

# 2026 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

## 一、项目名称

微纳结构平面光学器件光场调控机理研究

## 二、提名者及提名意见

提名者：中共陕西省委军民融合发展委员办公室

提名意见：

该成果针对传统透镜体积与重量大、难以突破衍射极限等缺陷，开展基于微纳结构的平面光学器件光场调控新方法与新技术的基础研究，对高分辨成像、高分辨激光加工、光学系统微型化等有较大促进作用，具有广阔的应用前景和推广价值。主要发现点有：(1)基于纳米波导阵列的超分辨聚焦方法；(2)基于非亚波长结构的超振荡透镜超分辨聚焦方法；(3)基于单层超构表面的宽波段消色差方法。该成果拓展了超分辨成像、宽波段消色差等领域的研究思路，为相关领域关键技术突破奠定了基础。5篇代表作发表在Nat. Commun.、Opto-Electron. Adv.、Appl. Phys. Lett.等国内外重要期刊上，他引122次。相关工作被中国科学院/工程院院士、英国皇家学会院士、新加坡工程院院士等国内外知名学者在Nat. Rev. Phys. (IF: 46.6)、Opto-Electron. Adv. (IF: 22.4)、Light: Sci. & Appl. (IF: 24.0)等学术期刊上正面评价，并受邀在国内外学术会议做邀请报告20余次。项目执行期间，项目成员中，1人获得陕西省青年科技新星，1人入选新世纪优秀人才，3人受邀担任《光学精密工程》编委。该项目完成人政治立场坚定，有良好职业道德。

成果材料属实、齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件。提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。

### 三、项目简介

该项目属于物理科学中现代光学前沿基础领域。

受限于阿贝衍射极限，传统光学透镜的聚焦光斑尺寸和成像分辨率被限定在波长量级，进而成为纳米尺度加工、高分辨显微成像等技术迈向更高精度的关键障碍。探索突破衍射极限的新型光学机制与方法，实现超分辨聚焦与成像，具有重大的科学意义和应用价值。该方向被美国光学学会列为 21 世纪光学领域五大研究计划之首。另一方面，传统透镜存在着体积与重量大、设计自由度低，难以满足现代光学系统微型化、轻量化与高度集成化的发展需求。近年来，利用光与物质的相互作用，基于微纳结构的平面光学器件不仅为解决传统透镜微型化、轻量化、高度集成化以及设计自由度低等难题提供了有效途径，而且使得突破传统透镜分辨率存在的衍射极限成为可能，展现出巨大的应用前景。

该项目在国家自然科学基金面上项目、国家自然科学基金青年科学基金项目(C 类)等国家级项目资助下，针对前期报道中的表面等离子体超透镜工作距离小、焦深浅、难以满足实际应用要求，以及超构透镜消色差带宽小、聚焦效率低等技术瓶颈，开展了新型微纳结构平面光学器件的光场调控理论与方法研究，为发展满足实际应用需求的新型光学器件奠定技术基础。研究内容主要包括三个方面：

(1) 基于纳米波导的平面光学器件准远场超分辨聚焦的物理机制；(2) 基于非亚波长结构的矢量光场调控远场超分辨聚焦优化方法；(3) 微纳结构平面光学器件宽波段消色差的物理机制。

主要科学发现点如下：

**1. 构建耦合纳米波导相位调控模型，揭示纳米波导横电波奇异传输特性，发掘准远场超分辨聚焦的新机制。**阐明了耦合纳米波导相位调控机制，揭示了相邻耦合纳米波导相位影响规律，提出了表面等离子体透镜波前精确调控方法，解决了该类型平面光学器件的焦移难题；建立了金属梯度折射率透镜模型，阐明其聚焦的物理机制，实现了深亚波长聚焦性能( $\lambda/375$ ,  $\lambda$ 为工作波长)，远小于文献报道的 $\lambda/100$ ；发现了横电波在纳米波导中的奇异传输特性，提出了基于横电波的平面透镜，解决了表面等离子体透镜难以制造的难题，开发的横电波平面透镜在准远场区域实现了 $\lambda/4.13$ 的聚焦光斑，突破了衍射极限( $\lambda/2.38$ )的限制，为准远场超分辨聚焦技术提供了新思路。

