

# 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	磁电复合薄膜中多物理场界面耦合调控机制研究
主要完成人	刘明，董国华，彭斌，赵亚楠，胡忠强，王志广
主要完成单位	西安交通大学

## 二、提名意见（适用于部门、机构提名）

提 名 者	陕西省教育厅	提名等级	<input checked="" type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖及以上
提名意见：  该项目面向国家及陕西省发展新一代电子信息技术重大战略需求，针对自旋电子学及薄膜物理中的国际学术前沿问题，提出了电场驱动应变和电荷等多物理场协同调控磁电复合薄膜表界面自旋的研究思路，构筑了新型磁电复合薄膜材料，揭示了跨尺度、多层次磁电耦合机制，开展了系统性和创新性且具有国际影响力的研究工作。重要发现包括：提出基于应变的电场调控表界面自旋-晶格耦合、自旋-轨道耦合等新思路，实现了电场诱导磁化翻转及显著调控磁各向异性；提出基于电荷积聚调控界面自旋耦合的新思路，阐明了电荷对层间自旋耦合、自旋-轨道耦合的调控机理；构建了自支撑铁电/磁电氧化物单晶薄膜，首次发现其超弹超柔特性，阐明了铁弹畴连续翻转诱导超弹超柔性机制，解决了传统磁电薄膜的结构受限问题，实现了界面强磁电耦合效应。本项目成果为设计开发新型低功耗自旋电子器件提供了理论依据和实验基础，被美国工程院院士、美国物理学会会士等国际知名学者在 Nature、Science 及其子刊等国际顶级期刊上引用并给予高度评价。  本项目成果属实，人员排序无异议，无知识产权纠纷。  提名该项目为陕西省自然科学奖一等奖。			
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。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。			

## 二、提名意见（适用于专家提名）

姓    名			
专家类型	<input type="checkbox"/> 国家最高科学技术奖获得者 <input type="checkbox"/> 中国科学院院士 <input type="checkbox"/> 中国工程院院士 <input type="checkbox"/> 国家科学技术奖获奖项目第一完成人（需注明获奖等次） <input type="checkbox"/> 省最高科学技术奖获奖人（或 xxxx 年省科学技术最高成就奖、xxxx 年基础研究重大贡献奖获奖人） <input type="checkbox"/> Xxxx 年省科学技术奖第一完成人（需注明获奖等次）	提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖及以上
责任专家	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否		
提名意见：			
<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。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。</p>			

### 三、项目简介

该项目属于物理学与材料学的交叉研究领域。

磁电材料中由于电子自旋、电荷、轨道和晶格等多自由度耦合互调，产生对磁、力、电等多物理场具有敏感响应的丰富电子物态，在新型电子信息技术如多态信息存储、智能传感等领域中占据重要地位。因此，针对磁电材料界面的对称性破缺及多物理场耦合调控，例如：自旋-轨道耦合、自旋-晶格耦合、自旋-自旋耦合等，是当前国际基础前沿科学研究的核心内容之一。该项目面向电子信息产业国家战略需求和国际学术前沿共性问题，在国家重点研发计划的资助下，针对磁存储和磁传感等应用需求，提出电场驱动应变和电荷等多物理场协同调控磁电复合薄膜表界面自旋的研究思路，构筑新型磁电复合薄膜材料，探索跨尺度、多层次磁电耦合机制，开展了系统性和创新性且具有国际影响力的研究工作，取得了以下研究成果：

（1）提出了基于应变的电场调控表界面自旋-晶格耦合、自旋-轨道耦合等调控新思路；获得了创纪录的电场调控磁各向异性，为开发低功耗、快响应的信息存储器件提供了实验基础。

（2）提出了电荷积聚调控界面自旋耦合新思路，阐明了电荷对层间自旋耦合、自旋-轨道耦合的调控机理，首次实现了小电压（小于 5 V）翻转垂直磁化、调控铁磁-反铁磁转变等新奇磁电耦合现象，进而提出应变与电荷协同调控界面自旋理论机制，实现了电压调控垂直磁化近 180°翻转，为开发低功耗、低电流密度磁存储提供新思路。

