

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	等离激元与稀土纳米光学体系相互作用新效应研究
主要完成人	张正龙、郑海荣、陈环、付正坤、严蕾、李金萍
主要完成单位	陕西师范大学

二、提名意见（适用于提各单位）

提 名 者	陕西省教育厅
<p>提名意见（不超过 600 字）：</p> <p>稀土发光涉及国家资源安全、高新技术等多个核心领域，如何构建稀土发光耦合新体系，攻克稀土发光领域的基础科学问题和技术难题，是稀土发光领域面临的核心障碍。本项目围绕“等离激元近场调控稀土离子发光”特色研究方向，利用等离激元近场增强和局域，以及纳米热效应，在时间、空间和能量上实现了对稀土离子发光性质的精密调控，发现了等离激元与稀土纳米光学体系相互作用新机制和新效应，拓展纳米光学和发光学的研究领域，取得了包括“首次将稀土离子发光寿命压缩至纳秒量级”、“发现等离激元调控稀土离子激发态吸收和能量共振转移物理机制”、“开发了适用于低温环境的纳米晶体结构快速转变新方法”等多项原创性成果。研究成果得到“中国光学十大进展”、“稀土发光领域里程碑进展”等高度认可和评价，相关成果达到国际领先水平。</p> <p>提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。</p>	
<p>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。</p>	

三、项目简介

(限 2 页)

我国是稀土大国，稀土研究是全球高新技术产业的核心支撑，是国家重大科技战略的核心组成部分，涉及资源安全、高新技术、绿色能源等多个核心领域。稀土发光是国家稀土发展战略的六大方向之一，在成像显示、激光器、光电子器件等领域具有极其重要的战略意义。稀土离子具有能量高度局域化的 4f 电子构型和丰富的线状能级分布，稀土离子发光表现出丰富的超高分辨跃迁、超长的光学相干时间、kHz 及其以下的均匀谱线宽度、MHz 到 GHz 大范围变化的非均匀谱线展宽和优良的光稳定性，已被应用于自旋操纵单光子源、超分辨成像、光量子存储器、纳米激光器、等前沿领域。然而，由于跃迁选择定则限制，稀土离子的荧光寿命较长（微秒到毫秒量级），荧光量子产率较低，难以满足下一代光互连的光子高频操控需求，且光场分布和掺杂结构难以精细调控，均制约了稀土发光在量子单光子源、量子存储、纳米激光器等重点科技领域中的应用，是稀土发光突破传统研究和应用的核心障碍。

基于表面等离激元的纳米近场光学，是具有巨大理论研究价值和应用开发潜力的新兴前沿领域，近年来得到了快速发展。具有显著场增强和超衍射极限限域效应的等离激元近场效应，为提高稀土发光效率和荧光寿命提供了新的思路和途径。例如，金属纳米结构形成的纳米光腔，能够将电磁场局域在纳米间隙处，极大地压缩光场模式体积，实现局域电磁场强度的巨大增强，是获得近场光场调控及分子光谱增强的重要体系，是目前光学领域的前沿热点领域。将等离激元纳米光腔与稀土掺杂发光体系相融合，有望获得时间域、频率域和空间域光学性质可控，具有高灵敏度和高分辨率的高品质发光体系。“如何将传统的稀土发光研究与新兴的等离激元研究进行有效融合，构建等离激元与稀土发光中心的新耦合体系，攻克稀土发光领域在应用发展中遇到的难题，拓展等离激元光子学的研究领域，进而发展耦合体系相互作用的新物理和新应用”，是本项目拟解决的关键科学问题。

本项目围绕“等离激元近场调控稀土离子发光”特色研究领域，针对以上关键科学问题，利用等离激元近场增强和局域热效应，在时间、空间和能量上实现了对稀土离子发光性质的精密调控，发现了等离激元与稀土纳米光学体系相互作用新机制和新

效应，取得了多项创新性成果，主要包括：1) 首次将稀土离子发光寿命压缩至纳秒级，将现有压缩纪录提高了两个数量级，量子产率提高了 1000 倍，并获得稀土发光的手性辐射荧光。2) 利用金属纳米结构等离子光热效应，实现对稀土离子发光在增强和猝灭之间的快速切换；利用稀土离子反斯托克斯辐射制冷实现冷光镊效应，解决了传统光镊中强光束对样品的损伤问题。3) 发明了适用于低温环境 (<11K) 的纳米晶体结构快速 (<1ms) 制备及优化方法，突破了无法在低温环境中进行纳米晶体生长的常规认识；揭示了等离子局域场、热载流子及热效应在调控纳米体系分子和稀土发光结构中作用机制。4) 实现了片上稀土离子的超分辨上转换发光，揭示了等离子调控稀土离子激发态吸收和能量共振转移物理机制。5) 发现多极共振等离子调控高分辨光谱中的非线性效应，揭示针尖增强光谱的亚纳米分辨机理。具体研究思路 and 方案如图 1 所示：

