

一、项目名称：亚波长尺度光场对称性调控原理与方法

二、提各单位：中国科学院成都分院

三、提各单位意见

对称性原理是现代物理学的基石，也是解决复杂科学问题的重要手段。自2013年以来，该项目瞄准光学从宏观尺度向亚波长尺度发展的重大变革机遇，聚焦复杂亚波长结构中光场调控的对称性，取得系列国际公认的原创性成果：

（一）发现强耦合多重旋转对称结构中的广义几何相位，打破了经典 Pancharatnam-Berry 几何相位理论认知，实现了高阶角度自旋霍尔效应和高阶旋转多普勒效应。（二）发现基于二次相位的动量对称性变换效应，打破了成像视场对旋转对称结构的依赖和器件厚度的限制，解决了大容量轨道角动量解复用以及角动量的协同探测难题。（三）提出基于非旋转对称相位的高自由度光场调控原理方法，揭示了无序微纳光学体系中偏振独立的长程有序光子态精确调控机制，解决了激光-红外-微波多谱段兼容调控难题。

5篇代表性论文发表于 Phys Rev Lett 等期刊，含 ESI 热点论文 1 篇和高被引论文 2 篇，Web of Science 他引 569 次，被包括 60 余位各国院士、国际学会 Fellow 在内的同行在 Science、Phys Rev Lett 等论文中正面评价。提出的理论和公式被国际同行广泛采用，并推广到声波和机械波领域。研究成果入选中国光学工程学会光学超构材料优秀成果等奖励，被十余部学术专著收录。

提名该项目为 2024 年度四川省自然科学奖一等奖。

四、项目简介

对称性分析是光学、电磁学、声学等波动研究不可或缺的基本工具，被《自然》杂志誉为“穿越自然迷宫的指路明灯”（Nature 2012, 490: 472）。然而，随着光波调控深入亚波长尺度，以及微观结构形态由简单向复杂不断演进，结构单元和阵列的对称性缺失导致亚波长尺度的高维度复杂光场调控面临机理不清晰、调控能力存在原理性限制等挑战。2013 年以来，在 973 计划等国家任务支持下，该项目聚焦亚波长尺度光场调控的对称性，在多重旋转对称结构相位调控机理、光子动量对称性变换、非对称高自由度光场调控等方面取得系列重要科学发现，具体概述如下：

（一）发现强耦合多重旋转对称结构中的广义几何相位。几何相位是经典光学和量子力学中的重要物理量，传统理论认为正多边形等高阶对称结构为各向同性，无法产生光学几何相位。该成果发现当单元结构对称性与晶格对称性不一致时，多重旋转对称的微纳结构具有显著的人工各向异性，可产生远高于传统 2 倍关系的广义几何相位，打破了经典 Pancharatnam-Berry 几何相位理论认知，实现了高阶角度自旋霍尔效应和高阶旋转多普勒效应。被德国阿贝光子学中心知名光

学专家 S Nolte 等评价为“揭示了单元结构旋转角与主轴的复杂关系”、“与传统理解截然不同的开创性工作”。

(二) **发现基于二次相位的动量对称性变换效应。**动量匹配是亚波长电磁学和光场调控的核心，但根据经典费马原理，入射光场横向动量的变化会引入离轴像差，限制了横向动量和角动量的探测能力。该成果发现在直角坐标系和极坐标系中引入具有线性相位梯度的界面二次相位，可将入射光场的动量和角动量转化为出射光场的平移和旋转对称性，从而实现大角度和大拓扑荷的光场探测。该发现被著名光子学专家、英国爱丁堡皇家学会院士 T Krauss 等评价为“首次提出”、“可实现比传统更精密的光场调控”。

(三) **提出基于非旋转对称相位的高自由度光场调控原理方法。**高自由度光场调控是光学和光子学领域的重要前沿科学问题。传统理论认为，由于几何相位的偏振对称性和宽带特性，难以在复杂人工微纳结构体系中实现偏振和波长维度的自由调控。该成果揭示了无序微纳光学体系中偏振独立的长程有序光子态精确调控机制，建立了基于 Green 函数互易性的“场相似性”拓扑优化方法，实现了非旋转对称准无序相位和有序相位的偏振独立调控；提出基于全金属体系相位调控的“虚拟赋形”原理方法，打破基尔霍夫辐射定律的对称性限制，解决了激光-红外-微波多谱段兼容调控难题。该发现被韩国国家工程院院士 H Cho 等评价为可“打破传统应用限制”、“实现理想物理特性”。

