

批准立项年份	2009
通过验收年份	2012

教育部重点实验室年度报告

(2024年01月01日——2024年12月30日)

实验室名称：人工结构及量子调控教育部重点实验室

实验室主任：沈文忠

实验室联系人/联系电话：蒋震宗/021-54743242

E-mail 地址：wzshen@sjtu.edu.cn; zzjiang@sjtu.edu.cn

依托单位名称：上海交通大学

依托单位联系人/联系电话：王国耀/021-34205186

2025年2月28日填报

填写说明

一、年度报告中各项指标只统计当年产生的数据，起止时间为1月1日至12月31日。年度报告的表格行数可据实调整，不设附件，请做好相关成果支撑材料的存档工作。年度报告经依托高校考核通过后，于次年3月31日前在实验室网站公开。

二、“研究水平与贡献”栏中，各项统计数据均为本年度由实验室人员在本实验室完成的重大科研成果，以及通过国内外合作研究取得的重要成果。其中：

1.“论文与专著”栏中，成果署名须有实验室。专著指正式出版的学术著作，不包括译著、论文集等。未正式发表的论文、专著不得统计。

2.“奖励”栏中，取奖项排名最靠前的实验室人员，按照其排名计算系数。系数计算方式为： $1/\text{实验室最靠前人员排名}$ 。例如：在某奖项的获奖人员中，排名最靠前的实验室人员为第一完成人，则系数为1；若排名最靠前的为第二完成人，则系数为 $1/2=0.5$ 。实验室在年度内获某项奖励多次的，系数累加计算。部委（省）级奖指部委（省）级对应国家科学技术奖相应系列奖。一个成果若获两级奖励，填报最高级者。未正式批准的奖励不统计。

3.“承担任务研究经费”指本年度内实验室实际到账的研究经费、运行补助费和设备更新费。

4.“发明专利与成果转化”栏中，某些行业批准的具有知识产权意义的国家级证书（如：新医药、新农药、新软件证书等）视同发明专利填报。国内外同内容专利不得重复统计。

5.“标准与规范”指参与制定国家标准、行业/地方标准的数量。

三、“研究队伍建设”栏中：

1.除特别说明统计年度数据外，均统计相关类型人员总数。固定人员指高等学校聘用的聘期2年以上的全职人员；流动人员指访问学者、博士后研究人员等。

2.“40岁以下”是指截至当年年底，不超过40周岁。

3.“科技人才”和“国际学术机构任职”栏，只统计固定人员。

4.“国际学术机构任职”指在国际学术组织和学术刊物任职情况。

四、“开放与运行管理”栏中：

1.“承办学术会议”包括国际学术会议和国内学术会议。其中，国内学术会议是指由主管部门或全国性一级学会批准的学术会议。

2.“国际合作项目”包括实验室承担的自然科学基金委、科技部、外专局等部门主管的国际科技合作项目，参与的国际重大科技合作计划/工程（如：ITER、CERN等）项目研究，以及双方单位之间正式签订协议书的国际合作项目。

一、简表

实验室名称		人工结构及量子调控教育部重点实验室				
研究方向 (据实增删)		研究方向 1	人工材料物性的计算研究与结构设计			
		研究方向 2	半导体量子结构与量子过程调控			
		研究方向 3	高温超导材料生长调控与机理			
		研究方向 4	表面和界面量子现象与调控			
		研究方向 5	小量子系统凝聚态理论			
实验室主任	姓名	沈文忠	研究方向	半导体量子结构与量子过程调控		
	出生日期	1968-5-22	职称	教授	任职时间	2012 年-今
实验室副主任	姓名	贾金锋	研究方向	表面和界面量子现象与调控		
	出生日期	1966-3-27	职称	教授 (院士)	任职时间	2012 年-今
实验室副主任	姓名	朱卡的	研究方向	小量子系统凝聚态理论		
	出生日期	1960-6-15	职称	教授	任职时间	2012 年-今
实验室副主任	姓名	钱冬	研究方向	表面和界面量子现象与调控		
	出生日期	1977-1-24	职称	教授	任职时间	2012 年-今
学术委员会主任	姓名	甘子钊	研究方向	高温超导材料生长调控与机理		
	出生日期	1938-4-16	职称	教授 (院士)	任职时间	2012 年-今
研究水平 与贡献	论文与专著	发表论文	SCI	100 篇	EI	0 篇 (未统计)
		科技专著	国内出版	0 部	国外出版	0 部
	奖励	国家自然科学奖	一等奖	0 项	二等奖	0 项
		国家技术发明奖	一等奖	0 项	二等奖	0 项
		国家科学技术进步奖	一等奖	0 项	二等奖	0 项
		省、部级科技奖励	一等奖	0 项	二等奖	0 项

	项目到账总经费	4377.94 万元	纵向经费	3956.70 万元	横向经费	421.24 万元	
	发明专利与成果转化	发明专利	申请数	11 项	授权数	3 项	
		成果转化	转化数	0 项	转化总经费	0 万元	
	标准与规范	国家标准	0 项		行业/地方标准	3 项（团体）	
研究队伍 建设	科技人才	实验室固定人员	57 人	实验室流动人员	22 人		
		院士	2 人	千人计划	1 人		
		长江学者	6 人 (新增 1 人)	国家杰出青年基金	4 人		
		国家“万人计划” 领军人才	2 人	青年长江	1 人		
		青千及海外优青	18 人 (新增 3 人)	国家优秀青年基金	0 人		
		其他国家、省部级 人才计划	8 人	自然科学基金委 创新群体	1 个		
		教育部创新团队	1 个	科技部重点领域创新团队	1 个		
	国外学术 机构任职	姓名	任职机构或组织			职务	
		贾金锋	美国物理学会（APS）			会士	
		贾金锋	《Quantum Frontiers》			执行主编	
		贾金锋	《Surface Review and Letters》			副主编	
		贾金锋	《Advanced Quantum Technologies》			编委	
		贾金锋	《NPJ Quantum Materials》			编委	
		贾金锋	《Condensed Matter》			编委	
		贾金锋	《2D Materials》			编委	
		贾金锋	《Acta Physica Sinica and Chinese Physics B》			编委	
		贾金锋	《Research 》			编委	
		郑 杭	《Journal of Quantum Sciences》			编委	
		郑 杭	《Quantum Frontiers》			编委	

		沈文忠	《Frontiers in Energy》		编委		
		沈文忠	《Nanomaterials》		编委		
		刘灿华	美国物理联合会 (AIP)		中国出版 顾问委员		
		刘灿华	《e-Journal of Surface Science and NanoTechnology》		副主编		
		朱卡的	《EPJ Quantum Technology》		编委		
		朱卡的	《Scientific Reports》		编委		
		郑浩	《Applied Science》		客座编辑		
		马杰	《Materials》		客座编辑		
		马杰	《Journal of Physics: Condensed Matter》		客座编辑		
		罗卫东	《Applied Sciences》		编委		
		秦明普	《New Journal of Physics》		编委		
		徐林	国际电工委员会		会员		
		张文涛	《Frontiers in Electronic Materials》		编委		
		张文涛	《Ultrafast Science》		青年编委		
		陈鹏	《Surface Review and Letters》		客座编辑		
		沈文忠	International Conference on Silicon Photovoltaics		Reviewing Committee Member		
		沈文忠	International Association of Advanced Materials (IAAM)		会士		
		访问学者	国内	0人	国外	1人	
	博士后	本年度进站博士后	7人	本年度出站博士后	7人		
学科发展与人才培养	依托学科 (据实增删)	学科1	物理学	学科2	材料科学	学科3	
	研究生培养	在读博士生		124人	在读硕士生		26人
	承担本科课程	2511学时			承担研究生课程		684学时
	大专院校教材	0部					

开放与 运行管理	承办学术会议	国际	1 次	国内 (含港澳台)	2 次
	年度新增国际合作项目			0 项	
	实验室面积	3600m ²	实验室 网址	http://klasqc.physics.sjtu.edu.cn/	
	主管部门年度经费投入	(直属高校不填)万元	依托单位年度经费投入		200 万元
学术委员会人数	14 人	其中外籍委员	0 人	共计召开实验室学术委员会会议	1 次
是否出现学术不端行为		否	是否按期进行年度考核		是
是否每年有固定的开放日		是	开放日期		11 月 08 日
开放日累计向社会开放共计		1 日	科普宣讲, 累计参与公众		2000 人
科普文章, 累计发表科普类文章		1 篇	其他		1 篇