**2. 非亚波长结构实现远场超分辨聚焦的新手段，构建厘米级远场超分辨聚焦设计模型。**基于矢量光场衍射干涉、傅里叶光学等理论，建立了非亚波长单元结构实现远场超分辨聚焦的光场传输模型，揭示了超振荡透镜色散、焦深、视场与数值孔径的内在影响机制；打破前期报道中依赖亚波长结构单元进行光场调控的规则，颠覆传统超振荡透镜聚焦与视场、焦深、色散之间的相互制约关系，开发基于连续多相位调控的大尺寸平面透镜圆片级集成制造工艺，实现了直径 1/2 英寸且焦距达 6 mm ( $>11200\lambda$ )和焦深达  $15\lambda$ 的远场超衍射极限聚焦( $\lambda/3$ )平面透镜精确制备，焦深较国际主流同等数值孔径的显微镜头产品提高了 7 倍。

**3. 揭示微纳结构平面光学器件宽波段消色差物理机制，提出复合微纳结构**

**光场调控方法，发展超紧凑多波段消色差的新手段。**建立了微纳结构平面光学器件宽波段消色差的物理条件，发现了微纳结构平面光学器件色差产生的物理机理，揭示了微纳结构形状、尺寸等对光波相位、振幅的影响规律，确立了满足宽波段消色差的微纳结构阵列，基于单层微纳结构，实现了全可见光波段的高效率消色差聚焦；提出了基于复合微纳结构的多波段光场调控新方法，阐明了微米级结构与纳米级结构光场调控的解耦机制，发展了面向多波段光波消色差的超紧凑集成技术，开发了中波红外/可见光以及长波红外/近红外双波段消色差的微纳结构平面光学器件，为多光谱光电探测系统的集成化、小型化提供了新方法。

该项目的相关成果分别发表在 Nature Communications、Opto-Electronic Advances、Optics Letters、Optics Express、Applied Physics Letters、Nanoscale、《光学精密工程》、《光学学报》等国内外重要学术期刊，共计论文 60 余篇，授权发明专利 12 项；5 篇代表作被他引 122 次。研究成果多次被中国科学院/工程院院士、英国皇家学会院士、新加坡工程院院士、OSA/SPIE Fellow 等正面评价。项目成员受邀在国内外学术会议做邀请报告 20 余次。相关成果被国际相关领域知名专家在 Nature Reviews Physics (IF: 46.6)、Advanced Materials (27.2)、Opto-Electronic Advances (IF: 22.4)、Light: Science & Applications (IF: 24.0)、Nature Communications (IF: 18.1)等顶级学术期刊上正面引用。英国南安普顿大学皇家学会院士 Nikolay Zheludev 教授认为“形成了相位型平面超分辨透镜的晶圆级设计与制造能力”，新加坡国立大学东盟工程与技术科学院院士仇成伟教授认为“实现了聚焦光场的灵活可控”。OSA Fellow 香港大学方绚莱教授认为“仅用单层十字形与方环形纳米柱，突破了全可见光消色差超透镜设计难题，实现了全可见光波段高效率消色差聚焦”。该项目研究团队已成长为国内微纳结构平面光学器件研究领域的核心力量，有力推动了该学科方向的进步与创新。

该项目执行期内，项目成员，1 人入选新世纪优秀人才，1 人获得陕西省青年科技新星，3 人受邀担任《光学精密工程》编委。该项目提出的微纳结构平面光学器件光场调控技术受到国内同行认可，后续相关研究工作中，项目成员 1 人获得陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目（A 类），1 人获得国家自然科学基金面上项目，2 人分别获得 173 计划重点项目，1 人入选陕西省“三秦英才”特殊支持计划科技创新领军人才，1 人获得获中国产学研合作科技创新人物奖。

相关基于研究成果得到了广泛的技术迁移，在兵器装备、生命健康、智能制造等领域得到应用。其中，针对巡飞弹蜂群作战系统，提出的微纳结构平面光学器件解决了导引头光学系统小型化及其复杂场景下伪装目标的高准确率识别难题；远场超分辨光场调控理论应用于超分辨显微成像系统，实现对神经元突触细胞的大景深立体式三维扫描成像。