（3）采用插入氧化物牺牲层并水溶剥离的方法，获得了大面积自支撑铁电/磁电薄膜，首次发现其超弹超柔特性，耐 180°折叠可回弹且  $\epsilon_{\max} \sim 10\%$ ，阐明了铁弹畴连续翻转降低畴壁能垒诱导超弹超柔性机制，解决了传统磁电薄膜的结构受限问题，实现了界面强磁电耦合效应，为开发小电压可调的柔性磁电器件奠定基础。

本项目的 5 篇代表性论文均发表在 IF>10 期刊，包括 Science 1 篇，Science Advances 1 篇，Nature Communications 2 篇，Advanced Materials 1 篇。Science 论文的发表引起了国内媒体的高度关注，先后被人民网、科学网、《中国科学报》等媒体报道。

## 四、客观评价

(1) 针对磁性微波器件和磁传感器对低功耗、集成化和强磁电耦合的根本要求, 该项目提出了基于应变的电场调控表界面自旋-晶格、自旋-轨道耦合等思路, 发展了相匹配的材料制备方法, 获得创纪录的电场调控自旋共振及显著磁电互调。英国剑桥大学 Neil. D. Mathur 教授在研究论文(Nat. Mater. 18,840 (2019))中将申请人在磁电微波材料方面的工作作为重要的研究进展进行引用, 并指出: “这种调控可诱导 90 度磁化的非易失性翻转, 沿着 (0-11) 方向有较大应变”。美国宾夕法尼亚州立大学 Donald W. Hamer 讲座教授陈龙庆教授团队在综述文章(Acta Materialia 176, 73e83(2019))中 5 次引用申请人的工作, 并指出: “申请者所开展的磁电耦合材料可在微波器件、磁电存储和传感器领域具有广泛的应用前景”。

(2) 针对磁存储卡脖子技术, 该项目提出了利用小电压驱动电荷积聚显著调控自旋取向和近 180° 翻转磁化的低功耗电压写入新路径, 为实现新型磁存储技术奠定基础。德国美因茨大学 Mathias Kläui 教授在研究论文中(Nat. Mater. 18, 703 (2019))举例引用申请人电荷调控自旋层间耦合的工作, 并强调指出: “对称的自旋层间耦合调控的研究具有重要的理论价值及技术应用前景”。德国卡尔斯鲁厄理工学院 Robert Kruk 教授在最新综述文章(Adv. Mater. 31, 1806662(2019))中 6 次引用了申请人的工作, 大篇幅正面介绍申请人在电荷调控界面磁性方面的研究进展, 并将  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{DEME-TFSI}$  和  $\text{FeCoB/PZN-PT}$  作为典型磁电耦合案例收录在文章的图表中。

(3) 该项目提出柔性磁电/铁电氧化物薄膜及其微纳结构的构筑方法, 揭示了具有普适性的超弹超柔增强机制, 为柔性磁电材料的应用奠定了坚实的理论和实验基础。加州大学伯克利分校 Ramamoorthy Ramesh 教授在 Nature Communications, 13, 1100 (2022)、Advanced Materials, 32, 4, 2003780 (2020)、Advanced Materials, 34, 30, 2108841 (2022)等三篇论文中给予该研究工作高度评价, 认为“这种技术正迅速成为调控铁电体晶格畸变和应变的一种方法”。斯坦福大学 Harold Y. Hwang 教授在 Nature Communications, 11, 3141 (2020)、Nano Letters, 21, 6, 2470-2475 (2021)两篇论文中引用该研究工作, 认为“这些自支撑薄膜具有毫米级横向尺寸和纳米级厚度, 可容纳比块状薄膜大得多的应变”。剑桥大学 Guillaume F. Nataf 教授在其综述文章 Nature Reviews physics, 2, 634-648 (2020)中以附图形式详细介绍完成人揭示铁电材料超弹、超柔特性的研究工作。

