

2020 年度湖南省科学技术奖推荐公示内容

自然科学奖

项目名称:

高迁移率范德瓦尔斯材料及其异质结构的构筑与应用基础研究

提名意见:

范德瓦尔斯材料是一类独特的功能材料,在近十余年受到人们的广泛关注。高的载流子迁移率意味着更快的载流子传输速度和更高的电学活性,因此高载流子迁移率范德瓦尔斯材料在光电子以及能量转换和存储应用中显得尤为重要。对高迁移率范德瓦尔斯材料的设计制备、性能表征和应用开发是当今凝聚态物理学和材料科学中重要的研究领域之一。

该项目以具有高迁移率的黑磷、金属硫族化合物、石墨烯等几种范德瓦尔斯材料及其异质结构的构筑和应用基础方面进行了系统和深入的研究,发展和完善了液相剥离手段制备少层范德瓦尔斯材料的方法,揭示了层数和温度等因素对范德瓦尔斯材料的结构与性能的影响规律,阐明了范德瓦尔斯异质结构的界面耦合效应和电场调控机制,设计了可应用于高效锂离子电池电极材料的范德瓦尔斯异质结构;开发了范德瓦尔斯材料及其异质结构在催化和光探测等领域的应用潜力。

研究成果在 Advanced Energy Materials、Advanced Functional Materials 等刊物上发表的 8 篇代表性论文先后被 Nature Catalysts、Nature Communications 等 SCI 刊物引用 485 次,其中他引 345 次;5 篇代表作中 2 篇论文为 ESI 高被引用论文,3 篇论文引用次数超过 100 次;关于黑磷在电催化应用方面的工作被国际媒体 Chemistry Views 和 Science Trends 进行了专题报道;关于黑磷在光探测器应用方面的工作被选为 Adv. Funct. Mater. 期刊该期的封面。

提名该项目为湖南省自然科学奖 二 等奖。

项目简介：

范德瓦尔斯材料是一类独特的功能材料，其层内由共价键结合，而层间则是弱的范德瓦尔斯相互作用。这种独特的结构特征，使得单层和少层范德瓦尔斯材料极易通过解离等手段获得；同时，其大的横向尺寸及原子级平整的无悬挂键使其成为一个优良的支撑载体，可与其他物质组合成多种类型和维度的异质结构，而不受到传统半导体晶格匹配的限制。高的载流子迁移率意味着更快的载流子传输速度和更高的电学活性，因此高迁移率材料在光电子以及能量转换和存储应用中显得尤为重要。对具有高载流子迁移率的范德瓦尔斯材料的设计制备、性能表征和应用开发是当今凝聚态物理学和材料科学中重要的研究领域之一，对其深入研究将导致功能材料与功能器件产业发生革命性的变化。2009 以来，本项目在几类高迁移率范德瓦尔斯材料及其异质结构的构筑和应用基础方面进行了系统和深入的研究。项目主要研究内容和成果包括以下三个方面：

一、少层范德瓦尔斯材料的结构特征和应用基础研究：发展和完善了液相剥离手段制备少层范德瓦尔斯材料的方法；提出并证实通过减小黑磷的厚度来增加活性位点数目，提高少层黑磷的催化析氧性能。开发并构建了一种基于光电化学电池的新型光探测器构型，该种光探测器具有优良的光响应能力和良好的稳定性，且能够最大程度地兼容各种类型的光电极材料；阐明了依赖温度的少层范德瓦尔斯材料的拉曼振动规律。

二、范德瓦尔斯异质结构的物理性质及其调控研究：发现了可应用于高效锂离子电池电极材料的范德瓦尔斯异质结构，阐述了碱金属原子在异质结层内和层间的扩散迁移规律和电荷转移机制。揭示并阐明了范德瓦尔斯材料异质结构界面效应及其电子性质的调控规律，提出通过施加外电场实现异质结构电子性质的调控。

三、范德瓦尔斯异质结构及其应用基础研究：发展了制备范德瓦尔斯异质结构的两步合成方法，并将范德瓦尔斯异质结构应用于构建光探测原型器件；发现与比单一范德瓦尔斯材料相比，异质结构的光响应性能得到明显提升。成功制备出 $\text{MoS}_2/\text{P25}/\text{石墨烯}$ 三元光催化剂，该复合结构中的石墨烯和少层二硫化钼两种范德瓦尔斯材料，分别最为支撑骨架和电荷传导物质以及助催化剂，协同增强了传统催化剂二氧化钛的光催化性能。