## 四、客观评价

**发现点 1:** 本发现点提出的基于纳米波导光场调控的超分辨聚焦方法被中国工程院院士中科院光电技术研究所所长罗先刚教授、OSA/SPIE Fellow 俄罗斯科学院图像处理系统研究所 Victor V. Kotlyar 教授等多次正面评价。部分评价内容如下:

1. 中国工程院院士罗先刚教授(我国光电领域的领军人物之一)在论文[Advanced Functional Materials, 32: 2205547 (2022)]中认为我们提出的纳米波导式平面光学器件“作为一种二维超材料,实现了新颖的功能与应用”。

2. 清华大学孟永钢教授在论文[Nanomaterials, 10: 937 (2020)]中认为我们提出的横电波(TE)微纳结构平面光学器件“可应用于纳米光刻技术,进而实现超越衍射极限的纳米结构图形化功能”。

3. 俄罗斯科学院图像处理系统研究所 Victor V. Kotlyar 教授(OSA/SPIE Fellow)在2020年第22届国际透明光网络会议上指出我们提出的耦合纳米波导金属梯度折射率透镜“实现深亚波长聚焦”。

**发现点 2:** 本发现点被英国南安普顿大学皇家学会院士、国际超分辨光学鼻祖 Nikolay Zheludev 教授等来自12个国家(中国、英国、美国、新加坡、法国等)、超过20家单位的领域顶尖专家正面评价。部分评价内容如下:

1. 超振荡超分辨聚焦研究开拓者、英国南安普顿大学研究员 E. T. F. Rogers 在其超振荡透镜综述性论文[Journal of Physical Photonics, 2: 042004 (2020)]中认为我们提出的超振荡透镜“通过多目标权重叠加单目标优化实现了均匀且焦深、半高宽、焦距可定制的长光针光场设计方法”。

2. 新加坡国立大学东盟工程与技术学院院士、纳米光子学领域的国际领军科学家仇成伟教授在其超振荡综述性论文[Light: Science & Applications, 8:56 (2019)]中认为我们提出的优化方法“相比于其他传统优化方法,基于遗传算法提出了一种无约束多目标优化模型,实现了聚焦光场的灵活可控”。

3. 英国南安普顿大学皇家学会院士、国际超分辨光学鼻祖 Nikolay Zheludev 教授在其综述性论文[Nature Reviews Physics, 4: 16 (2022)]中认为我们提出的超振荡透镜“实现了超越衍射极限的长光针光场并利用光刻技术突破了硅或玻璃基相位型透镜的制造难题”。

**发现点 3:** 本发现点利用十字形、方环形等微纳结构对光场的独特调控特性,提出宽波段消色差方法,开发全可见光波段高效率消色差平面光学器件,并提出基于复合微纳结构的多波段光波消色差的超紧凑方法,相关研究得到国内外同行的关注和正面评价。部分评价内容如下:

1. 香港大学方绚莱教授(2025年 Brillouin 奖章获得者, OSA/SES Fellow)在论文[Applied Physics Letters, 123: 240401 (2023)]中评价我们提出的微纳结构平面光学器件“仅用单层十字形与方环形氮化硅纳米柱,实现了全可见光波段高效率消色差聚焦,突破了全可见光消色差超透镜设计难题”。

2. 韩国浦项科技大学 Junsuk Rho 教授(科睿唯安 Clarivate 高被引学者)在

论文[Nature Communications, 17: 6310 (2026)]中评价我们提出的微纳结构光场调控单元“十字形和方环形超构单元能够激发相位匹配，从而实现消色差响应”。

3. 哈尔滨工业大学(深圳)肖淑敏教授(Optica Fellow)在论文[Opto-Electronic Advances, 7: 230126 (2024)]中评价我们提出的可全见光波段消色差微纳结构平面光学器件“高效率的超构透镜展现出技术进步，令人备受鼓舞”。

4. 英国南安普顿大学 Jize Yan 教授在论文[Nanophotonics, 3: 28 (2026)]中评价我们提出的复合超构透镜“这种双层策略在保持对制造友好的同时，为独立调控相位和色散提供了更大设计自由度，非常适合具有宽松深宽比的窄至中等带宽应用”。