**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	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	Super-elastic ferroelectric single-crystal membrane with continuous electric dipole rotation	Science	Guohua Dong; Suzhi Li; Mouteng Yao; Ziyao Zhou; Yong-Qiang Zhang; Xu Han; Zhenlin Luo; Junxiang Yao; Bin Peng; Zhongqiang Hu; Houbing Huang; Tingting Jia; Jiangyu Li; Wei Ren; Zuo-Guang Ye; Xiangdong Ding; Jun Sun; Ce-Wen Nan; Long-Qing Chen; Ju Li; Ming Liu.	2019 年 366 卷 6464 期 475-479 页	2019 年 10 月 25 日	Ziyao Zhou, Xiangdong Ding, Ming Liu	Guohua Dong; Suzhi Li; Mouteng Yao	董国华; 李苏植; 姚谋腾; 周子尧; 张永强; 徐晗; 罗震林; 姚竣翔; 彭斌; 胡忠强; 黄厚兵; 李江宇; 任巍; 丁向东; 孙军; 南策文; 刘明。	218	We b of Science 核心合集	是
2	Phase transition	Science	Bin Peng;	2020	202	Ziy	Bin	彭	56	We	是

	enhanced superior elasticity in freestanding single-crystalline multiferroic BiFeO <sub>3</sub> membranes	Advances	Ren-Ci Peng; Yong-Qiang Zhang; Guohua Dong; Ziyao Zhou; Yuqing Zhou; Tao Li; Zhijie Liu; Zhenlin Luo; Shaohao Wang; Yan Xia; Ruibin Qiu; Xiaoxing Cheng; Fei Xue; Zhongqiang Hu; Wei Ren; Zuo-Guang Ye; Long-Qing Chen; Zhiwei Shan; Tai Min; Ming Liu.	年 6 卷 34 期 eaba58 47 页	0 年 8 月 21 日	ao Zhou; Tao Li; Min g Liu	Pen g; Ren -Ci Pen g; Yong-Q iang Zhang; Guohua Dong	斌; 彭仁 赐; 张永 强; 董国 华; 周子 尧; 周雨 晴; 李桃 ; 刘志 杰; 罗震 林; 王少 昊; 夏言 ; 邱瑞 玢; 胡忠 强; 任巍 ; 单智 伟; 闵泰 ; 刘明。		b of Scie nce 核 心 合 集	
3	Ionic liquid gating control of RKKY interaction in FeCoB/Ru/FeCoB and (Pt/Co) <sub>2</sub> /Ru/(Co/Pt) <sub>2</sub> multilayers	Nature Communications	Qu Yang; Lei Wang; Ziyao Zhou; Liqian Wang; Yijun Zhang; Shishun Zhao; Guohua Dong; Yuxin Cheng; Tai Min; Zhongqiang Hu; Wei Chen; Ke Xia; Ming Liu.	2018 年 9 卷 991 页	2018 年 8 月 3 日	Ziyao Zhou; Ke Xia; Min g Liu	Qu Yang; Lei Wang	杨曲; 王 蕾; 周子 尧; 王立 乾; 张易 军; 赵士	66	We b of Scie nce 核 心 合 集	是