一、研究水平与贡献

1、主要研究成果与贡献

结合研究方向，简要概述本年度实验室取得的重要研究成果与进展，包括论文和专著、标准和规范、发明专利、仪器研发方法创新、政策咨询、基础性工作等。总结实验室对国家战略需求、地方经济社会发展、行业产业科技创新的贡献，以及产生的社会影响和效益。

实验室介绍

上海交通大学“人工结构与量子调控”教育部重点实验室建设于2009年2月获批启动，2012年6月顺利通过教育部的验收，正式成为教育部重点实验室。在2015年度、2020年度两次数理、地学领域教育部重点实验室五年工作评估中均被评为优秀类实验室。

实验室获批建设以来，从国家高新技术需求和学科前沿的有机结合点出发，针对人工电子/光子结构体系及其相应的量子调控中的重大基础科学问题，选取已在人工结构及量子调控领域有雄厚工作基础和条件、可望在国际科技竞争中占有一席之地之有限目标作为突破口，形成五个特色鲜明的研究方向：（1）人工材料物性的计算研究与结构设计，（2）半导体量子结构与量子过程调控，（3）高温超导材料生长调控与机理，（4）表面和界面量子现象与调控，（5）小量子系统凝聚态理论。成立以来实验室围绕人工电子/光子结构，以人工结构设计、构造与组装、特异性能表征及应用、量子过程调控、原型器件与理论分析这一系统研究工作为主线，不仅在拓扑绝缘体量子现象、半导体量子器件、高温超导材料物理和小量子系统凝聚态基础理论等方面取得一批国际学术界领先的基础研究成果，而且成功开拓相关第二代高温超导带材和高效硅基太阳能电池技术的产业化应用，已成为国内外有显著特色的人工结构及量子调控领域创新研究基地。

实验室依托于上海交通大学物理与天文学院凝聚态物理国家重点学科，已形成一支相对稳定、学术水平高、具有创新意识和团队精神的学术队伍。近年来，实验室从学科建设实际出发，按重点领域和优先次序，持续对学科和人员结构进行优化。实验室整体人才队伍不断壮大，学科布局和人员梯队更加合理。本年度，引进日本理化研究所博士后姚元、牛津大学博士后陈维炯、以色列魏茨曼科学研究所博士后谭恒心入选“海外优青”。培养马杰教授入选“长江学者”；蔡子、王世勇分别晋升长聘教授、特聘教授。2024年度，实验室在职人员有固定人员 51

人、行政人员 6 人，其中正教授 22 人，40 岁以下研究骨干 12 人。此外，还有兼职教授及博士后等流动人员 22 人。

固定人员中包括中国科学院院士两人（雷啸霖、贾金锋）、国家“千人计划”入选者一人（顾威）和一批优秀学术带头人。学术带头人中四人获国家杰出青年科学基金（沈文忠、贾金锋、郑杭、王世勇），六人为教育部“长江学者奖励计划”特聘/讲座教授（沈文忠、贾金锋、姚忻、钱冬、郑浩、马杰），三人为“百千万人才工程”国家级人选（郑杭、沈文忠、贾金锋），两人入选国家“万人计划”科技创新领军人才（贾金锋、钱冬），一人曾入选“教育部跨世纪优秀人才计划”（朱卡的），一人入选中组部“拔尖人才计划”、科技部中青年科技创新领军人才（钱冬），一人入选教育部“青年长江学者”（刘灿华）、四人入选“教育部新世纪优秀人才”计划（董兵、刘世勇、钱冬、刘灿华）；此外，还有两人入选上海市“领军人才计划”（马红孺、马杰）。

在中青年学术骨干中，有十八人入选国家“青年千人计划”或“海外优青”（罗卫东、李耀义、马杰、郑浩、张文涛、史志文、蔡子、王世勇、陈鹏、李昕昕、姜生伟、许霄琰、陈国瑞、刘亮、陈淳、姚元、谭恒心、陈维炯），四人入选上海市“千人计划”（李贻杰、郑浩、史志文、陈鹏），五人入选上海市“曙光学者”（钱冬、刘灿华、郑浩、史志文、王世勇），二人入选上海市“东方学者”（钱冬、史志文），三人入选上海市“浦江人才”计划（董兵、刘灿华、管丹丹），四人入选上海市“启明星”计划（钱冬、蔡子、王世勇、李昕昕），一人入选浦东新区“明珠计划”领军人才（郑浩）。

贾金锋院士带领的“新型量子材料物理和器件”研究团队入选 2015 年度国家自然科学基金委创新研究群体和 2016 年科技部创新人才推进计划重点领域创新团队。沈文忠教授带领的“半导体量子结构与量子过程调控”群体为教育部“长江学者与创新团队发展计划”2005 年创新团队（2013 年获滚动支持）。实验室部分学术带头人参与的“人工微结构科学与技术协同创新中心”入选教育部“2011 计划”（南京大学为牵头单位）。表面和界面量子现象与调控团队于 2019 年度加入建设沈阳材料科学国家研究中心量子材料联合研究分部。沈文忠教授 2022 年牵头组建上海高校 IV 类高峰学科·能源科学与技术中的高效太阳能电池技术团队。2024 年，贾金锋院士牵头组建国家自然科学基金委基础科学研究中心（基金委卓越创新群体：拓扑量子计算的基础科学问题）。

年度成果综述

2024年11月19日，科睿唯安（Clarivate Analytics）发布了2023年度全球“高被引科学家”名单，实验室学术带头人郑浩教授名列其中。2019-2024年，郑浩教授连续六年入选“全球高被引科学家”。2024年3月27日，爱思唯尔（Elsevier）发布2023年“中国高被引学者”榜单，实验室主任沈文忠教授、副主任钱冬教授入选。这是沈文忠教授连续第四年入选、钱冬教授连续第三年入选该榜单。沈文忠教授同时入选爱思唯尔/斯坦福大学2023年度全球前2%顶尖科学家“生涯影响力”和“年度影响力”榜单。

2024年度，实验室固定人员发表SCI论文100篇，其中实验室为第一作者/通讯作者单位完成71篇。年度以第一完成单位发表的重要论文包括：《Nature》3篇、《Science》1篇，《Nature Physics》1篇、《Nature Nanotechnology》1篇，《Nature Communications》4篇，《Physical Review Letters》3篇，《Nano Energy》一篇，《Advanced Functional Materials》1篇等。此外，以共同一作/共同通讯作者合作发表重要论文，包括：《Nature Physics》1篇、《PNAS》1篇。

代表性研究进展包括：

1. **超高质量石墨烯纳米带助力碳基纳米电子学**：史志文教授团队与合作者在《Nature》上发表题为“Graphene nanoribbons grown in hBN stacks for high-performance electronics”的研究论文。该研究开发了一种生长石墨烯纳米带的全新方法，成功实现了超高质量石墨烯纳米带在氮化硼层间的嵌入式生长，形成“原位封装”的石墨烯纳米带结构，并演示了所生长的石墨烯纳米带可用于构建高性能场效应晶体管器件。【Nature 628, 758-764 (2024)】
2. **首次在天然单晶石墨烯中实现了量子反常霍尔效应**：陈国瑞课题组在《Science》上发表题为“Observation of a Chern insulator in crystalline ABCA-tetralayer graphene with spin-orbit coupling”的研究论文。该研究首次在天然单晶石墨烯中实现了量子反常霍尔效应，为实现量子反常霍尔这一重要物理效应提供了新思路和技术路线。此项工作表明，尽管石墨烯结构简单，但却能为探索前沿的拓扑物态和研究拓扑相变开辟新的道路。另一方面，天然石墨作为广泛存在的自然晶体，可以大大降低研究拓扑物理和未来多通道拓扑量子计算的门槛和成本。【Science 384, 414-419 (2024)】