本项目在 *Adv. Energy Mater.*、*Adv. Funct. Mater.* 等刊物上发表的 8 篇代表性论文先后被 *Nat. Catal.*、*Nat. Commun.* (2)、*Adv. Mater.* (10)、*Chem. Rev.* (2)、*Chem. Soc. Rev.* (2)、*Prog. Mater. Sci.* (2) 等 SCI 刊物引用 485 次，其中他引 345 次；5 篇代表作中 2 篇论文为 ESI 高被引用论文，3 篇论文引用次数超过 100 次；关于黑磷在电催化应用方面的工作被国际媒体 *Chemistry Views* 和 *Science Trends* 进行了专题报道；关于黑磷在光探测器应用方面的工作被选为 *Adv. Funct. Mater.* 刊物的封面。项目组共获国家自然科学基金 4 项，省部级主要项目 4 项，指导研究生获湖南省优秀博士论文 1 篇、硕士论文 3 篇。

客观评价：

本项目在 *Adv. Energy Mater.*、*Adv. Funct. Mater.* 等刊物上发表的 8 篇代表性论文先后被 SCI 刊物引用 485 次，其中他引 345 次，其中 2 篇论文为 ESI 高被引用论文，单篇引用最高 128 次。我们的工作被包括 *Nat. Catal.*、*Nat. Commun.*、*Adv. Mater.*、*Energy Environ. Sci.*、*Prog. Mater. Sci.*、*Chem. Rev.*、*Chem. Soc. Rev.* 等国际 TOP 期刊以及 *Chemistry Views* 和 *Science Trends* 等国际媒体进行正面引用和评述。现列举部分例子如下：

1. 对科学发现一的评价：

代表作 1 发表不久即被国际媒体 *Chemistry Views* 和 *Science Trends* 分别以题为 “Black Phosphorus Nanosheets Catalysis”、“Exploring Highly Efficient Oxygen Evolution Electrocatalysts” 进行了专题报道，被 *Nature Catalysis* 等 SCI 刊物引用 131 次，是 ESI 高被引用论文。代表作 2 被 *Adv. Funct. Mater.* 期刊编辑邀请在 *Materials View China* 官网和作为期刊内封底封面进行报道，被 *Chem. Soc. Rev.* 等 SCI 刊物引用 128 次，是 ESI 高被引用论文。

新加坡南洋理工大学和捷克布拉格化学与工业大学杰出教授 Martin Pumera 在其发表在《自然·催化》期刊的论文 [*Nat. Catal.*, 1(12), 909–921 (2018)，代表性引文 1] 中将代表作 1 在表格和正文中作为典型工作与其他电催化剂的催化性能进行对比讨论和重点评述；吉林大学冯守华院士在论文 [*Adv. Sci.*, 5(8), 1800575 (2018)] 中对该工作进行了即时地报道和肯定。德国莱布尼兹固体和材料研究所 Rummeli 教授和北京大学刘忠范院士在综述性论文 [*Adv. Energy Mater.*, 8(8), 1702093 (2018)] 中对代表作 1 进行了大篇幅的文字描述和图片引用，多次使用“更好的”、“的确”、“非凡的”等词汇对工作给予了充分肯定；南京工业大学陈苏教授等引用我们的工作来说明黑磷在电催化领域的应用进展 [*Nat. Commun.*, 9, 4573 (2018)，代表性引文 2]；澳大利亚阿德莱德大学纳米技术首席教授乔世璋教授在其综述 [*Chem. Rev.*, 118, 6337–6408 (2018)，代表性引文 3] 中将代表作 1 作为黑磷电催化剂的三个典型工作之一进行引用，并对我们的思路和研究结果进行了详细的评述。

德国莱布尼兹固体和材料研究所 Rummeli 教授和北京大学刘忠范院士也对代表作 2 中的实验方案给予了正面肯定，并对研究结果进行了重点描述 [*Adv. Energy Mater.*, 8(8), 1702093 (2018)]。中国科学技术大学杨上峰教授、南开大学田建国教授、哈尔滨工业大学胡平安教授等分别在他们的研究性论文中采用我们的评估方法或实验结论来评定他们的性能指标和数据结果 [*Nat. Commun.*, 9, 4177 (2018)，代表性引文 4]；*Adv. Mater.*, 30, 1704653 (2018)；*Adv. Mater.*, 30, 1706986 (2018)]。中山大学杨国伟教授在其关于二维材料高性能光探测器的综述 [*Prog. Mater. Sci.*, 106, 100573 (2019)] 中，将代表性论文 7 作为少层 SnSe 光探测器的典型工作进行引用。澳大利亚南昆士兰大学陈志刚教授、昆士兰大学邹进教授和北京航空航天大学赵立东教授在其综述 [*Prog. Mater. Sci.*, 97, 283–346 (2018)，代表性引文 8] 中同时对我们的代表性论文 7 和 8 进行了