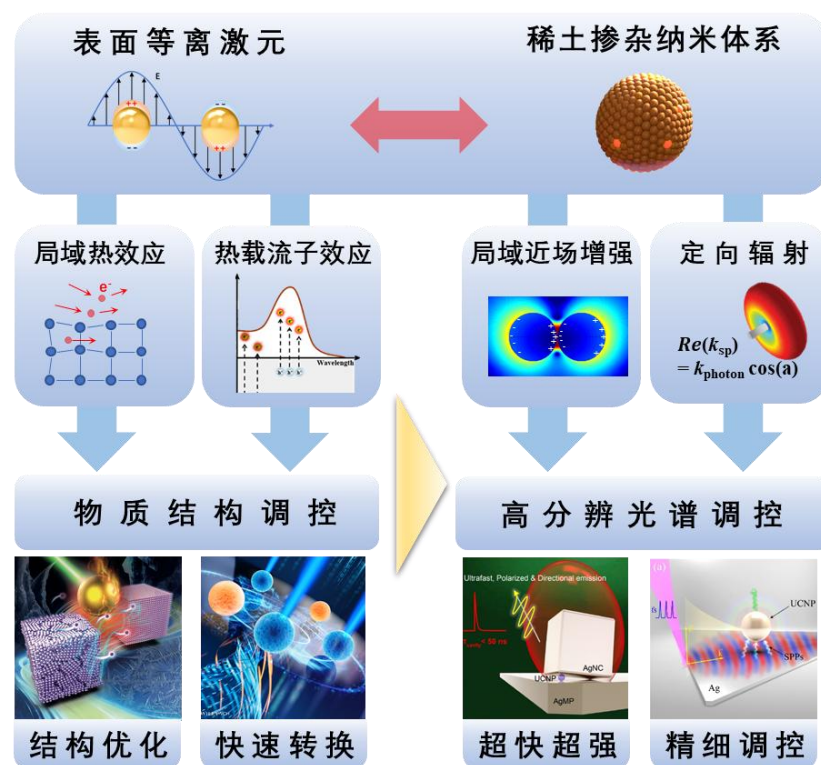


图 1. 研究思路和方案

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。】

针对稀土离子因禁戒跃迁导致的发光寿命长、量子产率低等问题，首次将稀土离子发光寿命压缩至纳秒级。团队基于前期在“片上等离激元调控稀土离子发光”方面的积累，设计并构建了等离激元倾斜纳米光腔，成功将稀土离子 f-f 跃迁发光寿命缩短至 50 纳秒以内，量子产率提升高达 1000 倍。该工作被审稿人评价为“稀土发光领域里程碑式的进展”，并入选 Nature Photonics 封面论文，荣获 2022 年度“中国光学十大进展”。相关成果已被多个国际重要期刊广泛参考和引用（如 Nat Photonics (2025) 19 692; Nat Commun (2024) 15 9880; Nat Commun (2023) 14 2719 等）；欧洲科学院院士、美国工程院院士、ACS Nano 主编 Marzán 教授在其综述论文中 (Chem. Rev. (2023) 123 3493) 评论道：“他们创新性使用一种倾斜纳米光腔，使稀土发光领域亚 50ns 的超快上转换发光成为了可能...”，以及新加坡科学院院士、稀土领域专家刘小钢教授，高度评价了等离激元倾斜纳米光腔的优势策略 (Sci China Chem (2023) 66 2640)，此外来自劳伦斯伯克利国家实验室 Artur Bednarkiewicz 研究员 (Chem. Soc. Rev. (2025) 54 983) 在其综述中对该工作予以高度评价。[部分详见附件科学评价一]