3. **首次在单晶石墨烯中观测到电子掺杂情况的超导电性：**李昕昕课题组在《Nature》上发表题为“Tunable superconductivity in electron- and hole-doped Bernal bilayer graphene”的研究论文。该项研究首次在单晶石墨烯中观测到电子掺杂情况的超导电性，这一研究工作突显了在高位移电场下双层石墨烯系统中涌现的丰富量子物态，其中很多现象和性质还值得进一步的理论和实验研究。该工作不仅为理解单晶石墨烯乃至魔角石墨烯的超导机理提供了重要的实验信息和约束，而且为基于稳态结构的单晶石墨烯设计和制造新型超导量子器件奠定了坚实基础。【Nature 631, 300-306 (2024)】
4. **首次发现多重 Majorana 零能模存在的证据：**李耀义、贾金锋团队与合作者在《Nature》上发表题为“Signatures of hybridization of multiple Majorana zero modes in a vortex”的研究论文。该工作不仅从晶体对称性的角度首次发现多重 Majorana 零能模存在的证据，还为控制 Majorana 零能模之间的相互作用开辟了新的方法，并且拓展了 Majorana 零能模的类型以用于拓扑超导态的调控和新型拓扑量子比特的构造。【Nature 633, 71-76 (2024)】
5. 《Nature Nanotechnology》以“Spontaneous broken-symmetry insulator and metals in tetralayer rhombohedral graphene”为题发表了陈国瑞课题组最新研究成果，他们发展了一套制备特殊堆垛石墨烯的实验方法，并在菱形堆垛的四层石墨烯中，观测到自发对称性破缺带来的一系列新的电子物态。【Nature Nanotechnology 19, 188-195 (2024)】
6. 《Nature Physics》以“Observation of possible excitonic charge density waves and metal-insulator transitions in atomically thin semimetals”为题发表陈鹏课题组最新研究成果，他们在低维 HfTe_2 薄膜中发现了激子凝聚引起的电荷密度波和金属—绝缘体转变现象。【Nature Physics 20, 597-602 (2024)】
7. 贾金锋院士团队与荷兰乌德勒支大学团队合作在《Nature Physics》上发表题为“Topological edge and corner states in bismuth fractal nanostructures”的研究论文，对凝聚态体系中分形材料的电子态进行了细致研究，首次揭示了自组装的分形 Bi 薄膜中拓扑态的存在。该项工作是首次在凝聚态体系中对分形结构电子特性的研究，实验观测到了拓扑角态，拓扑边缘态等多种新奇电子态，为拓扑态的研究开拓了新的维度，对分形领域的发展和拓扑绝缘体材料的发展具有极为重要的意义，同时也为马约拉纳零能模的探测和拓扑量子计算的实现提供了新的

思路。【Nature Physics 20, 1421-1428 (2024)】

8. 马杰课题组与合作者在《Nature Communications》上发表题为“Vacancies tailoring lattice anharmonicity of Zintl-type thermoelectrics”的最新研究成果。文章报道了空位可以在声子热输运中起到的关键作用，确定了 Zintl 型热电材料超低晶格热导率的物理起源，并提出了利用晶格缺陷调控声子群速度与晶格非谐性从而降低晶格热导率的新方法。【Nature Communications 15, 2618 (2024)】
9. 史志文团队研究发现，通过简单地将二维六方氮化硼 (hBN) 材料堆叠覆盖在碳纳米管之上，就可以在碳纳米管上产生高达 10GPa 的局域高压，并使得被覆盖的碳纳米管发生结构塌缩。进一步研究还发现，结构塌缩可以使金属性碳纳米管转变为半导体性碳纳米管。这一研究成果不仅给出了一种新颖而又便捷的产生局域高压 (GPa 量级) 的方法，同时制备得到的半导体性塌缩碳管为纳米电子学和纳米光子学研究领域提供了一种新材料。研究成果以“Collapse of carbon nanotubes due to local high-pressure from van der Waals encapsulation”为题发表在《Nature Communications》。【Nature Communications 15, 3486 (2024)】
10. 沈文忠教授团队与合作者提出了一种带增强环的薄晶体硅(TSRR)结构，它只需利用光伏产业界的常规设备经额外 3 个步骤即可实现量产，可在整个太阳能电池制备流程为硅片提供支撑以降低碎片率。基于 TSRR 结构，研究团队成功制备出 4 英寸 4.7 微米的可自站立的晶圆片，这是迄今为止报道的厚度小于 5 微米的最大面积可自站立单晶硅片。制备具有 TSRR 结构的太阳能电池，实现了 28 微米厚的光电转化效率为 20.33% (第三方认证效率为 20.05%) 的晶硅太阳能电池，这是厚度小于 35 微米的晶硅太阳能电池的最高效率报道记录。研究成果以“Free-standing ultrathin silicon wafers and solar cells through edges reinforcement”为题发表在《Nature Communications》。【Nature Communications 15, 3843 (2024)】
11. 马杰课题组与合作者通过中子散射与理论计算相结合，揭示了“层间滑移—非简谐声子—非常规热输运”之间的耦合关联，相关成果以“Uncovering the phonon spectra and lattice dynamics of plastically deformable InSe van der Waals crystals”为题发表在《Nature Communications》。【Nature Communications 15, 6248 (2024)】
12. 《Physical Review Letters》刊发了秦明普课题组“Augmenting Density Matrix Renormalization Group with Clifford Circuits”为题的研究成果。他们将 Clifford

线路与 DMRG 算法融合，发展了 Clifford circuits Augmented Matrix Product States(CAMPS) 算法。CAMPS 算法结合了 Clifford 线路可以经典模拟和 DMRG 高效的特性。通过在二维 J1-J2 海森堡模型的测试发现，新算法的精度相比 DMRG 结果有显著提高，但是计算复杂度只有轻微增加。该工作提出的将量子线路与张量网络算法结合的思想可以广泛地应用于各种方法。为发展高效准确的量子多体算法开辟了新思路。【Phys. Rev. Lett. **133**, 190402 (2024)】

13. 蔡子课题组基于里德堡原子阵列系统，提出了一种新的量子多体态：量子融雪态。相关工作以“Quantum slush state in Rydberg atom arrays”为题发表与《Physical Review Letters》，并入选当期 Editor Suggestion。【Phys. Rev. Lett. **132**, 206503 (2024)】

14. 在超过 14 GPa 的压力下，双层 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 在液氮温度以上展现出强超导电性。一个直接的关键问题是压力引起的电子结构的质变，从而实现令人振奋的高温超导电性。顾威课题组通过有效多体物理的数值多尺度推导研究了这个问题。在结果表明 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的高温超导机制及其 (d 波) 对称性与铜氧化物超导体具有相似性。相关成果以“Pressure Driven Fractionalization of Ionic Spins Results in Cupratelike High-Tc Superconductivity in $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ ”为题发表在《Physical Review Letters》，论文发表后迅速成为高被引论文。【Phys. Rev. Lett. **132**, 126503 (2024)】

本年度，引进日本理化研究所博士后姚元、牛津大学博士后陈维炯、以色列魏茨曼科学研究所博士后谭恒心入选“海外优青”，培养马杰教授入选“长江学者”；蔡子、王世勇分别晋升长聘教授、特聘教授。新增郑浩教授、王世勇教授为学术带头人。

陈国瑞副教授获“2024 中国新锐科技人物卓越影响奖”，李昕昕副教授获 2024 年第一届“睿远青年科技奖”并入选上海市启明星计划。郑浩教授入选浦东新区“明珠人才”项目领军人才。

本年度，实验室组织大型全国性学术会议一次(第二十届中国太阳级硅及光伏发电研讨会)；组织行业研讨会一次（城市分布式光伏和 BIPV 技术应用研讨会暨 2024 上海市太阳能学会年会）；组织暑期学校一次（上海交通大学首届凝聚态物理暑期学校）。组织学术讲座 50 场，固定人员参加国内外学术会议 36 人次，其中作邀请报告 19 人次；贾金锋院士受邀担任第三届 CCF 量子计算大会指导委员会

委员。开放课题在研项目 4 项，2024 年度共发表 SCI 论文 2 篇，均标注实验名称。

本年度培养 1 名博士后入选“上海市超级博后激励计划”；培养 4 名博士生入选中国科协青年人才托举工程博士生专项计划。指导 1 名本科生获国家自然科学基金青年学生基础研究项目（本科生）立项；指导本科生参加第十届全国大学生物理实验竞赛（创新），获讲课类一等奖 1 项、三等奖 1 项；命题类三等奖 1 项；指导本科生参加第九届上海市大学生物理学术竞赛，获二等奖 2 项。培养研究生团队获首届能源电子产业创新大赛太阳能光伏赛道优秀奖；培养研究生获“国家奖学金”等各类奖励 20 人次。

实验室教师上海交通大学科研成果一等奖 1 项、教书育人三等奖 1 项；获上海交通大学“十大科技进展”1 项；上海交通大学“十佳班主任”1 人。主持国家级教学项目 2 项，参与 1 项，年度新增主持项目 1 项。1 门课程入选上海高校市级一流本科课程。以通讯作者指导学生在《欧洲物理杂志》再次发表教学研究论文，《欧洲物理杂志》是国际公认的物理教学研究高水平期刊之一，也是为数不多的被 SCI 收录的教学研究高水平期刊之一。年度申请国家发明专利 11 件，获国家发明专利授权 3 件。年度经费到款 4377.94 万元。