引用，在六个不同的地方分别从材料的制备方法、温度依赖的晶格振动以及非谐声子特征三个不同角度引述我们的工作。

2. 对科学发现二的评价：

印度科学院和国家科学院院士、中国科学院外籍院士、Linus Pauling 研究教授 (Research Professor) 兼名誉主席 (Honorary President) C. N. R. Rao 教授在其论文中引用代表性论文 6 工作来阐述异质结构可作为光电子材料被广泛研究[Chem. Commun., 53(73), 10093–10107 (2017)]; 中国科学院院士、俄罗斯科学院外籍院士、南京工业大学黄维院士等在其综述性论文中也将该工作作为电场调控范德瓦尔斯异质结构电子性质的典型工作加以引用[Adv. Electron. Mater., 4(11), 1800270 (2018)]。北京航空航天大学孙志梅教授在其论文中引用代表作 3 来说明了设计构建具有无带隙的金属性异质结构在锂离子电池的应用中存在天然的优势[Nanoscale, 11(13), 6431–6444 (2019)]; 宁波大学舒杰教授在其综述性论文中单独用一个小结对该工作进行了详细和大篇幅的介绍，认为我们设计的 $\text{WS}_2/\text{NbSe}_2$ 异质结构是非常有希望的锂离子电池电极材料，并由此认为构筑范德瓦尔斯异质结构是提高电极材料性能的极有效的方案[Nano Energy, 65, 104049 (2019), 代表性引文 6]。

3. 对科学发现三的评价：

合肥工业大学王敏教授、陈翌庆教授和韩国成均馆大学 Sungjoo Lee 教授采用代表作 4 中我们构筑异质结的思路来提高他们合成样品的光响应时间和光开关比[Adv. Mater., 29(17), 1606180 (2017)]; 南京工业大学黄维院士等将该工作作为范德瓦尔斯异质结构构筑和光电子器件应用的典型案例进行引述[Adv. Electron. Mater., 4(11), 1800270 (2018)]。韩国梨花女子大学 Seong-Ju Hwang 教授论文中将代表作 5 作为典型工作配发图片和文字进行重点报道[J. Photoch. Photobio. C, 40, 150–190 (2018)]; 欧洲科学院外籍院士、华东理工大学张金龙教授在综述性论文[Chem. Soc. Rev., 47(6), 2165–2216 (2018), 代表性引文 6]中将该工作列为典型进行评述；韩国科学院院士、浦项科技大学 Wonyong Choi 教授在其综述性论文[Energy Environ. Sci. 12(1), 59–95 (2019), 代表性引文 7]中，分别从 Graphene as a light harvester、Graphene as a high surface area host and support、Transition metal dichalcogenides as a co-catalyst 等三个不同的角度在文中四个不同地方对我们的工作进行了多次评述，肯定了我们构筑的这种多相范德瓦尔斯异质结构具有的多重优势有利地提升了光催化剂材料的性能指标。代表作 5 除了被学术期刊论文和综述引用外，该工作还多次被包括英国 Routledge 出版社出版的 Photocatalysis: Applications 以及荷兰 Springer 出版社出版的 Nanostructured Photocatalysts: Advanced Functional Materials 等专著作为新型高效光催化剂进行正面评述。目前，该工作被 Chem. Soc. Rev. 等 SCI 刊物引用 100 次。

代表作及论文目录:

序号	代表作及论文名称/ 刊名/作者	影 响 因 子	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	SCI 他 引 次 数	知识产 权是否 归国内 所有	是否代 表作
1	Few-layer black Phosphorus nanosheets as electrocatalysts for highly efficient oxygen evolution reaction/ Advanced Energy Materials /Xiaohui Ren, Jie Zhou, Xiang Qi*, Yundan Liu, Zongyu Huang, Zhongjun Li, Yanqi Ge, Sathish Chander Dhanabalan, Joice Sophia Ponraj, Shuangyin Wang, Jianxin Zhong, Han Zhang	24.884	2017 年 7 卷 17003 96 页	2017 年 10 月 11 日	祁祥, 张晗	任晓辉, 周洁	任晓辉, 周洁, 祁祥, 刘韵丹, 黄宗玉, 李中俊, 葛颜绮, 王双印, 钟建新, 张晗	87	87	是	是
2	Environmentally robust black Phosphorus nanosheets in solution: application for self-powered photodetector/Advanced Functional Materials/ Xiaohui Ren, Zhongjun Li, Zongyu Huang, David Sang, Hui Qiao, Xiang Qi, Jianqing Li, Jianxin Zhong, Han Zhang	15.621	2017 年 27 卷 1606 834	2017 年 5 月 11 日	祁祥, 张晗	任晓辉, 李中俊	任晓辉, 李中俊, 黄宗玉, 乔辉, 祁祥, 李建庆, 钟建新, 张晗	62	62	是	是

