的应用(*Adv. Funct. Mater.* 2024, 34, 2315383)。此外,项目课题组提出的光激励荧光模式概念及防伪与信息存储应用,先后被中国科学院国家纳米科学中心段鹏飞教授等多个课题组的研究成果引用(包括 *Angew. Chem. Int. Ed.* 2025, 64, e202417223; *Angew. Chem. Int. Ed.* 2023, 62, e202308420; *Nano Lett.* 2023, 23, 8932-8939)。

代表性论文3被江南大学材料科学与工程学院林恒伟、杜家仁教授课题组在 *Adv. Mater.* (2024, 36, 2314083) 综述文章中以图 7a、b 插图形式引用:“光作为输入(存储电荷)和输出(读取发光)的工具,为余辉材料在信息存储、辐射探测等领域的应用可行性提供了实验证据;该论文从双色光/热激励的宏观现象(光控发光动态)与微观机制(能级激发特性)支撑的全局余辉机理两个层面,为余辉材料‘光存储-光读取’功能提供了核心数据与理论支撑”。

吉林大学无机合成与制备化学国家重点实验室于吉红教授在国际著名期 *Chem. Soc. Rev.* (2023, 52, 8005-8058, 高被引论文、热点论文) 上发表综述性论文,引用了本项目代表性论文4,

其评述道“过渡金属离子作为激活剂时，其能级结构对配位场环境高度敏感，导致发光谱带普遍具有宽化且非定域的特性”；波兰密茨凯维奇大学的 Marcin Runowski 教授在 *Adv. Funct. Mater.* 2024, 34, 2307791 中引用了代表性论文 4 中的荧光显影指纹技术，并成功应用荧光材料显影技术。

代表性论文 5 被 *Laser Photonics Rev.* (2024, 18, 2300751, 热点论文, 高被引论文) 综述文章以插图形式报道：高（团队）通过水热法成功合成了两种荧光粉—绿色发光的  $\text{Zn}_2\text{GeO}_4\text{:Mn,x\%Li}$  ( $x=0-20$ ) 和纯红色发光的  $\text{NaLiGe}_4\text{O}_9\text{:Mn}$ ，它们具备光致发光 (PL)、长余辉发光 (PersL) 和光激发发光 (PSL) 等多色、多模式发光特性。当长余辉图案无法用肉眼观察时，可通过 808 nm 激光二极管（功率 0.6 W）照射进行光激发发光成像，为防伪验证增添了新手段。如图 5d 所示，这一特性在数字加密和防伪图案中可呈现动态且多色的变化[109]。原文 (Gao et al. successfully synthesized two types of phosphors[109], green emitting  $\text{Zn}_2\text{GeO}_4\text{:Mn,x\%Li}$  ( $x=0-20$ ), and pure red-emitting  $\text{NaLiGe}_4\text{O}_9\text{:Mn}$ , with multicolor and multimode luminescence, including PL, PersL and PSL, by hydrothermal method, and after the PersL pattern was not visible to the naked eye, 808 nm laser diode irradiation (0.6 W) for PSL imaging, adding a new means of verifying forgery, which shows dynamic and multicolor changes in digital encryption and anti-counterfeiting patterns, as demonstrated in Figure 5d)。

**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)

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 (年月日)	通讯作者 (含共同)	第一作者 (含共同)	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	Quintuple-mode dynamic anti-counterfeiting using multi-mode persistent phosphors	Journal of Materials Chemistry C	Dangli Gao, Jie Gao, Feng Gao, Qingqing Kuang, Yong Pan, Yafei Chen, Zhengwei Pan	2021 年第 9 卷 16634-16644 页	2021 年 12 月 2 日	Dangli Gao	Dangli Gao	高当丽, 高洁, 高峰, 匡清清, 潘雍	92	SCI	是
2	Achieving opto-responsive multimode luminescence in $Zn_{1+x}Ga_{2-2x}Ge_xO_4:Mn$ persistent phosphors for advanced anti-counterfeiting and information encryption	Materials Today Physics	Dangli Gao, Qingqing Kuang, Feng Gao, Hong Xin, Sining Yun, Yuhua Wang	2022 年第 27 卷 100765 页	2022 年 10 月 15 日	Dangli Gao, Yuhua Wang	Dangli Gao	高当丽, 匡清清, 高峰, 辛红, 云苏宁, 王育华	88	SCI	是
3	Trap-dependent optical/thermal stimulated luminescence of gallate phosphors charged by UV-visible-NIR light for multiplexed data storage	Advanced Optical Materials	Dangli Gao, Zhigang Wang, Qing Pang, Qingqing Kuang, Feng Gao, Xiangyu Zhang, Sining Yun, Xiaojun Wang	2023 年第 11 卷 2300303 页	2023 年 8 月 7 日 (在线出版: 2023 年 4 月 28 日)	Dangli Gao, Sining Yun, Xiaojun Wang	Dangli Gao	高当丽, 王志刚, 庞庆, 匡清清, 高峰, 张翔宇, 云苏宁	5	SCI	是