实验室光伏科学与技术研究团队以国家光伏产业重大战略部署为指引，着力促进技术革新与行业转型的有机结合。以“应用导向、产研协同”为特色，通过参与企业“揭榜挂帅”项目、技术支持中试平台建设、校企联合研发、标准制定等路径，推动科研成果快速落地。同时，团队专家通过学术著作、学术前沿报告助力行业新技术的推广和发展，为行业经济高质量发展注入新动能。本年度光伏科学与技术研究团队与国晟科技、安徽华晟、隆基绿能、华耀光电、微导纳米、苏州赛伍、宏润建设等国内外知名企业继续保持密切合作，深入开展太阳能产业新技术开发合作。团队负责人沈文忠教授受邀担任中国光伏行业协会咨询顾问、第七届中国国际光伏与储能产业大会组委会学术委员会副主席。团队参与制定《全背电极接触（BC）晶硅光伏电池技术要求》《钙钛矿与叠层电池薄膜制备技术要求》《钙钛矿光伏电池性能要求和测试方法》等团体标准 3 项。

2、承担科研任务

概述实验室本年度科研任务总体情况。

实验室深入贯彻落实国家战略需求与科技前沿部署，聚焦国际学术前沿领域，瞄准拓扑量子材料与器件、低维体系量子调控、半导体量子器件物理及高温超导机理等重大科学命题，并与国家产业发展紧密结合，开拓相关研究成果的转化和应用，承担了一批重要的科研项目。同时，通过创新团队建设来保障各项国家重大科研项目的顺利开展。以学科领军人物为核心，以科研骨干为主体，专业人才与科研辅助人员相配合，各研究方向团结协作，在保持各方向自身特色的同时，推动各项研究的交叉融合与协同推进，增强承担重要科研项目和服务社会的能力，全面提升实验室支撑国家高水平科技自立自强的综合效能。

2024 年度获批及新增主要项目包括（合同经费超过 100 万元的项目及自然科学基金面上项目）：

- 1、获批国家自然科学基金委卓越创新群体项目 1 项。贾金锋院士：“拓扑量子计算的基础科学问题”（2025.1 月起，6000 万元）
- 2、新增国家基金委重大研发计划（集成）1 项。郑浩教授“马约拉纳体系的制备、表征与操控”（2024.1 月起，600 万元）。
- 3、新增国家杰出青年科学基金 1 项。王世勇副教授“低维有机量子材料的表面制备与量子态调控”（2024.1 月起，400 万元）。
- 4、新增国家自然科学基金委原创探索项目 2 项。包括：李昕昕副教授“二维材料莫尔超晶格中分数量子反常霍尔效应的输运性质研究”（2024.1 月起，300 万元）；陈国瑞副教授“特殊堆垛多层石墨烯中新物态的研究”（2024.1 月起，280 万）。
- 5、新增国家重点研发计划青年科学家项目 1 项。刘亮副教授：“低对称体系的新型自旋流效应与调控”（2024.12 月起，500 万元）。
- 6、新增国家重点研发计划课题 1 项。李正平助理研究员：“基于少铟透明电极和少银金属电极的异质结太阳能电池导电机理及界面调控研究”（2024.12 月起，160 万元）。
- 7、新增国家自然科学基金面上项目 2 项（2024.1 月起），项目负责人分别为史

志文教授、陈鹏副教授，总经费 104 万元。

8、新增上海市“科技创新行动计划”基础研究专项 2 项，高新技术专项 1 项。包括：陈国瑞副教授：“二维莫尔体系分数量子霍尔和量子计算的研究”（2024.12 月起，500 万元），郑浩教授“马约拉纳体系的构筑和拓扑量子计算研究”（2024.12 起，350 万元），沈文忠教授：“大面积超薄柔性高效钙钛矿/晶硅异质结叠层太阳能电池技术研究”（2024.12 月起，200 万元）。

9、新增四川宜宾市“揭榜挂帅”项目 1 项。沈文忠教授：“基于双面 poly 钝化接触太阳能电池关键量产技术研究”（2024.5 月起，360 万元）。新增苏州赛伍企业合作横向课题 1 项，沈文忠教授：“TOPCon 太阳能电池中的衰减机理研究和抗衰减技术开发”（2024.5 月，100 万元）。

10、获批国家自然科学基金委专项项目 1 项，许霄琰副教授：“非费米液体及相关新物态的理论研究”（2025.1 月起，400 万元）。

11、获批国家自然科学基金面上项目 3 项。负责人分别为姚元副教授、刘亮副教授、李耀义副教授，总经费 155 万元（2025.1 月起）。

本年度在研的其他主要项目（开始时间为 2024 年之前）还包括：贾金锋教授为首席科学家的国家重点研发计划计划项目 1 项；国家重点研发计划课题、青年科学项目共 8 项（负责人为：李贻杰、沈文忠、钱冬、张文涛、史志文、马杰、王世勇、李昕昕）；郑浩教授、马杰教授、张文涛教授主持的国家自然科学基金重点项目、专项项目 3 项；沈文忠教授主持的产学研合作项目 6 项（华耀光电、内蒙古“揭榜挂帅”、兴文县人民政府、宏润建设、安徽/江苏国晟）、钱冬教授主持的企业合作项目 1 项（华为）；陈鹏副教授主持的国家重点研发计划-国际合作/政府间国际科技创新合作/港澳台科技创新合作重点专项 1 项、李贻杰教授主持的上海市科委高新技术专项 1 项等。承担中组部“青年千人”、“海外优青”等人才计划项目；主持国家自然科学基金面上项目 10 项、青年项目 1 项。

2024 年之前开始的各类在研项目共 70 余项，合同总金额 1.2 亿元，其中合同金额超过 100 万的主要项目（每年度国家自然科学基金面上、青年项目作为一个项目）27 项。年度科研经费实际到款 4377.94 万元，其中超过 90%来至合同金额超过 100 万元的国家和省部级重大项目以及重大横向课题。年度新增及获批各类科研/人才计划项目 30 项，其中主要项目 17 项，合同金额超 1 亿元。

这些项目的启动与设立，将促进实验室创新性研究的充分开展，有利于在科学前沿领域实现重点突破。同时，充足的科研经费也为实验室新一年度的研究任务的顺利执行提供有力的保障。在执行国家/省部级重大基础研究任务的过程中，实验室重视项目的过程管理，项目负责人注重科研项目质量和效益，确保高质量完成项目既定任务。

同时，实验室通过与企业建立需求导向的联合攻关模式，构建“需求导向-基础突破-产业贯通”的创新链条，缩短技术研发到应用的周期。科研成果正加速从实验室走向生产线。至 2024 年底，实验室在研的“揭榜挂帅”、上海市科技创新行动计划高新技术专项、国家重点研发计划课题等共 6 项，与企业政府间产学研合作、横向课题 7 项。通过与华为、安徽华晟、国晟科技、隆基乐叶光伏、苏州赛伍、和光同程、兴文县人民政府等国内外知名企业、地方政府进行产学研合作，精准对接企业技术需求，推动科技创新与产业升级深度融合，将高校实验室里的新技术、新方案、新产品直接应用于企业生产线，切实将前沿突破转化为产业竞争力。

本年度承担主要任务（合同经费超过 100 万元）如下：

序号	项目/课题名称	编号	负责人	起止时间	经费 (万元)	类别
1	马约拉纳零能模的构筑和操控	2019YFA0308600	贾金锋 (项目首席)	2020-2024	1857	科技部国家重点研发计划项目
2	面向强场应用的百米级 FeSeTe 涂层超导带材关键技术研究	2018YFA0704302	李贻杰	2019-2024	675	科技部国家重点研发计划项目课题
3	晶硅全钝化接触电池结构设计及机理研究	2022YFB4200101	沈文忠	2022-2025	300	科技部国家重点研发计划项目课题
4	二维材料异质结的界面超导和拓扑特性调控	2021YFA1400104	钱冬	2021-2026	550	科技部国家重点研发计划项目课题
5	超快实验技术发展 与超快探测	2021YFA1400202	张文涛	2021-2026	248	科技部国家重点研发计划项目课题
6	量子自旋阻挫体系及其异质结中非常规自旋激发的调控研究	2022YFA1402702	马杰	2022-2027	699	科技部国家重点研发计划项目课题
7	超薄半导体的多 维度极限分辨表 征	2021YFA1202902	史志文	2022-2026	450	科技部国家重点研发计划项目课题
8	调控低维石墨烯材料中的量子多 体效应	2020YFA0309000	王世勇	2021-2025	480	国家重点研发计划青年科学家项目
9	极端条件下二维 半导体莫尔超晶 格中的量子物态 调控	2022YFA1405400	李昕昕	2022-2027	500	国家重点研发计划青年科学家项目
10	多个马约拉纳零 能模之间相互作 用的实验研究	92065201	郑浩	2021-2025	350	国家自然科学基金重点项目
11	二维三角晶格 阻挫材料的量	U2032213	马杰	2021-2024	300	国家基金委联合基金重点项