3	A novel WS ₂ /NbSe ₂ vdW heterostructure as a ultrafast charging and discharging anode material for Lithium-ion batteries/ Journal of Materials Chemistry A/ Huating Liu, Zongyu Huang, Guang Wu, Yanbing Wu, Guanghui Yuan, Chaoyu He, Xiang Qi, Jianxin Zhong	10.733	2018年6卷17040-17048	2018年9月21日	黄宗玉, 钟建新	刘华婷	刘华婷, 黄宗玉, 吴广, 伍延兵, 袁光辉, 何朝宇, 祁祥, 钟建新	11	11	是	是
4	Photoelectrochemical-type sunlight photodetector based on MoS ₂ /graphene heterostructure/2D Materials/ Zongyu Huang, Weijia Han, Hongli Tang, Long Ren, D. Sathish Chander, Xiang Qi, Han Zhang	7.343	2015年2卷035011	2015年9月	张晗	黄宗玉	黄宗玉, 韩卫家, 唐红梨, 任龙, 祁祥, 张晗	36	36	是	是
5	Enhanced photocatalytic activities of three-dimensional graphene-based aerogel embedding TiO ₂ nanoparticles and loading MoS ₂ nanosheets as co-catalyst/ International Journal of Hydrogen Energy/ Weijia Han, Chen Zang, Zongyu Huang, Han Zhang, Long Ren, Xiang Qi, Jianxin Zhong	4.084	2014年39卷19502-19512	2014年11月20日	张晗, 祁祥	韩卫家	韩卫家, 臧臣, 黄宗玉, 张晗, 任龙, 祁祥, 钟建新	88	88	是	是

6	Band-gap engineering of h-BN/MoS ₂ /h-BN sandwich heterostructure under external electric field/Journal of Physics D: Applied Physics/ Zongyu Huang, Xiang Qi, Hong Yang, Chaoyu He, Xiaolin Wei, Xiangyang Peng, Jianxin Zhong	2.8 29	2015 年 48 卷 2053 02 页	201 5 年 5 月 29	祁 祥, 钟建 新	黄宗 玉	黄宗玉, 祁祥, 杨 红, 何朝 宇, 魏晓 林, 彭向 阳, 钟建 新	19	19	是	
7	Synthesis of SnSe nanosheets by hydrothermal intercalation and exfoliation route and their photoresponse properties/ Materials Science and Engineering B/ Xiaohui Ren, Xiang Qi, Yongzhen Shen, Guanghua Xu, Jun Li, Zhenqing Li, Zongyu Huang, Jianxin Zhong	3.5 07	2016 年 214 卷 46-5 0	201 6 年 12 月	祁祥	任晓 辉	任晓辉, 祁祥, 沈 永臻, 徐 光华, 李 俊, 李振 庆, 黄宗 玉, 钟建 新	14	14	是	
8	Temperature-depende nt Raman responses of the vapor deposited Tin Selenide ultrathin flakes /The Journal of Physical Chemistry C /Siwei Luo, Xiang Qi, Hao Yao, Xiaohui Ren, Qiong Chen, Jianxin Zhong	4.3 09	2017 年 121 卷 4674 -467 9	201 7 年 3 月 2 日	祁 祥, 钟建 新	罗斯 玮	罗斯玮, 祁祥, 姚 浩, 任晓 辉, 陈 琼, 钟建 新	28	28	是	
合 计								345	345		

主要完成人情况:

姓 名	祁祥	性别	男	排 名	1	国 籍	中国
-----	----	----	---	-----	---	-----	----

对本项目重要科学发现的贡献：

作为项目负责人，提出总体研究思路、制定研究方案、协调研究工作的开展，完成部分研究工作。

参与研究内容：对科学发现一和科学发现三作出主要贡献，在少层范德瓦尔斯材料和范德瓦尔斯异质结构的制备与应用基础研究方面，指导完成结果分析和论文撰写。是代表性论文 1-2 和 5-8 的通讯作者，其他代表性论文 3, 4 的合作作者。

