

# 2023 年度山西省科学技术奖提名公示

**项目名称：**二维磁性拓扑材料的设计及微观机理研究

**提名者：**山西师范大学

## 1. 提名意见：

该项目组处于二维磁性拓扑材料研究领域的国际最前沿，特别是围绕提高磁性拓扑绝缘体的量子反常霍尔效应观测温度、构筑新型二维磁性材料、揭示二维半导体能隙与激子结合能的线性标度关系等方面开展了深入研究，取得了一系列原创性研究成果，为实现低能耗自旋电子器件及量子计算等奠定了物理基础。5 篇代表作被国际国内同行在 Nature、Nat. Phys.、Adv. Mater.、J. Am. Chem. Soc.、Phys. Rev. Lett. 等国际顶级期刊大量引用和正面评价。主要科学发现如下：（1）首次提出电荷补偿型 n-p 共掺拓扑绝缘体的方案，以此来实现高温量子反常霍尔效应，基于共掺的方案实质推动了实验进展。（2）利用模板-离子交换法，实现了三维  $\text{Cr}_2\text{Te}_3$  到二维磁性半导体  $\text{CrGeTe}_3$  的结构转变；创新地提出二维磁性材料拓扑化的设计思路，预测了具有更高温度的量子反常霍尔效应新体系。（3）发现了二维半导体材料的能隙与激子结合能之间存在普适的线性标度关系，这对实验中利用二维材料的能隙确定体系激子结合能具有普适指导意义。

综上，推荐该项目申报山西省自然科学奖一等奖。

## 2. 项目简介：

本项目属于二维磁性材料与拓扑量子材料的交叉领域，是近年来该领域的国际前沿热点。本项目主要围绕提高磁性拓扑绝缘体的量子反常霍尔效应观测温度、构筑新型二维磁性材料并实现拓扑化、揭示二维半导体能隙与激子结合能之间的关系等方面开展了深入研究，取得了一系列原创性研究成果，为实现低功耗自旋电子器件及量子计算等奠定了物理基础。主要科学发现如下：

- 1、提出电荷补偿型 n-p 共掺方案，在拓扑绝缘体  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  中共掺 V 和 I 元素，不仅能有效保护体系的拓扑能隙，还可提高铁磁转变温度，进而大幅提升量子反常霍尔效应的观测温度。基于本项目的理论预言，清华大学薛其坤院士团队通过 Cr-V 共掺拓扑绝缘体在实验上大幅提高了量子反常霍尔效应的观测温度。
- 2、提出采用模板-离子交换法制备二维材料的新策略，以非范德华  $\text{Cr}_2\text{Te}_3$  为模板，通过阳离子交换使其出现层间解离，成功制备出二维范德华  $\text{CrGeTe}_3$  磁性半导体；创新地提出  $\text{CrGeTe}_3$  等二维磁性材料“拓扑化”的设计思路，实现了高温量子反常霍尔效应。

3、首次发现 MoS<sub>2</sub> 等二维半导体的能隙与激子结合能之间存在显著线性标度关系。这一发现对利用二维材料的能隙确定体系激子结合能具有普适的理论指导意义，在激子结合能难以确定这一科学难题上取得了突破，该成果受到国内外学者的大量关注。

上述科学发现对提升磁性拓扑材料的量子反常霍尔效应观测温度和构筑新型二维磁性材料具有重要推动作用，对破解如何高效确定二维半导体激子结合能这一学界难题取得新突破。项目组在国家重点研发计划等项目的资助下取得一系列创新性成果，在 *Nat. Mater.*、*Phys. Rev. Lett.*、*Adv. Mater.*、*J. Am. Chem. Soc.*、*Phys. Rev. B* 等国际重要学术期刊发表 SCI 论文 200 余篇，其中 5 篇代表性论文 SCI 他引 309 次，单篇 SCI 最高他引 168 次。项目负责人许小红获得国家杰出青年科学基金资助，入选百千万人才工程国家级人选；张振宇入选首批国家海外高层次人才引进计划特聘专家，曾任 *Phys. Rev. Lett.* 副主编。

### 3. 客观评价：

本项目取得了多项具有国际影响力的研究成果，被国际国内同行在 *Nature*、*Nat. Phys.*、*Adv. Mater.*、*J. Am. Chem. Soc.*、*Phys. Rev. Lett.* 等国际顶级期刊大量引用和正面评价。