	子磁性起源及强磁场调控研究					目
12	光致二维电子态和高温超导研究	12141404	张文涛	2022-2025	300	国家自然科学基金委专项
13	青年千人计划启动资金	/	姜生伟	2021-2026	200	中组部青年千人计划及校内配套
14	青年千人计划启动资金	/	李昕昕	2021-2026	200	中组部青年千人计划及校内配套
15	陈国瑞海外优青	/	陈国瑞	2022-2024	200	国家海外高层次人才计划(海外优青)项目
16	许霄琰海外优青	/	许霄琰	2022-2024	200	国家海外高层次人才计划(海外优青)项目
17	刘亮海外优青	/	刘 亮	2023-2026	300	国家海外高层次人才计划(海外优青)项目
18	新型量子自旋霍尔绝缘体的可控制备和器件研究	2021YFE0194100	陈 鹏	2022-2024	100	国家重点研发计划-国际合作/政府间国际科技创新合作/港澳台科技创新合作重点专项
19	高性能 Fe (Se, Te) 铁基超导带材制备关键技术研究	23511101700	李贻杰	2023-2025	200	上海市科委科技创新行动计划/高新技术
20	高效晶硅太阳能电池研究及示范应用	2022JBGS0036	沈文忠	2022-2025	300	内蒙古自治区“挂榜揭帅”项目
21	N 型光伏电池成套工艺和生产技术研发	/	沈文忠	2022-2027	750	横向课课题：华耀光电股份有限公司

22	兴文县上海交大 光伏科技合作协 议	/	沈文忠	2023-2028	250	兴文县人民政 府
23	宏润建设上海交 大光伏科技合作 协议	/	沈文忠	2023-2025	160	宏润建设集团 股份有限公司
24	高效异质结电池/ 组件技术开发	/	沈文忠	2023-2026	150	江苏国晟世安 新能源有限公 司
25	高效异质结组件 技术开发	/	沈文忠	2023-2026	150	安徽国晟新能 源科技有限公 司
26	拓扑材料与器件 的制备与表征	/	钱冬	2023-2024	160	华为技术有限 公司
27	年度在研自然科 学基金面上项目 10项、青年项目 1项	/	秦明普等		548	国家自然科学 基金面上项目
以下为年度新增及获批项目						
28	拓扑量子计算的 基础科学问题	/	贾金锋	2025-2029	6000	国家基金委 卓越研究群体 项目
29	马约拉纳体系的 制备、表征与操 控	92365302	郑浩	2024-2026	600	国家基金委重 大研发计划 (集成)
30	低维有机量子材 料的表面制备与 量子态调控	22325203	王世勇	2024-2028	400	国家杰出青年 科学基金
31	二维材料莫尔超 晶格中分数量子 反常霍尔效应的 输运性质研究	12350403	李昕昕	2024-2027	300	国家基金委原 创探索项目
32	特殊堆垛多层石 墨烯中新物态的 研究	12350005	陈国瑞	2024-2026	280	国家基金委原 创探索项目
33	低对称体系的新 型自旋流效应与 调控	2024YFA1410100	刘亮	2024-2029	500	国家重点研发 计划青年科学 家项目

34	基于少铜透明电极和少银金属电极的异质结太阳能电池导电机理及界面调控研究	2024YFB3813901	李正平	2024-2027	160	国家重点研发计划课题
35	国家自然科学基金面上项目 2 项	/	史志文 陈 鹏	2024-2027	104	国家自然科学基金面上项目
36	陈淳海外优青	/	陈 淳	2024-2027	100	国家海外高层次人才计划 (海外优青) 项目
37	姚元海外优青	/	姚 元	2024-2026	100	国家海外高层次人才计划 (海外优青) 项目
38	二维莫尔体系分数量子霍尔和量子计算的研究	24LZ1401100	陈国瑞	2024-2027	500	上海市科委科技创新行动计划/基础研究
39	马约拉纳体系的构筑和拓扑量子计算研究	24LZ1401000	郑 浩	2024-2027	350	上海市科委科技创新行动计划/基础研究
40	大面积超薄柔性高效钙钛矿/晶硅异质结叠层太阳能电池技术研究	24DZ3000900	沈文忠	2024-2027	200	上海市科委科技创新行动计划/高新技术
41	基于双面 poly 钝化接触太阳能电池关键量产技术研究	/	沈文忠	2024-2026	360	四川宜宾市“挂榜揭帅”项目
42	TOPCon 太阳能电池中的衰减机理研究和抗衰减技术开发	/	沈文忠	2024-2025	100	苏州赛伍应用技术股份有限公司
43	非费米液体及相关新物态的理论研究	12447103	许霄琰	2025-2028	400	国家基金委原创专项项目
44	获批国家自然科学基金面上项目 3 项	/	刘 亮 姚 元 李耀义	2025-2028	155	国家自然科学基金面上项目

三、研究队伍建设

1、各研究方向及研究队伍

研究方向	学术带头人	主要骨干
1、人工材料物性的计算研究与结构设计	孙弘 顾威	罗卫东、马杰、蔡子 许霄琰、陈淳、秦明普、 谭恒心
2、半导体量子结构与量子过程调控	沈文忠	张月蘅、史志文、郑茂 俊、陈国瑞、姜生伟、 李昕昕、刘洪、徐林、 李正平、马胜
3、高温超导材料生长调控与机理	姚忻、李贻杰	刘林飞、邢晖
4、表面和界面量子现象与调控	贾金锋、钱冬 刘灿华、郑浩 王世勇	李耀义、张文涛、陈鹏、 刘亮、管丹丹、姚元、 陈维炯
5、小量子系统凝聚态理论	雷啸霖 朱卡的	董兵、吕智国、罗旭东、 刘世勇、丁国辉

2、本年度固定人员情况

序号	姓名	性别	年龄	最后学位	类型	技术职称	在实验室工作期限
1	沈文忠	男	56	博士	研究人员	教授	2010年至今
2	雷啸霖	男	86	学士	研究人员	教授 (院士)	2010年至今
3	贾金锋	男	58	博士	研究人员	教授 (院士)	2010年至今
4	郑杭	男	73	博士	研究人员	教授	2010年至今
5	顾威	男	55	博士	研究人员	教授	2015年至今
6	孙弘	男	67	博士	研究人员	教授	2010年至今
7	朱卡的	男	64	博士	研究人员	教授	2010年至今
8	姚忻	男	69	博士	研究人员	教授	2010年至今

9	李贻杰	男	62	博士	研究人员	教授	2010 年至今
10	钱 冬	男	47	博士	研究人员	教授	2010 年至今
11	郑 浩	男	44	博士	研究人员	教授	2016 年至今
12	王世勇	男	38	博士	研究人员	教授	2017 年至今
13	刘灿华	男	48	博士	研究人员	教授	2010 年至今
14	董 兵	男	56	博士	研究人员	教授	2010 年至今
15	郑茂俊	男	62	博士	研究人员	教授	2010 年至今
16	袁晓忠	男	62	博士	教学为主	教授	2010 年至今
17	张月衢	女	50	博士	研究人员	教授	2010 年至今
18	张文涛	男	42	博士	研究人员	教授	2015-2024 年
19	罗卫东	男	46	博士	研究人员	教授	2013 年至今
20	史志文	男	41	博士	研究人员	教授	2015 年至今
21	马 杰	男	44	博士	研究人员	教授	2015 年至今
22	蔡 子	男	40	博士	研究人员	教授	2017 年至今
23	李耀义	男	41	博士	研究人员	副教授	2015 年至今
24	陈 鹏	男	42	博士	研究人员	副教授	2019 年至今
25	秦明普	男	39	博士	研究人员	副教授	2019 年至今
26	陈国瑞	男	38	博士	研究人员	副教授	2021 年至今
27	姜生伟	男	39	博士	研究人员	副教授	2021 年至今
28	李昕昕	男	36	博士	研究人员	副教授	2021 年至今
29	许霄琰	男	38	博士	研究人员	副教授	2022 年至今
30	陈 淳	男	36	博士	研究人员	副教授	2022 年至今
31	刘 亮	男	36	博士	研究人员	副教授	2023 年至今