自主研发的真空光镊光谱系统，使自由空间中稀土纳米晶发光光谱的高精度测量成为可能，实现了稀土发光在增强态与猝灭态之间的快速切换，信号对比度高达 10000:1，阐明了光致热效应对其发光的调控机理。该成果为德克萨斯大学的 Pavana (Nat Commun (2023)) 14, 5133、西湖大学的 Xu (Adv. Funct. Mater. (2025) 2423155) 等人开展的关于光存储量子芯片、光量子信息的加密存储与计算等方面的工作提供参考和支持。此外，发现等离激元调控光与纳米体系相互作用的非线性效应，提出了针尖梯度光场对高分辨光谱的调控作用机制。这些工作已被 (Nat Rev Chem (2018) 2 216; Nat Rev Phys (2020) 2 253; Chem Soc Rev (2021) 50 3519; Nat Rev Chem (2022) 6 259; Chem Soc Rev (2022) 51 3609; Chem Rev (2023) 123 4146; Chem Rev (2023) 123 10808; Chem Sci (2025) 16 1506; Chem Phys Rev (2023) 4 041309; Chem Soc Rev (2025) 546553 等) 多次正面评述，以及 SERS 的发现者 Van Duyne 教授在其评述论文 (Chem Rev (2017) 117 7583) 中，对我们在等离激元调控高分辨光谱及结构调控方面的工作进行了长篇幅的高度评价[部分详见附件科学评价二]；Wilson 等人针对我们在该领域的贡献做出了三个段落 700 余个单词的正面评价 (Chem Soc Rev (2020) 49 6087)，此外，该成果为 Kazuma 等人实现针尖等离激元调控原子级结构和原位高分辨光谱方面的

研究提供参考和支持 (Science (2018) 360 521) [部分详见附件科学评价三]。

我们首创的等离子体热效应调控纳米结构生长新方法,打破了传统材料生长对高温和长时间周期的依赖,发现了等离子体热电子、热效应和局域场效应在调控纳米体系过程中的作用机制。该工作一经发表就被国内外同行多次参考和高度评价 (Chem Soc Rev (2021) 50 2173; Chem Rev (2020) 120 6247; Chem Soc Rev (2020) 49 2481; Chem Soc Rev (2021) 50 12070 等)。基于该成果, Albrecht 等人开展了三维原子尺度上的等离子体调控纳米体系结构生长 (Adv Mater (2021) 33972), Jorge Gascon 教授等人评价该工作在稀土发光纳米体系结构领域做出了突出贡献,为纳米材料生长和优化等提供了新方法,使在低温环境中生长纳米材料成为可能 (Chem Soc Rev (2021) 502173; Chem Soc Rev (2021) 50 12070); 中国科学院上海硅酸盐研究所,在其网站首页报道和肯定了这个工作。[部分详见附件科学评价四]

率先实现了单晶原子级平整片上的等离子体多通道高效传输,衰减长度可达几十微米,超过了之前等离子体传输的前期报道并已接近理论极限,继而实现了片上稀土纳米晶的上转换超分辨发光,揭示了近场调控稀土离子发光的关键物理机制。该工作为稀土发光寿命压缩至纳秒级提供了关键基础,对推进等离子体光子器件的片上集成及光量子信息应用具有重要意义。成果发表后,受到东南大学李全院士 (Light: Science & Applications (2022) 1 223)、德国拜罗伊特大学 Markus 教授 (Nano Lett (2020) 3 2152) 等国内外学者的高度评价。且基于一维纳米线结构等离子体手性传输,为远程光信息传输和测量开发了一种新方法。相关工作被 Nature 主页进行专题介绍。针对原子尺度下的等离子体与分子纳米体系,证实了核量子效应与量子多体效应在分子纳米体系等离子体调控过程的重要作用机制,澄清了分子在铂表面的吸附位问题。[部分详见附件科学评价五]

综上,本项目研究的等离子体效应对物质结构调控、高分辨光谱增强和调控,以及与纳米体系相互作用新效应等,为精准构建和调控等离子体光场结构、在纳米及亚纳米尺度下精密操控光与物质相互作用提供重要支持。通过与国内外相关研究综合对比,以及客观评价和引用情况分析,我们在等离子体与纳米体系相互作用效应研究处于国际先进水平,在等离子体调控稀土超快发光方面的研究达到国际领先水平。

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，应公开发表 2 年以上，即 2023 年 8 月 1 日前)

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	Sub-50-ns ultrafast upconversion luminescence of a rare- earth-doped nanoparticle	Nature photonics	Huan Chen, Zihe Jiang, Huatian Hu, Bowen Kang, Baobao Zhang, Xiaohu Mi, Lei Guo, Chengyun Zhang, Jinping Li, Jiangbo Lu, Lei Yan, Zhengkun Fu, Zhenglong Zhang, Hairong Zheng and Hongxing Xu	2022.16.65 1-657	2022.8.8	Zhenglong Zhang, Hairong Zheng	Huan Chen	陈环, 姜 紫赫, 胡 华天, 康 博雯, 张 宝宝, 弥 小虎, 郭 蕾, 张成 云, 卢江 波, 李金 萍, 严	71	WOS, CSCD	是