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<br>名称                                                                                                       | 刊名                       | 作者                                                                                           | 年卷页码<br>(xx 年<br>xx 卷 xx<br>页) | 发表<br>时间<br>(年<br>月<br>日) | 通讯作<br>者(含<br>共同) | 第一作<br>者(含<br>共同) | 国内作者                              | 他引<br>总次<br>数 | 检索<br>数据<br>库  | 知识<br>产权<br>是否<br>归国<br>内所<br>有 |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|---------------|----------------|---------------------------------|
| 1  | A waveguide metasurface based quasi-far-field transverse-electric superlens                                      | Opto-Electronic Advances | Yechuan Zhu, Xiaolin Chen, Weizheng Yuan, Zhiqin Chu, Kwok-yin Wong, Dangyuan Lei, Yiting Yu | 2021 年 4 卷 210013 页            | 2021 年 9 月 30 日           | 雷党愿, 虞益挺          | 朱业传, 陈小林          | 朱业传, 陈小林, 苑伟政, 褚智勤, 黄国贤, 雷党愿, 虞益挺 | 23            | Web of Science | 是                               |
| 2  | TE-polarized design for metallic slit lenses: a way to deep-subwavelength focusing over a broad wavelength range | Optics Letters           | Yechuan Zhu, Weizheng Yuan, Wenli Li, Hao Sun, Kunlun Qi, Yiting Yu                          | 2018 年 43 卷 206 页              | 2018 年 1 月 4 日            | 虞益挺               | 朱业传               | 朱业传, 苑伟政, 李文丽, 孙昊, 齐昆仑, 虞益挺       | 11            | Web of Science | 是                               |
| 3  | Super-resolution multicolor fluorescence microscopy enabled                                                      | Nature Communications    | Wenli Li, Pei He, Dangyuan Lei, Yulong Fan, Yangtao Du, Bo Gao, Zhiqin                       | 2023 年 14 卷 5107               | 2023 年 8 月 22 日           | 雷党愿, 虞益挺          | 李文丽               | 李文丽, 赫培, 雷党愿, 范玉龙, 杜洋             | 29            | Web of Science | 是                               |

|     |                                                                                                                              |                         |                                                                                       |                       |                 |     |     |                                 |     |                |   |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------|-----|-----|---------------------------------|-----|----------------|---|
|     | by an apochromatic super-oscillatory lens with extended depth-of-focus                                                       |                         | Chu, Longqiu Li, Kaipeng Liu, Chengxu An, Weizheng Yuan, Yiting Yu                    |                       |                 |     |     | 涛, 高博, 褚智勤, 刘凯鹏, 安铖旭, 苑伟政, 虞益挺  |     |                |   |
| 4   | Controllable design of super-oscillatory planar lenses for sub-diffraction-limit optical needles                             | Optics Express          | Jinshuai Diao, Weizheng Yuan, Yiting Yu, Yechuan Zhu, Yan Wu                          | 2016 年 24 卷 1924 页    | 2016 年 1 月 25 日 | 虞益挺 | 刁金帅 | 刁金帅, 苑伟政, 虞益挺, 朱业传, 吴焱          | 42  | Web of Science | 是 |
| 5   | Broadband polarization-insensitive metalens with excellent achromaticity and high efficiency for the entire visible spectrum | Applied Physics Letters | Yechuan Zhu, Siyuan Liu, Ying Chang, Yingxia Wang, Shun Zhou, Chunfang Wu, Weiguo Liu | 2023 年 122 卷 201702 页 | 2023 年 5 月 16 日 | 朱业传 | 朱业传 | 朱业传, 刘思源, 常莹, 王营霞, 周顺, 吴春芳, 刘卫国 | 17  | Web of Science | 是 |
| 合 计 |                                                                                                                              |                         |                                                                                       |                       |                 |     |     |                                 | 122 |                |   |

## 六、主要完成人情况（不超过 6 人）

（所列完成人应为在陕个人，或与在陕个人合作的我国其他地域的个人（**第一完成人必须为全职在陕的个人**），且是“代表性论文专著”主要学术思想的提出者，并在“代表性论文专著”中有署名。应按表格要求逐项填写。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。同一人同一年度只能作为一个提名项目的**第一完成人**参加陕西省科技奖的评审。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。