32	陈维炯	男	34	博士	研究人员	副教授	2024 年至今
33	谭恒心	男	36	博士	研究人员	副教授	2024 年至今
34	姚 元	男	35	博士	研究人员	副教授	2024 年至今
35	刘世勇	男	48	博士	研究人员	副教授	2010 年至今
36	吕智国	男	49	博士	教学为主	副教授	2010 年至今
37	罗旭东	男	50	博士	教学为主	副教授	2010 年至今
38	李 晟	男	48	博士	教学为主	副教授	2010 年至今
39	丁国辉	男	54	博士	研究人员	副教授	2010 年至今
40	潘 葳	女	43	博士	教学为主	副教授	2010 年至今
41	刘 洪	男	46	博士	专职科研	副研究员	2011 年至今
42	刘林飞	女	44	博士	专职科研	副研究员	2010 年至今
43	管丹丹	女	42	博士	专职科研	副研究员	2013 年至今
44	邢 晖	男	41	博士	专职科研	副研究员	2015 年至今
45	徐 林	男	52	博士	研究人员	副研究员	2010 年至今
46	李正平	男	48	博士	专职科研	助理研究员	2013 年至今
47	杨 浩	男	34	博士	专职科研	助理研究员	2024 年至今
48	马 胜	男	35	博士	专职科研	助理研究员	2024 年至今
49	王国华	男	41	博士	专职科研	实验师	2021 年至今
50	赵西梅	女	50	硕士	实验教学	实验师	2010 年至今
51	蒋震宗	男	46	学士	技术人员	工程师	2010 年至今
以下为行政人员							
52	韩 辉	女	42	硕士	行政人员	文员	2013 年至今
53	程 莹	女	40	硕士	行政人员	文员	2016 年至今

54	黄彬彬	女	39	学士	行政人员	文员	2018 年至今
55	杨家林	女	37	学士	行政人员	文员	2017 年至今
56	余 寰	女	31	硕士	行政人员	文员	2023 年至今
57	曾红芳	女	35	硕士	行政人员	文员	2023 年至今

3、本年度流动人员情况

	姓名	性别	年龄	从事专业	技术职称	来自国家	工作单位	在实验室工作期限
1	Anthony J. Leggett	男	86	凝聚态物理	教授, 诺贝尔物理学奖获得者, 美国科学院、美国知识学会、美国艺术与科学学院院士, 俄罗斯科学院外籍院士, 英国皇家学会、美国物理学会、美国物理联合会会士, 英国物理学会荣誉院士	美国	伊利诺伊大学厄巴纳—香潘恩分校	2013 年至今 每年一个月
以上为兼职教授(访问学者), 以下为博士后研究人员:								
2	沈 阳	男	39	凝聚态物理	导师: 秦明普 罗卫东	中国		2021 年 -2024 年
3	包谷之	男	30	凝聚态物理	导师: 郑 杭	中国		2020 年 -2024 年
4	刘 晨	男	36	凝聚态物理	导师: 贾金锋	中国		2021 年 -2024 年
5	徐琨淇	男	37	凝聚态物理	导师: 史志文	中国		2021 年 -2024 年
6	吕博赛	男	30	凝聚态物理	导师: 史志文 陈国瑞	中国		2022 年 -2024 年

7	段绍峰	男	32	凝聚态物理	导师：张文涛	中国		2022年 -2024年
8	杜大学	男	31	凝聚态物理	导师：沈文忠	中国		2022年 -2024年
9	舒明方	男	36	凝聚态物理	导师：马杰	中国		2021年至今
10	顾方圆	男	33	凝聚态物理	导师：顾威	中国		2021年至今
11	丁东	男	34	凝聚态物理	导师：沈文忠	中国		2021年至今
12	尹训庆	男	33	凝聚态物理	导师：钱冬	中国		2022年至今
13	李灿	男	32	凝聚态物理	导师：贾金锋	中国		2022年至今
14	王佳军	男	35	凝聚态物理	导师：沈文忠 王国峰	中国		2023年至今
15	李政贤	女	35	凝聚态物理	导师：陈国瑞	中国		2023年至今
16	MATHEUS SAMUEL MARTINS DE SOUSA	男	29	粒子物理	导师：顾威	巴西		2024年至今
17	沈晓琳	女	33	凝聚态物理	导师：马杰	中国		2024年至今
18	陈闯	男	31	凝聚态物理	导师：许霄琰	中国		2024年至今
19	张艳	女	37	凝聚态物理	导师：董兵	中国		2024年至今
20	金旻坤	男	37	凝聚态物理	导师：沈文忠 张彼克	中国		2024年至今
21	王田阳	男	32	凝聚态物理	导师：陈国瑞	中国		2024年至今
22	田王昊	男	30	凝聚态物理	导师：李昕昕	中国		2024年至今

四、学科发展与人才培养

1、学科发展

简述实验室所依托学科的年度发展情况,包括科学研究对学科建设的支撑作用,以及推动学科交叉与新兴学科建设的情况。

实验室所依托的上海交通大学物理与天文学院凝聚态物理学科 2002 年被教育部批准为国家重点学科。2009 年开始筹建“人工结构及量子调控”教育部重点实验室。2010 年起根据国际上拓扑绝缘体研究热潮,引进了表面和界面量子现象与调控优秀研究团队。2012 年 6 月实验室顺利通过教育部验收,并在 2015 年度、2020 年度数理、地学领域教育部重点实验室五年工作评估中均被评为“优秀类”实验室。

上海交通大学将本实验室作为凝聚态物理国家重点学科建设的主要载体,加大投入,重点予以建设。在具有国内外影响力的优秀学术带头人(2 位中国科学院院士、8 位长江/杰青)的带领下,多位海外归国优秀中青年科研人员(1 位“千人计划”、18 位“青年千人”、“海外优青”)全心投入。目前已形成了五个研究方向,九支各有特色的研究团队,已在拓扑绝缘体量子现象、半导体量子器件、高温超导材料物理和小量子系统凝聚态基础理论等方面取得一批国际学术界领先的基础研究成果,同时成功开拓相关第二代高温超导带材和高效硅基太阳能电池技术的产业化应用,逐步发展为国内外有显著特色的人工结构及量子调控领域创新研究基地。

近年来,实验室表面和界面量子现象与调控团队在“新型量子材料物理与器件”国家自然科学基金委创新研究群体、科技部重点领域创新团队项目等团队建设项目的支持下,研究团队得到充实与加强,取得了一系列国际领先的重要研究成果,荣获 2019 年国家自然科学基金二等奖,团队负责人贾金锋教授 2021 年当选中国科学院院士。2019 年,贾金锋教授作为项目负责人承担了国家重点研发计划“量子调控与量子信息”重点专项项目“马约拉纳零能模的构筑与操控”。团队中郑浩教授承担了自然科学基金重大项目“新型拓扑超导体和马约拉纳准粒子的实验研究”、重点项目“多个马约拉纳零能模之间相互作用的实验研究”;2023 年郑浩教授入选长江学者特聘教授,2024 年新增国家基金委重大研发计划(集成):“马约拉纳体系的制备、表征与操控”。团队中王世勇副教授 2021 年承担了国家重点研发计划青年项目“调控低维石墨烯材料中的量子多体效应”,2024

年新增国家杰出青年科学基金项目“低维有机量子材料的表面制备与量子态调控”。2024年，贾金锋院士牵头组建国家自然科学基金委基础科学研究中心（基金委卓越创新群体：拓扑量子计算的基础科学问题）。以上项目的立项与实施，使表面和界面量子现象与调控团队在贾金锋院士的带领下在拓扑量子计算等新兴学科方向取得突破性进展，成为实验室最具特色的研究领域，带动了实验室整体科研能力的提升。贾金锋教授、郑浩教授团队实验证实超导态“分段费米面”的成果入选“2022年度中国十大科技进展”。2024年李耀义副教授和贾金锋院士团队首次发现了多重 Majorana 零能模存在的证据，为实现拓扑量子计算机非阿贝尔统计提供了坚实的实验基础。【Nature 633, 71-76 (2024)】。