4	Zinc Germanate nanophosphors with persistent luminescence for multi-mode imaging of latent fingerprints	ACS Applied Nano Materials	Dangli Gao, Feng Gao, Qingqing Kuang, Xiangyu Zhang, Zihan Zhang, Yong Pan, Ruipeng Chai, Huan Jiao	2022 年第 5 卷 9929-9939 页	2022 年 6 月 17 日	Dangli Gao, Huan Jiao	Dangli Gao	高当丽, 高峰, 匡清清, 张翔宇, 张子涵, 潘雍, 柴瑞鹏, 焦桓	17	SCI	是
5	Tuning multicolour emission of Zn <sub>2</sub> GeO <sub>4</sub> :Mn phosphors by Li <sup>+</sup> doping for information encryption and anti-counterfeiting applications	Dalton Transactions	Dangli Gao, Kaiwei Ma, Peng Wang, Xiangyu Zhang, Qing Pang, Hong Xin, Zihan Zhang, Huan Jiao	2022 年第 51 卷 553-561 页	2022 年 1 月 4 日	Dangli Gao, Huan Jiao	Dangli Gao	高当丽, 马凯伟, 王鹏, 张翔宇, 庞庆, 辛红, 张子涵, 焦桓	26	SCI	是
6											
7											
8											
合 计									228		
补充说明（视情填写）：											
代表论文 3 的在线出版时间（Published online）为 4 月 28 日，论文倒数第 2 页有显示。											

## 六、主要完成人情况表

姓 名	高当丽	排 名	1
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目主要学术贡献： 主持该项目，对重要科学发现1-5均做出了创造型贡献，完成了代表性论文1-5研究内容的方案设计、部分实验的方案设计和代表性论文1-5的撰写、投稿工作。(1) 提出多模动态防伪概念：开发出五模长余辉荧光材料，创新性构建基于多色多模时空演化的动态防伪体系[代表论文1,2]；(2) 提出多场协同荧光模式选择成像新范式：设计合成Zn <sub>2</sub> GeO <sub>4</sub> :Mn纳米磷光体，通过Li <sup>+</sup> /K <sup>+</sup> 共掺杂调控带隙与缺陷态，实现高亮度、长持续的绿色余辉发光[代表论文4,5]；(3) 构建了宽光谱充电多级光存储新体系：构建Mn <sup>2+</sup> /Cr <sup>3+</sup> 共掺铈镓酸盐材料，实现红绿双色余辉发光。创新性提出“宽光谱充电-可寻址陷阱耦合”多波长复用策略[代表论文3]。指导毕业硕士研究生14名，其中10名参与了本项目的实验研究工作。			

姓 名	王育华	排 名	2
行政职务	甘肃省光致无机发光材料行业技术中心主任、兰州大学光转换材料与技术国家地方联合工程实验室主任、甘肃省光功能材料工程实验室主任		
技术职称	教授		
工作单位	兰州大学		
完成单位	兰州大学		
对本项目主要学术贡献： 参与提出了光/热诱导陷阱双稳态的选择机制，参与了实验方案设计、研究内容的讨论及论文的修改工作。			



姓 名	张翔宇	排 名	3
行政职务	无		
技术职称	高级工程师		
工作单位	长安大学		
完成单位	长安大学		
对本项目主要学术贡献： (1) 参与代表论文 3-5 的实验设计与指导、数据的测量表征和分析及论文的修改工作；(2) 参与分析并揭示了余辉反向温度依赖特性和基于陷阱分级填充的热调控发光机理[代表论文 3]。			

姓 名	庞庆	排 名	4
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目主要学术贡献： (1) 负责代表论文 3 余辉材料的能带结构和态密度的计算；(2) 参与代表论文 5 共掺杂调控的多模发光机理的分析讨论。			