代表性论文 1 评价：1) 清华大学薛其坤院士团队在 [*Adv. Mater.* 30, 1703062 (2018)] 中，基于本工作的共掺方案，大幅提高了量子反常霍尔效应的观测温度；2) 罗格斯大学吴伟达教授（美国职业成就奖获得者）在 [*Nat. Phys.* 74, 791 (2018)] 中高度评价本工作：“共掺可极大提高量子反常霍尔效应观测温度”。

代表性论文 2 评价：1) 华盛顿大学讲席教授 Gamelin（美国青年科学家总统奖获得者）在 [*Nano Lett.* 20, 2100 (2020)] 中指出，“only few”可通过阳离子交换方法制备出二维本征磁性材料；2) 北京大学侯仰龙教授（国家杰青、长江学者）在 [*Chem. Rev.* 122, 5411 (2022)] 综述中图引本工作，强调本工作为非范德华材料模板合成二维范德华磁性材料“providing a valuable approach”；3) 韩国浦项科技大学 Jeong 教授在 [*Adv. Mater.* 33, 2103609 (2021)] 中肯定本工作：“阳离子交换法可成功制备出三元二维磁性材料”。

代表性论文 3 评价：清华大学宋成教授（国家杰青）在 [*Phys. Rev. B* 102, 085111 (2020)] 中肯定本工作，“将 Cr<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> 与拓扑绝缘体锗烯构建形成异质结可实现量子反常霍尔效应”。

代表性论文 4 评价：芬兰阿尔托大学的 Liljeroth 教授（欧洲杰出青年科学家奖获得者）在 [*Nature* 588, 424 (2020)] 中两次引用本工作，指出其实验结果与本工作的理论预测非常吻合。

代表性论文 5 评价：1) 清华大学段文晖院士团队在[Phys. Rev. Lett. 118, 266401 (2017)]中肯定了本工作发现的二维材料能隙与激子结合能线性标度关系的重要性，并在其后续研究中将其拓展至 27 种二维材料；2) 中国科学技术大学杨金龙院士在[Nano Lett. 18, 6312 (2018)]中评价，“二维材料的能隙与激子结合能的线性标度关系已被实验观测到，这与我们的理论预测相一致”。

#### 4. 代表性论文专著目录：

1. Shifei Qi<sup>#</sup>, Zhenhua Qiao<sup>#</sup>, Xinzhou Deng, Ekin D. Cubuk, Hua Chen, Wenguang Zhu, Efthimios Kaxiras, S. B. Zhang, Xiaohong Xu\*, and Zhenyu Zhang\*, High-temperature quantum anomalous Hall effect in n-p codoped topological insulators, Phys. Rev. Lett. 117, 056804 (2016).
2. Huan Yang, Fang Wang\*, Huisheng Zhang, Lihong Guo, Liyan Hu, Lanfang Wang, Dingjiang Xue\*, and Xiaohong Xu\*, Solution synthesis of layered van der Waals (vdW) ferromagnetic CrGeTe<sub>3</sub> nanosheets from a non-vdW Cr<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> template, J. Am. Chem. Soc. 142, 4438-4444 (2020).
3. Huisheng Zhang, Wei Qin, Mingxing Chen, Ping Cui, Zhenyu Zhang\*, and Xiaohong Xu\*, Converting a two-dimensional ferromagnetic insulator into a high-temperature quantum anomalous Hall system by means of an appropriate surface modification, Phys. Rev. B 99, 165410 (2019).
4. Huisheng Zhang\*, Wenjia Yang, Yaohui Ning, and Xiaohong Xu\*, Abundant valley-polarized states in two-dimensional ferromagnetic van der Waals heterostructures, Phys. Rev. B 101, 205404 (2020).
5. Jin-Ho Choi<sup>#</sup>, Ping Cui<sup>#</sup>, Haiping Lan, and Zhenyu Zhang\*, Linear scaling of the exciton binding energy versus the band gap of two-dimensional materials, Phys. Rev. Lett. 115, 066403 (2015).