								蕾, 付正 坤, 张正 龙, 郑海 荣, 徐红 星			
2	Plasmon-Assisted Self- Encrypted All-Optical Memory	Advanced Functional Materials	Chengyun Zhang, Min Ji, Xilin Zhou, Xiaohu Mi, Huan Chen, Baobao Zhang, Zhengkun Fu, Zhenglong Zhang, and Hairong Zheng	2023.33.22 08561	2022.11.2 0	Zhenglo ng Zhang, Hairong Zheng	Cheng yun Zhang	张成云, 吉敏, 周 夕琳, 弥 小虎, 陈 环, 张宝 宝, 付正 坤, 张正 龙, 郑海 荣	7	WOS, CSCD	是
3	Plasmon-Driven Catalysis on Molecules and Nanomaterials	Accounts of chemical research	Zhenglong Zhang, Chengyun Zhang, Hairong Zheng, and Hongxing Xu	2018.52.25 06-2515	2019.8.19	Hongxi ng X	Zhengl ong Zhang u	张正龙, 张成云, 郑海荣, 徐红星	267	WOS, CSCD	是
4	Multiplasmons-Pumped Excited-State Absorption	ACS Photonics	Huan Chen, Meijuan Sun, Jie	2021,8,133 5-1343.	2021.3.4	Zhenglo ng	Huan Chen	陈环, 孙 美娟, 马	19	WOS, CSCD	是

	and Energy Transfer Upconversion of Rare-Earth-Doped Luminescence beyond the Diffraction Limit		Ma, Baobao Zhang, Chi Wang, Lei Guo, Tao Ding, Zhenglong Zhang, Hairong Zheng, and Hongxing Xu			Zhang, Hairong Zheng, and Ho ngxing Xu		杰, 张宝 宝, 王驰, 郭蕾, 丁 涛, 张正 龙, 郑海 荣, 徐红 星			
5	Multiple surface plasmon resonances enhanced nonlinear optical microscopy	Nanophotonics	Xiaohu Mi, Yuyang Wang, Rui Li, Mengtao Sun, Zhenglong Zhang and Hairong Zheng	2019; 8, 487–493	2019.1.23	Mengta o Sun, Zhenglo ng Zhang	Xiaohu Mi	弥小虎, 王宇阳, 李瑞, 孙 萌萌涛, 张 正龙, 郑 海荣	22	WOS, CSCD	是
6	Plasmon Assisted Near-Field Manipulation and Photocatalysis	Multidisciplinary Digital Publishing Institute	Zhenglong Zhang	ISBN: 978-3-0365-8320-4.	2023	Zhenglo ng Zhang	Zhengl ong Zhang	张正龙			是
7	Plasmonic Photocatalysis	Springer Nature	Zhenglong Zhang	ISBN: 978-981-19-5187-9.	2022	Zhenglo ng Zhang	Zhengl ong Zhang	张正龙			是
8	等离激元光催化原理和应用.	清华大学出版社	张正龙	ISBN: 978-7-302-59378-2	2021	张正龙	张正龙	张正龙			是

合 计	386		
补充说明（视情填写）：			

六、主要完成人情况表

姓 名	张正龙	排 名	1
行政职务	无	技术职称	教授
工作单位	陕西师范大学	完成单位	陕西师范大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>项目总体设计，主持项目的全面工作。是创新发现点 1-5 的主要完成人和贡献者。是 5 篇代表性论文中的第一作者或通讯作者。</p>			

姓 名	郑海荣	排 名	2
行政职务	无	技术职称	教授
工作单位	陕西师范大学	完成单位	陕西师范大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>主要负责等离激元调控稀土掺杂发光高分辨光谱方面的工作，是创新点 1-5 的主要完成人和贡献者，以及 5 篇代表性论文的通讯作者或共同作者。</p>			

姓 名	陈环	排 名	3
行政职务	无	技术职称	副教授
工作单位	陕西师范大学	完成单位	陕西师范大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>将稀土离子 4f 跃迁发光寿命压缩至纳秒级，发现了表面等离激元调控稀土掺杂上转换发光的作用机理。是创新点 1-4 的主要完成人和贡献者，是代表性论文 1 和 4 的第一作者。</p>			