而实验室近几年引进的优秀青年学者则为我校凝聚态物理学科的发展带来了新的动力。近年来，陈国瑞副教授、李昕昕副教授、史志文教授以第一或通讯作者在《Science》2篇、《Nature》3篇、《Nature Nanotechnology》（2篇）、《Physical Review X》、《Advanced Materials》等顶尖期刊上发表多篇重要论文。其中，2024年度三位中青年学术骨干关于石墨烯研究的成果分别发表在《Science》和《Nature》上（【Science 384, 414-419 (2024)】、【Nature 628, 758-764 (2024)】、【Nature 631, 300-306 (2024)】）。史志文教授2022年新增国家重点研发计划课题“超薄半导体的多维度极限分辨表征”；李昕昕副教授2022年承担了国家重点研发计划青年项目“极端条件下二维半导体莫尔超晶格中的量子物态调控”。陈国瑞副教授、李昕昕副教授2024年分别新增基金委原创探索项目。他们从事的低维材料与器件、近场光学、二维材料的摩尔超晶格强关联物理等研究已成为我校凝聚态物理学科新的学术增长点。

可以看到，“人工结构及量子调控”教育部重点实验室的建设支撑了上海交通大学凝聚态物理国家重点学科的发展，有力地推动了与我校理论物理、材料物理、物理化学等学科的交叉与合作，建立并发展了量子计算、量子材料等新兴学科，为我校物理学一级学科几年来的快速发展做了重要贡献。2022年，上海交通大学物理学入选国家“双一流”学科建设。2023年，上海交通大学物理学首次入选ESI 1%学科（内地高校共5个）。2024年11月11日，高等教育评价专业机构软科正式发布2024“软科世界一流学科排名”，上海交通大学物理学排名全球32名，在我国内地高校排名仅次于清华大学、北京大学和中国科技大学，位居第四位。

2、科教融合推动教学发展

简要介绍实验室人员承担依托单位教学任务情况，主要包括开设主讲课程、编写教材、教改项目、教学成果等，以及将本领域前沿研究情况、实验室科研成果转化为教学资源的情况。

本实验室的教学工作坚持传授知识、培养能力、提高素质协调发展，着力提高学生的学习能力、实践能力和创新能力。实验室在我校教学中的作用，主要体现在教学团队和研究型物理实验课程建设两个方面。

实验室教学团队包括一批长江学者、杰青、“海外优青”在内的具有国际化视野的高水平人才队伍。所有 60 岁以下教授均担任了本科生、研究生基础课程或主要专业课程的主讲教师；共 5 位教授、副教授担任教学为主岗位；新进以科研为主的中青年教师，也必须承担本科生、研究生的培养工作。本年度，共有 19 位教师担任本科教学工作，开设 15 门课程，授课 2511 学时；14 位教师担任研究生教学工作，开设 13 门研究生专业课，授课 684 学时；13 位教师被列入上海交通大学致远学院物理学师资队伍。

在实验室学术带头人开设的课程中，不仅有基础理论知识课程如《高等量子力学》《高等电动力学》，还有专门介绍凝聚态学科前沿热点、最新成果的《表面与低维物理》、《计算材料物理》、《凝聚态物理前沿课题介绍》等专题课程；针对不同的学生类型，部分课程采用双语教学或者全英语授课。本年度指导 14 人完成本科生毕业设计，指导大学生创新实践项目 6 项。董兵教授获上海交通大学教书育人三等奖；陈国瑞副教授当选上海交通大学“十佳班主任”。吕智国副教授、潘葳副教授主持国家级教学项目 2 项，参与 1 项。刘世勇副教授的《数学物理方程》课程入选上海高校市级一流本科课程，董兵教授的《原子物理》课程获上海高校市级重点课程立项。本年度潘葳副教授继 2023 年后再次以通讯作者指导本科生在《欧洲物理杂志》上发表教学研究论文【*Eur. J. Phys.* **45**, 035305 (2024)】，《欧洲物理杂志》是国际公认的物理教学研究高水平期刊之一，也是为数不多的被 SCI 收录的教学研究高水平期刊之一。

课程建设方面，针对本实验室的特点，实验室完成了《研究型系列物理专业实验课程》的建设，该课程曾获得上海交通大学教学成果一等奖，课程师资中有 7 名实验室固定人员，郑茂俊教授为课程负责人。课程的设立有效推进了前沿科研与物理专业实验深度融合，实现了科研反哺教学，突破了一直以来高精尖一流

科研设备只能用于研究生培养而不能服务于本科教学的瓶颈或现象,使本科生真正分享和受益实验室一流师资和一流科研平台的建设成果。该课程依托实验室平台,建立了内容涵盖凝聚态物理学科领域完善的、具有鲜明特色的国际一流研究型课程体系。新设实验与科研紧密联系,例如:依托国际先进的低维物理和界面工程实验室、拥有从带材制备到检测分析等一整套先进设备的高温超导实验室、自主搭建的在物理层面上真正实现的空间超分辨近场显微光学实验室和凝聚态光谱与光电子物理实验室等开设的研究型系列物理专业实验,均为国际前沿热点研究领域,真正做到物理专业实验教学和科研紧密结合。让本科生接触到目前热门、前沿的研究课题,接触大型精密科学仪器,拓宽了学生视野,激发了学生探究前沿科学问题的兴趣,取得很好的教学效果。

在教学实践中,实验室教师积极探索并建立以问题和课题为核心的教学模式,鼓励学生开展课外科技、实验和创新实践活动,积极参与到前沿学术研究中。本年度指导1名本科生获国家自然科学基金青年学生基础研究项目(本科生)立项;指导本科生参加第十届全国大学生物理实验竞赛(创新),获讲课类一等奖1项、三等奖1项;命题类三等奖1项;指导本科生参加第九届上海市大学生物理学术竞赛,获二等奖2项。培养研究生团队获首届能源电子产业创新大赛太阳能光伏赛道优秀奖;培养研究生获“国家奖学金”等各类奖励20人次。

3、人才培养

(1) 人才培养总体情况

简述实验室人才培养的代表性举措和效果,包括跨学科、跨院系的人才交流和培养,与国内、国际科研机构或企业联合培养创新人才等。

党的二十大报告中指出:“加快建设教育强国、科技强国、人才强国,坚持为党育人、为国育才,全面提高人才自主培养质量,着力造就拔尖创新人才”。本实验室自创立之初便将造就卓越创新人才作为核心目标,以“知识探究、能力建设、人格养成”三位一体为理念,形成了有自身特色的人才培养模式。近几年,在研究生教学改革、研究生成果评价等方面进一步采取创新举措。主要包括:

1、坚持“少而精”的教学模式,培养精英型科技人才

实验室将研究生的培养目标定位为物理学基础学科培养一批精英型人才。因此,长期以来坚持“少而精”的教学模式。由一批热爱教育事业、学术造诣深厚、

具有国际视野的导师,对有志于攀登世界科学高峰的优秀学生予以精心的专门指导。要求研究生不仅应具有扎实的科学文化知识、精良的专业技能、高尚的道德情操、健康的身体及心理素质,而且应该具有适应科学技术不断发展、解决实际问题的能力及创新能力。在导师的全心投入和重点指导下,实验室培养了一批掌握本领域坚实的基础理论和宽广的专门知识,掌握解决实际问题的先进方法和现代技术手段,了解本专业的国内外现状和发展方向,勇于在学术前沿深入探索的优秀研究生代表。本年度,研究生以第一作者在 Nature、Science、Nature Physics、Nature Nanotechnology、Phys. Rev. Lett.等顶尖学术期刊上发表一批高水平论文,已成为实验室科研工作的中坚力量。2024 年度,徐晨航、姜若诗等 6 位博士研究生毕业后赴斯坦福大学、剑桥大学等国际知名科研机构继续博士后研究。涂世豪等 3 名硕士研究生毕业后赴威斯康星大学-麦迪逊分校、北京大学继续攻读博士学位。

2、注重应用型人才培养

科技服务国民经济,加快科研成果转化,是实现创新驱动发展战略的核心路径,也是构建现代化经济体系的关键支撑。科研成果的转化与应用离不开技术、应用型人才的培养。实验室根据部分研究方向与产业化应用紧密结合的特色,有针对性对部分学生制定了特殊的研究生培养方案,要求高年级硕士研究生和博士生在结束基础理论课程后,必须有一半时间深入企业了解研究领域的产业化流程与标准,了解行业发展的瓶颈,并且在实验室获得的研究成果必须经过企业的中试生产线的验证。这样的举措,使得科研成果更加贴近产业化应用,更加符合企业需求,能更好的服务于国民经济。