**工作单位：**根据人事关系填写完成人现工作的单位，已退休的填写退休前的工作单位。

**完成单位：**填写完成人参与本项目主要研究工作时所在单位，应为国内法人单位。如涉及多个单位，应根据贡献大小填写一个单位。完成单位与奖励证书关联，请根据实际情况审慎填写。

**对本项目贡献：**不超过 300 字。应具体写明完成人对本项目做出的实质性贡献，并注明代表性论文专著编号。  
填报时括号部分内容删除。）

| 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                                                               |
|-----|----|------|------|-----------------|--------|----------------------------------------------------------------------|
| 朱业传 | 1  | 无    | 副教授  | 西安工业大学          | 西安工业大学 | 作为项目负责人，全程参与 3 个发现点的具体研究工作，包括微纳结构光场调控机理分析、微纳结构平面光学器件优化设计及其制备、结果讨论等。  |
| 李文丽 | 2  | 无    | 副教授  | 江南大学            | 西北工业大学 | 主要参与了发现点 1、2 的研究工作。完成了非亚波长结构远场超分辨聚焦微纳结构平面光学器件优化设计，构建了厘米级远场超分辨聚焦设计模型。 |
| 刁金帅 | 3  | 无    | 无    | 宁德时代新能源科技股份有限公司 | 西北工业大学 | 主要参与了发现点 2 的研究工作。完成了基于遗传算法的多目标多约束优化设计模型构建，实现焦深、半高                    |

|     |   |            |    |        |        |                                                                             |
|-----|---|------------|----|--------|--------|-----------------------------------------------------------------------------|
|     |   |            |    |        |        | 宽、焦距可定制的长光针光场优化设计。                                                          |
| 虞益挺 | 4 | 无          | 教授 | 西北工业大学 | 西北工业大学 | 作为团队负责人，系统组织项目论证和实施，主要参与了发现点 1、2 的研究工作。完成了 TM 透镜尺度效应分析、超分辨透镜光场调控机制建立、论文修改等。 |
| 周顺  | 5 | 光电工程学院党委书记 | 教授 | 西安工业大学 | 西安工业大学 | 主要参与了发现点 3 的研究工作。完成了超构单元光场调控性能分析与建立。                                        |

## 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）                                                                                                                                                     |
|--------|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 西安工业大学 | 1  | 西安工业大学是本项目的第一完成单位，发现了纳米波导横电波奇异传输特性，建立了准远场超分辨聚焦的新机制，创建了超振荡透镜的多目标多约束优化设计方法，揭示了微纳结构平面光学器件宽波段消色差物理机制，提出复合微纳结构光场调控方法，发展了超紧凑多波段消色差的新手段。学校为该项目组提供了良好的工作环境，从管理和服务上保证了项目的顺利完成。 |
| 西北工业大学 | 2  | 西北工业大学是本项目的第二完成单位，发现了 TM 透镜尺度效应，建立了超振荡透镜光场调控机制，开发了基于连续多相位调控的大尺寸平面透镜圆片级集成制造工艺，实现了大口径、大焦深的远场超分辨聚焦平面透镜精确制备。学校为该项目组提供了良好的工作环境，从管理和服务上保证了项目的顺利完成。                          |

## 八、完成人合作关系说明

该项目由朱业传、李文丽、刁金帅、虞益挺、周顺合作完成。虞益挺是西北工业大学教授、博士生导师，朱业传、李文丽、刁金帅均为虞益挺教授指导的研究生，毕业后分别就职于西安工业大学、江南大学和宁德时代新材料科技股份有限公司；周顺为朱业传在西安工业大学的团队负责人。各完成人长期合作，持续从事微纳结构平面光学器件光场调控技术基础研究，共同承担相关科研项目。虞益挺、朱业传合作发表代表作[1]；虞益挺、朱业传、李文丽合作发表代表作[2]；虞益挺、李文丽合作发表代表作[3]；虞益挺、刁金帅、朱业传合作发表代表作[4]；朱业传、周顺合作发表代表作[5]。上述代表性论文的发表体现了完成人之间长期、稳定的合作关系，支撑了本项目重要科学发现。