								舜;董国华;程宇心;闵泰;胡忠强;夏钊;刘明。			
4	Giant tunable spin Hall angle in sputtered Bi <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> controlled by an electric field	Nature Communications	Qi Lu; Ping Li; Zhixin Guo; Guohua Dong; Bin Peng; Xi Zha; Tai Min; Ziyao Zhou; Ming Liu.	2022 年 13 卷 1650 页	2022 年 3 月 28 日	Zhixin Guo; Guohua Dong; Ming Liu	Qi Lu; Ping Li	鲁琦; 李平; 郭志新; 董国华; 彭斌; 查茜; 闵泰; 周子尧; 刘明。	30	We b of Science 核心合集	是
5	Self-Assembled Epitaxial Ferroelectric Oxide Nanospring with Super-Scalability	Advanced Materials	Guohua Dong; Yue Hu; Changqing Guo; Haijun Wu; Haixia Liu; Ruobo Peng; Dan Xian; Qi Mao; Yongqi Dong; Yanan Zhao; Bin Peng; Zhiguang Wang; Zhongqiang Hu; Junwei Zhang; Xueyun Wang; Jiawang Hong; Zhenlin Luo; Wei Ren; Zuo-Guang Ye; Zhuangde Jiang; Ziyao Zhou; Houbing Huang; Yong	2022 年 34 卷 13 期 210841 9 页	2022 年 1 月 28 日	Ziyao Zhou; Houbing Huang; Yong Peng; Ming Liu	Guohua Dong; Yue Hu; Changqing Guo	董国华; 胡玥; 郭常青; 武海军; 刘海霞; 彭若波; 仙丹; 毛琦; 董	7	We b of Science 核心合集	是



			Peng; Ming Liu.					永齐; 赵亚楠; 彭斌; 王志广; 胡忠强; 张军伟; 王学云; 洪家旺; 罗震林; 任巍; 叶作光; 周子尧; 黄厚兵; 彭勇; 刘明。			
6	Integrated Multiferroic Heterostructures and Applications	Wiley-VCH	Ming Liu; Ziyao Zhou.	2019 年	2019 年 4 月 5 日	Ming Liu, Ziyao Zhou	Ming Liu	刘明; 周子尧。	10	We b of Scie nce 核心合集	是
7											
8											
合 计											
补充说明（视情填写）：											

## 六、主要完成人情况表

姓 名	刘明	排 名	1
行政职务	西安交通大学研究生院副院长		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：			
1. 为 6 篇代表作中第 1、2、3、4、5 篇论文的(共同)通讯作者，第 6 部专著的第一作者，为本项目第一完成人，主要负责该项目的申请、项目总体实施以及对论文成果的总结工作。首次发现并证实了氧化物单晶薄膜“既弹又柔”的力学性质，揭示了自支撑铁电/铁磁单晶薄膜中铁电畴壁极化连续翻转、相变引发的超弹性机制，并预期这种超弹性和超柔性在钙钛矿铁电材料中普遍存在；揭示了柔性自支撑磁电耦合效应的研究机制；			
2. 佐证材料：代表性论文专著 1、2、3、4、5、6。			

姓 名	董国华	排 名	2
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 1. 为 6 篇代表作中第 1、2、5 的(共同)第一作者，代表作 4 的共同通讯作者和代表作 3 的共同作者，负责了该项目的具体实施、数据分析及总结，解决了铁电/磁电单晶薄膜的脆性问题，首次发现了自支撑铁电单晶薄膜的超弹-超柔特性，可实现~10%应变与 180° 折叠；实现了铁电材料的褶皱结构，揭示了铁电薄膜的电极化与应变梯度之间的关系，对主要科技创新点有直接贡献。 2. 佐证材料：代表性论文专著 1、2、3、4、5。			

姓 名	彭斌	排 名	3
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：			
1. 为 6 篇代表作中第 2 篇论文的共同第一作者和第 1、4、5 篇论文的共同作者，参与了该项目的课题申请、实施及总结，对主要科技创新点有直接贡献。制备了自支撑的 BiFeO3 单晶薄膜，发现了该薄膜具有超弹、超柔性，耐受 180° 弯折且最大弯曲应变 >5% 而不破裂，并提出了相变增强薄膜柔性的新机制，对主要科技创新点有直接贡献。			
2. 佐证材料：代表性论文专著 1、2、4、5。			

姓 名	赵亚楠	排 名	4
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：			
1. 作为 6 篇代表性论文专著中第 5 篇论文的共同作者，参与了该项目的实施及总结，参与了柔性自支撑磁电氧化物弹簧的构筑与柔性磁电调控机理研究，对主要科技创新点有直接贡献。			
2. 佐证材料：代表性论文专著 5；			