本人在该研究中的工作量占本人工作量的 70%。

姓 名	黄宗玉	性别	女	排 名	2	国 籍	中国
对本项目重要科学发现的贡献： 参与研究内容：对科学发现二作出主要贡献，理论上设计了几种新型的范德瓦尔斯异质结构，并理论分析了异质结构的界面效应以及电子和锂电性能；对科学发现三作出重要贡献，发现范德瓦尔斯异质结构的优异光探测性能，并构建出光探测原型器件。是代表性论文 4 和 6 的第一作者，代表性论文 3 的通讯作者；是代表性论文 1, 2, 5, 7 的合作作者。 本人在该研究中的工作量占本人工作量的 70%。							

姓 名	罗斯玮	性别	女	排 名	3	国 籍	中国
对本项目重要科学发现的贡献： 参与研究内容：对科学发现三作出重要贡献，制备了多种少层范德瓦尔斯材料，阐明了依赖温度的少层范德瓦尔斯材料的拉曼振动规律以及非谐声子性质。是代表性论文 8 的第一作者。 本人在该研究中的工作量占本人工作量的 60%。							

姓 名	刘韵丹	性别	女	排 名	4	国 籍	中国
对本项目重要科学发现的贡献： 参与研究内容：对科学发现一作出部分贡献，发展了测试电催化剂的装置和实验方法。参与结果代表性论文 1 的结果讨论和数据分析，是代表性论文 1 合作作者。 本人在该研究中的工作量占本人工作量的 60%。							

主要完成单位情况:

湘潭大学是项目完成人主持的所有国家自然科学基金和省部级项目的依托单位,本次奖励推荐是这些项目的部分成果。在这些项目执行期间,学校积极督促研究人员按照研究计划开展工作,学校给予了相应的经费配套,项目完成人享受学校的工资和福利待遇,学校提供了办公和科研基本条件,提供了计算条和实验条件,提供图书与文献资料的查阅和使用,在科研政策与校内分配政策上支持和鼓励研究人员开展创新性工作。

主要完成人合作关系说明:

项目完成人祁祥、黄宗玉、罗斯玮、刘韵丹、李俊、钟建新均为湘潭大学教师,在本项目实施期间依托湘潭大学长江学者钟建新教授负责的微纳能源材料与器件实验室开展工作。课题完成人之间的主要合作方式采用讨论实验方案和分析结果、分工进行实验、合作申请项目、合作发表学术论文等。

祁祥教授作为课题负责人,在项目中提出总体研究思路、制定研究方案、协调研究工作的开展,完成部分研究工作。对科学发现一和科学发现三作出主要贡献,在少层范德瓦尔斯材料和范德瓦尔斯异质结构的制备与应用基础研究方面,指导完成结果分析和论文撰写。是代表性论文 1-2 和 5-8 的通讯作者。

黄宗玉副教授作为第二完成人,对科学发现二作出主要贡献,理论上设计了几种新型的范德瓦尔斯异质结构,并理论分析了异质结构的界面效应以及电子和锂电性能;对科学发现三作出重要贡献,发现范德瓦尔斯异质结构的优异光探测性能,并构建出光探测原型器件。是代表性论文 4 和 6 的第一作者,代表性论文 3 的通讯作者;是代表性论文 1, 2, 5, 7 的合作作者。

罗斯玮博士作为第三完成人,对科学发现一作出主要贡献,制备了多种少层范德瓦尔斯材料,阐明了依赖温度的少层范德瓦尔斯材料的拉曼振动规律以及非谐声子性质。是代表性论文 8 的第一作者。

刘韵丹博士作为第四完成人,对科学发现一作出部分贡献,发展了测试电催化剂的装置和实验方法。是代表性论文 1 的合作作者。

李俊博士作为第五完成人,对科学发现一作出部分贡献,完善了少层范德瓦尔斯材料的制备工艺,探讨了范德瓦尔斯是代表性论文 7 的合作作者。

钟建新教授作为第六完成人,对科学发现二作出重要贡献,指导完成范德瓦尔斯异质结构的模型构建和性能模拟的结果分析以及论文撰写;对科学发现一作出部分贡献,指导完成少层范德瓦尔斯的非谐声子性质分析和论文撰写。是代表性论文 3, 6, 8 的共同通讯作者,是第二、第三、第四和第五完成人的博士论文指导教师,是项目完成人所在课题组的负责人。