姓 名	辛红	排 名	5
行政职务	无		
技术职称	讲师		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		

对本项目主要学术贡献：

参与代表论文 3, 5 中余辉材料的合成指导和余辉发光性能的讨论分析。

姓 名	柴瑞鹏	排 名	6
行政职务	无		
技术职称	讲师		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目主要学术贡献： 参与代表论文 4 余辉材料的热释曲线测试与分析，并参与余辉发光机理的探究。			

## 七、主要完成单位情况表

单位名称	西安建筑科技大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>西安建筑科技大学是该项目完成的负责单位。主要贡献：(1) 组织并完成了项目的申报、策划和实施工作；(2) 为项目的顺利实施提供了人力资源（高当丽、庞庆，辛红和柴瑞鹏均为西安建筑科技大学教师）与优质的科研平台(纳米材料制备及光谱测试实验室和学校大型仪器共享测试平台)；(3) 协调组织参与人员的分工，保证实验的顺利完成；(4) 为本项目主体任务的完成单位，是本项目代表性论文1-5的第一完成单位。</p>	

单位名称	兰州大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>兰州大学为本项目的辅助完成单位。主要贡献：(1) 为本项目提供了人员支持（王育华教授）和一些实验支持（提供部分实验测试平台），保证实验的顺利进行。</p>	

单位名称	长安大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>长安大学为本项目的辅助完成单位。主要贡献：(1) 为本项目提供了工作人员支持（张翔宇），保证实验的顺利进行；(2) 提供了本项目所需的图书资料和数据库等资源；(3) 是本项目论文 3-5 的第二完成单位。</p>	

## 完成人合作关系说明

本研究团队由高当丽（项目负责人）、张翔宇、庞庆、辛红、柴瑞鹏及合作学者王育华组成，长期致力于无机发光材料的性能调控与应用研究。团队成员通过紧密协作，形成了优势互补的研究体系，具体合作情况如下：

1. 与王育华教授的合作：2021 年起，团队与兰州大学王育华教授建立合作关系，共同开展长余辉发光材料研究。2022 年联合发表代表性论文 1 篇（标注为“代表论文 2”），并于 2023–2024 年持续合作发表 3 篇论文，推动了该方向的理论突破。

2. 与张翔宇高级工程师的合作：张翔宇作为团队负责人高当丽的硕士研究生同学（始于 2005 年），合作延续至今已逾 20 年。双方共同发表论文 50 余篇，覆盖材料设计、性能表征及机制解析等多领域，形成稳定的核心科研伙伴关系。

3. 与庞庆副教授的合作：庞庆自 2012 年加入西安建筑科技大学高当丽课题组，迄今合作发表论文 27 篇。其核心贡献在于余辉材料的第一性原理计算，为团队提供了关键理论支撑。

4. 与辛红老师的合作：辛红自高当丽教授成立课题组后便参与合作，累计联合发表论文 10 余篇。主要承担材料合成指导与数据分析工作，并深度参与两项省级科研项目：陕西省教育厅项目《无机氟化物富勒烯纳米材料的控制合成及机理研究》（12JK0453）；陕西省自然科学基金面上项目《 $\text{NaYF}_4$  核-壳结构中上转换荧光异向输出与图案切换》（2018JM1036）。

5. 与柴瑞鹏老师的合作：柴瑞鹏与高当丽于 2011 年同期入职西安建筑科技大学，合作历时 13 年，共同发表论文 10 余篇，在材料体系构建与性能优化方面贡献显著。

团队核心成员（高当丽、张翔宇、庞庆、辛红、柴瑞鹏）凭借上述合作成果，于 2021 年联合申报并荣获陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖二等奖，体现了团队协作的学术价值与创新水平。

### 完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	论文合著	王育华/2	2021 年 6 月-今	代表论文 2(共同通讯作者)	见附件
2	论文合著	张翔宇/3	2005 年 9 月-今	代表论文 3-5(合作者)	见附件
3	论文合著	庞庆/4	2012 年 9 月-今	代表论文 3, 5(合作者)	见附件
4	论文合著	辛红/5	2011 年 9 月-今	代表论文 2, 5(合作者)	见附件
5	论文合著	柴瑞鹏/6	2011 年 9 月-今	代表论文 4(合作者)	见附件
.....					
(不限 条目)					