姓 名	胡忠强	排 名	5
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 1. 为 6 篇代表作中第 1、2、3、5 篇论文的共同作者，参与了该项目的申请、实施和总结，参与了柔性自支撑铁电/磁电氧化物的构建及其柔性磁电耦合机理研究，对主要科技创新点有直接贡献。 2. 佐证材料：代表性论文专著 1、2、3、5。			

姓 名	王志广	排 名	6
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 1. 作为 6 篇代表性论文专著中第 5 篇论文的共同作者，参与了该项目的申请、实施及总结，参与了自支撑磁电氧化物的柔性磁电调控机理研究，对主要科技创新点有直接贡献。 2. 佐证材料：代表性论文专著 5；			

## 七、主要完成单位情况表

单位名称	西安交通大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>学校为本项目的顺利实施提供了良好的硬件基础、良好的学术交流平台以及稳定的后勤保障。学校建立完善的大型仪器共享平台合作机制并建设有分析测试中心为本项目的测试提供支持；利用学科建设经费，对该项目的平台建设提供了资金支持；提供了实验场地，在人才引进、组建学术团队等方面提供了保障；本项目的实施过程通过与相关学科老师在学校建立的学术交流平台上所进行的有效沟通，探讨项目核心激发创新思维；学校后勤为本项目的实施提供稳定的能源以及其他方面的保障。</p>	

单位名称	
<p>对本项目主要学术贡献：</p>	

### 完成人合作关系说明

完成人刘明、董国华、彭斌、赵亚楠、胡忠强及王志广为西安交通大学教师，均为研究团队核心成员，已进行长期合作。刘明为本项目第一完成人，主要负责该项目的申请、项目总体实施以及对论文成果的总结工作，是本项目 5 篇代表性论文的（共同）通讯作者。董国华负责参与了该项目的具体实施、数据分析及总结，构建了系列柔性自支撑铁电/磁电氧化物单晶薄膜与微纳结构并揭示磁电耦合强化微观机理，对主要科技创新点有直接贡献。彭斌主要参与了该项目的实施及总结，构建了超弹超柔的磁电单晶薄膜，实现了应变对自旋轨道耦合显著调控，对主要科技创新点有直接贡献。赵亚楠是本项目的研究骨干，参与了该项目的实施与总结，构建了柔性自支撑磁性氧化物单晶薄膜并实现应变对铁磁共振场的显著调控，对主要科技创新点有直接贡献。胡忠强是本项目的研究骨干，参与了柔性磁电薄膜的可控制备研究，实现了电荷对自旋交换耦合显著调控。王志广是本项目的研究骨干，参与了柔性磁电微纳结构的构筑研究，实现了大应变对磁性能显著调控。

特此说明。

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	刘明/1, 董国华/2, 彭斌/3, 胡忠强/5	2019.10	Super-elastic ferroelectric single-crystal membrane with continuous electric dipole rotation	附件 1
2	论文合著	刘明/1, 董国华/2, 彭斌/3, 胡忠强/5	2020.8	Phase transition enhanced superior elasticity in freestanding single-crystalline multiferroic BiFeO <sub>3</sub> membranes	附件 2
3	论文合著	刘明/1, 董国华/2, 胡忠强/5	2018.3	Ionic liquid gating control of RKKY interaction in FeCoB/Ru/FeCoB and (Pt/Co) <sub>2</sub> /Ru/(Co/Pt) <sub>2</sub> multilayers	附件 3
4	论文合著	刘明/1, 董国华/2, 彭斌/3	2022.3	Giant tunable spin Hall angle in sputtered Bi <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> controlled by an electric field	附件 4
5	论文合著	刘明/1, 董国华/2, 彭斌/3, 赵亚楠/4, 胡忠强/5, 王志广/6	2022.4	Self-Assembled Epitaxial Ferroelectric Oxide Nanospring with Super-Scalability	附件 5