姓 名	付正坤	排 名	4
行政职务	无	技术职称	副教授
工作单位	陕西师范大学	完成单位	陕西师范大学

对本项目主要学术贡献：

主要负责等离激元调控纳米体系物质结构，以及等离激元与发光纳米结构相互作用机理等方面的研究工作，是创新点 1 和 2 的主要完成人和贡献者，以及代表性论文 1 的共同作者。

姓 名	严蕾	排 名	5
行政职务	无	技术职称	副教授
工作单位	陕西师范大学	完成单位	陕西师范大学

对本项目主要学术贡献：

负责等离激元与分子相互作用机理研究工作。是创新点 1-4 的主要完成人和贡献者，是代表性论文 1 的共同作者。

姓 名	李金萍	排 名	6
行政职务	无	技术职称	副教授
工作单位	陕西师范大学	完成单位	陕西师范大学

对本项目主要学术贡献：

负责项目中纳米体系结构的可控制备、组装和精细表征实验。对创新点 1 做出了贡献，是代表性论文 1 的共同作者。

七、主要完成单位情况表

单位名称	陕西师范大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为本项目的依托单位，陕西师范大学是教育部直属、世界一流学科建设高校，国家“211 工程”和国家教师教育“985 工程优势学科创新平台”重点建设高校，是国家首批“双一流”建设高校。学校为项目的顺利完成并取得优异成绩做出了重要贡献。主要包括：组织并完成项目策划和实施工作；提供优质的人力资源和的工作环境；提供本项目所需的设备、能源、图书资料和数据库等资源。物理学与信息技术学院拥有物理学国家级特色专业、国家一流专业、国家级“跨学科 X-物理”实验教学中心、跨学科“X-物理学”省级人才培养模式创新实验区、省级“物理学实验教学示范中心”、物理学博士后流动站和物理学一级学科博士点等人才培养平台。光学学科是学校的优势和特色发展学科，拥有学术型博士、硕士研究生，以及光学工程专业学位硕士研究生学位授权点，设有陕西师范大学“现代光学研究所”、陕西师范大学-中国科学院西安光学精密机械研究所“先进光子学与光子工程研究中心”、与西安交通大学和武汉大学联合共建的“中国西部光资源与地球环境研究中心”，组建了光信息调控与增强技术实验室，师资力量雄厚，结构优良。学校的以上平台均为本项目的顺利开展提供了充分保障。</p>	

八、完成人合作关系说明

张正龙、郑海荣、陈环、付正坤、严蕾、李金萍合作完成代表性论文 1，张正龙、郑海荣、陈环、付正坤合作完成代表性论文 2，张正龙和郑海荣合作完成代表性论文 3，张正龙、郑海荣、陈环合作完成代表性论文 4，张正龙和郑海荣合作完成代表性论文 5。张正龙、郑海荣、陈环、付正坤、严蕾、李金萍合作完成中国光学十大进展奖励。

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	张正龙(1)、郑海荣(2)、陈环(3)、付正坤(4)、严蕾(5)、李金萍(6)	2017.9-2022.8	Sub-50-fs ultrafast upconversion luminescence of a rare-earth-doped nanoparticle. 2022.16.651-657	代表性论文 1
2	论文合著	张正龙(1)、郑海荣(2)、陈环(3)、付正坤(4)	2016.9-2023.10	Plasmon-Assisted Self-Encrypted All-Optical Memory. 2023.33.2208561	代表性论文 2
3	论文合著	张正龙(1)、郑海荣(2)	2016.9-2018.12	Plasmon-Driven Catalysis on Molecules and Nanomaterials. 2018.52.2506-2515	代表性论文 3
4	论文合著	张正龙(1)、郑海荣(2)、陈环(3)	2016.9-2021.12	Multiplasmons-Pumped Excited-State Absorption and Energy Transfer Upconversion of Rare-Earth-Doped Luminescence beyond the Diffraction Limit. 2021,8,1335-1343.	代表性论文 4
5	论文合著	张正龙(1)、郑海荣(2)	2016.7-2019.3	Multiple surface plasmon resonances enhanced nonlinear optical microscopy. 2019; 8, 487-493	代表性论文 5
6	共同获奖	张正龙(1)、郑海荣(2)、陈环(3)、付正坤(4)、严蕾(5)、李金萍(6)	2017.9-2023.5	2022 中国光学十大进展	获奖证书

(不 限 条 目)					