#### 5. 主要完成人情况表：

姓名	排名	技术职务	完成单位	项目中贡献
许小红	1	教授	山西师范大学	项目整体设计；对发现点一和二做出突出贡献，代表性论文一、二、三、四的通讯作者。
张振宇	2	教授	中国科学技术大学	对发现点一、三做出突出贡献，代表性论文一、三、五的通讯作者。
王芳	3	教授	山西师范大学	对发现点二做出突出贡献，代表性论文二的共同通讯作者。
张会生	4	副教授	山西师范大学	对发现点二做出突出贡献，代表性论文三和四的第一作者。



6. 知情同意证明:

### 知情同意报奖证明

山西省科技厅:

本人同意许小红教授以如下论文为代表作申报山西省自然科学奖, 且本人不作为项目主要完成人。

Shifei Qi<sup>#</sup>, Zhenhua Qiao<sup>#</sup>, Xinzhou Deng, Ekin D. Cubuk, Hua Chen, Wenguang Zhu, Efthimios Kaxiras, S. B. Zhang, Xiaohong Xu\*, and Zhenyu Zhang\*, High-temperature quantum anomalous Hall effect in n-p codoped topological insulators, *Phys. Rev. Lett.* 117, 2016, 056804.

齐世飞 (Shifei Qi)



2023.10.9

### 知情同意报奖证明

山西省科技厅:

本人同意张振宇教授以如下论文为代表作申报山西省自然科学奖, 且本人不作为项目主要完成人。

Jin-Ho Choi<sup>#</sup>, Ping Cui<sup>#</sup>, Haiping Lan, and Zhenyu Zhang\*, Linear scaling of the exciton binding energy versus the band gap of two-dimensional materials, *Phys. Rev. Lett.* 115, 2015, 066403.

崔萍 (Ping Cui)



2023.10.7

## 知情同意报奖证明

山西省科技厅：

本人同意许小红教授以如下论文为代表作申报山西省自然科学奖，且本人不作为项目主要完成人。

Shifei Qi<sup>#</sup>, Zhenhua Qiao<sup>#</sup>, Xinzhou Deng, Ekin D. Cubuk, Hua Chen, Wenguang Zhu, Efthimios Kaxiras, S. B. Zhang, Xiaohong Xu\*, and Zhenyu Zhang\*, High-temperature quantum anomalous Hall effect in n-p codoped topological insulators, *Phys. Rev. Lett.* 117, 2016, 056804.

乔振华 (Zhenhua Qiao)



## 知情同意报奖证明

山西省科技厅：

本人同意许小红教授以如下论文为代表作申报山西省自然科学奖，且本人不作为项目主要完成人。

Huan Yang, Fang Wang\*, Huisheng Zhang, Lihong Guo, Liyan Hu, Lanfang Wang, Dingjiang Xue\*, Xiaohong Xu\*, Solution Synthesis of Layered van der Waals (vdW) Ferromagnetic CrGeTe<sub>3</sub> Nanosheets from a Non-vdW Cr<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Template, *J. Am. Chem. Soc.*, 142, 2020, 4438-4444.

杨欢 (Huan Yang)



2023.10.1

## 知情同意报奖证明

山西省科技厅：

本人同意许小红教授以如下论文为代表作申报山西省自然科学奖，且本人不作为项目主要完成人。

Huan Yang, Fang Wang\*, Huisheng Zhang, Lihong Guo, Liyan Hu, Lanfang Wang, Dingjiang Xue\*, Xiaohong Xu\*, Solution Synthesis of Layered van der Waals (vdW) Ferromagnetic CrGeTe<sub>3</sub> Nanosheets from a Non-vdW Cr<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Template, *J. Am. Chem. Soc.*, 142, 2020, 4438-4444.



薛丁江 (Dingjiang Xue)

2023年10月8日

## 知情同意报奖证明

山西省科技厅：

本人同意张振宇教授以如下论文为代表作申报山西省自然科学奖，且本人不作为项目主要完成人。

Jin-Ho Choi<sup>#</sup>, Ping Cui<sup>#</sup>, Haiping Lan, and Zhenyu Zhang\*, Linear scaling of the exciton binding energy versus the band gap of two-dimensional materials, *Phys. Rev. Lett.* 115, 2015, 066403.

Jin-Ho Choi

Jinho Choi

2023.10.08