项目 5 篇代表性论文发表于 Phys Rev Lett、Light Sci Appl、Adv Mater 等期刊，WOS 他引 569 次，获得包括 60 余位各国院士、国际学会 Fellow 在内的同行引用并正面评价。提出的理论和公式被国际同行广泛采用，并推广到声波和机械波领域，产生了广泛的学术影响。研究成果入选中国光学工程光学超构材料优秀成果等奖励，被十余部学术专著收录。项目完成人中 2 人入选国防卓青，3 人入选国家优青，1 人入选国防青托。

五、代表性论文专著目录

序号	论文(专著)名称/刊名/作者	年卷页码	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	论文署名单位是否包含国外单位
----	----------------	------	-----------	-----------	-----------	------	-------	-------	----------------

1	Generalized Pancharatnam-Berry phase in rotationally symmetric meta-atoms/ Physical Review Letters /Xin Xie, Mingbo Pu, Jinjin Jin, Mingfeng Xu, Yinghui Guo, Xiong Li, Ping Gao, Xiaoliang Ma, Xiangang Luo	2021年126卷183902页	2021年05月07日	Xiangang Luo	Xin Xie, Mingbo Pu	谢鑫, 蒲明博, 靳金金, 徐明峰, 郭迎辉, 李雄, 高平, 马晓亮, 罗先刚	87	Web of Science 数据库	否
2	Extreme-angle silicon infrared optics enabled by streamlined surfaces/ Advanced Materials / Fei Zhang, Mingbo Pu, Xiong Li, Xiaoliang Ma, Yinghui Guo, Ping Gao, Honglin Yu, Min Gu, Xiangang Luo	2021年33卷2008157页	2021年02月10日	Xiangang Luo	Fei Zhang, Mingbo Pu	张飞, 蒲明博, 李雄, 马晓亮, 郭迎辉, 高平, 顾敏, 喻洪麟, 罗先刚	104	Web of Science 数据库	否
3	Spin-decoupled metasurface for simultaneous detection of spin and orbital angular momenta via momentum transformation/ Light: Science & Applications / Yinghui Guo, Shicong Zhang, Mingbo Pu, Qiong He, Jinjin Jin, Mingfeng Xu, Yaxin Zhang, Ping Gao, Xiangang Luo	2021年10卷63页	2021年03月25日	Xiangang Luo	Yinghui Guo	郭迎辉, 张世聪, 蒲明博, 何琼, 靳金金, 徐明峰, 张雅鑫, 高平, 罗先刚	239	Web of Science 数据库	否

4	Emerging long-range order from a freeform disordered metasurface/ Advanced Materials / Mingfeng Xu, Qiong He, Mingbo Pu, Fei Zhang, Ling Li, Di Sang, Yinghui Guo, Renyan Zhang, Xiong Li, Xiaoliang Ma, Xiangang Luo	2022年34卷2108-709页	2022年1月8日	Mingbo Pu, Xiangang Luo	Mingfeng Xu, Qiong He	徐明峰, 何琼, 蒲明博, 张飞, 李玲, 桑迪, 郭迎辉, 张仁彦, 李雄, 马晓亮, 罗先刚	29	Web of Science 数据库	否
5	Plasmonic metasurfaces for simultaneous thermal infrared invisibility and holographic illusion/ Advanced Functional Materials / Xin Xie, Xiong Li, Mingbo Pu, Xiaoliang Ma, Kaipeng Liu, Yinghui Guo, Xiangang Luo	2018年28卷1706-673页	2018年1月31日	Xiangang Luo	Xin Xie, Xiong Li, Mingbo Pu	谢鑫, 李雄, 蒲明博, 马晓亮, 刘凯鹏, 郭迎辉, 罗先刚	110	Web of Science 数据库	否
合 计							569		

六、主要完成人

蒲明博（中国科学院光电技术研究所）、郭迎辉（中国科学院光电技术研究所）、张飞（中国科学院光电技术研究所）、徐明峰（中国科学院光电技术研究所）、李雄（中国科学院光电技术研究所）、高平（中国科学院光电技术研究所）

七、完成单位：中国科学院光电技术研究所