实验室主任、国内光伏科学与技术领域著名学者沈文忠教授长期以来把科研工作的目光聚焦于新型太阳能电池的应用基础研究,以是否具有产业化应用前景,是否有利于企业产业升级作为研究生科研工作的重要评价标准。本年度,博士生马胜、贺礼、李婉、伍桃隼,博士后丁东、杜大学等在江苏微导纳米、国晟科技、中来股份等知名企业生产第一线完成大部分科研工作。相关 7 篇产学研合作成论文发表在 Nature Communications、Solar RRL、Sol. Energy Mater Sol. Cells 等领域内顶尖期刊上。团队研发的相关核心技术,支持了国晟科技开展高效异质结太阳能电池的大规模生产。形成了一套非晶硅/晶体硅异质结 (SHJ) 太阳能电池的产业化技术路线,大面积 (182mm×91mm) 电池转换效率超过 26%。钙钛矿/晶硅叠层太阳能电池效率达 28.5%。在产学研合作研发的过程中,在企业研发一线的研究生,逐步成长为高科技企业的技术骨干和研发核心。本年度,高超、娄硕等 17 名研

研究生毕业后进入安徽华晟、长江存储等企业担任技术负责人或主任工程师，成为行业急需的应用型高层次人才。

3、加快研究生教学改革，完善研究生成果评价

近年来，实验室所属上海交通大学物理与天文学院对研究生采取“双向选择、宽进严出”的培养方式，根据不同学生类型，采用不同培养方案。增加博士生中期考核（资格考试），所有博士生在入校两年后，必须参加《量子力学》、《电动力学》、《固体物理和高等凝聚态物理》等专业课程的书面考试（根据研究方向选取其中 1-2 门）；2019 年起，博士生入学后第一年不确定导师，第二年可参考第一年的研究兴趣、个人特点、课题组氛围来确定研究方向。博士生导师也可根据学生的工作态度、实际能力等选取合适的博士生。这些举措，有助于提升研究生专业素养，同时也对研究生导师提出了更高要求。

创新人才的培养是研究型大学研究生培养目标。为鼓励研究生选择具有一定风险性的学科前沿领域课题或对国家经济建设、科技进步和社会发展具有重要意义的课题，在论文数量、影响因子等毕业条件或指标上进行弱化。增加了开题报告、中期考核、学位论文评审等中间过程，对研究生培养质量做监督。对在基础前沿研究领域做出重要贡献的研究生，放宽其申请学位的要求。对硕士研究生，不做论文发表要求。将参与实验室大型装置安装调试、专利申请等纳入研究生期间工作考察范围。这些举措，缓解了研究生的毕业压力，使其能安心科研，对领域内重要课题进行深入探索。

此外，对成果转化及产学研项目等做出重要贡献的研究生给予企业奖学金。2024 年度马胜、苏弘桢获得“微导奖学金”（5 万元/人/年），李琳、谢宇烽分获“欧普泰”一、二等奖学金。杨英等三人获“优睿谱奖学金”。

4、建立具有国际化视角的教学科研一体化教师队伍，坚持以人为本教育理念

依托单位上海交通大学正在朝着“双一流”大学的建设目标迈进，实验室以此为契机，近年来在吸引和培养高水平中青年科研人员方面取得长足进步。实验室 51 名固定人员中，有 34 人拥有超过一年的海外高水平科研机构工作、学习的经历；新引进的年轻人员均具有世界一流大学博士学位和学术工作经历，在学科前沿领域开展创新性研究，取得重要的研究成果，具有很强的学术潜力，研究工作至少达到了世界一流大学助理教授水平。以“海外优青”计划为主的海外归国青年学者已经在实验室承担越来越重要的研究工作，成为实验室科研工作可持续

发展的重要保障。本年度，引进姚元、陈维炯、谭恒心副教授入选“海外优青”，培养马杰教授入选“长江学者”，王世勇、蔡子分别晋升为特聘教授和长聘教授。目前实验室有中科院院士和“千人计划”3人，国家“万人计划”2人，“长江学者”“杰青”8人；“青年千人”、“海外优青”18人。构建起“战略科学家领衔-中青年骨干担纲-青年后备支撑”的建制化科研团队体系，形成多层次人才矩阵。

实验室骨干人员既是一名科研工作者也是人民教师，承担科研和教学两项基本工作。如何把科研和教学两项任务有机的结合起来，建立一支既具备高水平的科研能力，又具备良好的教学能力的教学科研一体化教师队伍，是实验室人才培养的关键。实验室根据各位教师的特点制定不同的分工，取长补短，互相合作。并关注每位教师个体的发展，将教师个人特长、利益目标和实验室整体利益目标相结合。在实验室运行费使用上，不用论文、专利、“帽子”等指标作为分配依据，鼓励富有创造力的年轻学者带领学生自由开展探索性与风险性强的基础研究，重在“选人不选项目”。保障并促进科研人员按照科研需求和规律潜心探索科学世界有空间有时间静心坐“冷板凳”。实验室近年来重点资助的青年学术骨干李昕昕、陈国瑞团队，2024年均新增国家自然科学基金委原创探索项目，并在《Nature》《Science》上发表重要研究成果。2024年，陈国瑞副教授荣获“中国新锐科技人物卓越影响奖”，李昕昕副教授荣获第一届“睿远青年科技奖”。

(2) 研究生代表性成果（列举不超过 3 项）

简述研究生在实验室平台的锻炼中，取得的代表性科研成果，包括高水平论文发表、国际学术会议大会发言、挑战杯获奖、国际竞赛获奖等。

在研究生培养过程中，实验室十分重视学生的创新能力、独立工作能力的培养，始终坚持高标准、严要求，并制定了规范的研究生管理条例和学术论文发表条例。研究生已成为实验室科研工作的中坚力量，其中年度优秀研究生代表有：

1、博士研究生娄硕，导师为史志文教授，研究方向为碳纳米材料。博士期间以一作和共一身份发表包括《Nature》和《Nano Letters》在内的高水平学术论文共 5 篇，申请发明专利 4 项。曾获中国物理学会 2022 秋季学术会议优秀张贴报告奖、上海交通大学凝聚态物理研究生学术大会优秀报告奖、思源奖学金。在 2024 年光子与电磁学研究国际研讨会（PIERS 2024）上做口头报告。

2、陈国瑞副教授指导博士生沙亚婷、郑健、刘凯 2024 年以共同第一作者在《Science》上发表论文。刘凯和郑健 2024 年还以共同第一作者在《Nature Nanotechnology》上发表论文一篇。刘凯、沙亚婷获得 2024 年博士研究生国家奖学金

3、李昕昕教授指导的博士生李楚善以第一作者在《Nature》上发表论文，并获得 2024 年博士研究生国家奖学金。

(3) 研究生参加国际会议情况（列举 5 项以内）

序号	参加会议形式	学生姓名	硕士/博士	参加会议名称及会议主办方	导师
1	口头报告	娄 硕	博士	2024 光子与电磁学研究国际研讨会 (PIERS 2024) / 国际电磁科学院 (The Electromagnetics Academy)	史志文
2	张贴海报	杜大学	博士后	第十二届国际光伏晶体硅研讨会 (CSSC-12) / 浙江大学	沈文忠
3	张贴海报	黄环佩	博士	第十二届国际光伏晶体硅研讨会 (CSSC-12) / 浙江大学	沈文忠
4	参会	李 婉 张德钊 苏弘桢	博士	“钙钛矿和有机挂光伏-从研究到产业化” 国际学术会议/南京大学及《自然》、《自然-能源》、《自然-材料》、《自然-通讯》杂志	沈文忠
5	参会	崔舒新 周雨松	硕士	“钙钛矿和有机挂光伏-从研究到产业化” 国际学术会议/南京大学及《自然》、《自然-能源》、《自然-材料》、《自然-通讯》杂志	沈文忠

五、开放交流与运行管理

1、开放交流

(1) 开放课题设置情况

简述实验室在本年度内设置开放课题概况。

实验室于 2012 年通过教育部验收以后，遵循《教育部重点实验室建设与运行管理办法》的规定，充分开放运行，建立访问学者制度，设立开放课题，吸引优秀人才开展合作研究。2013 年度开始设立实验室开放课题。在实验室网站公开接受课题申请。

实验室的开放课题特别面向国内优秀的年轻学者，希望能支持高风险、高潜力的前沿研究，孵化原始创新成果，推动学科边界拓展。同时也为青年科研人员加快科研启动提供帮助。通过验收以来至 2024 年底，经学术委员会审核通过或推荐，已为国内青年学者设立开放课题 23 项，其中 2013 年度 4 项，2014 年度 1 项，2016 年度 4 项，2018 年 2 项（延长资助 1 项），2019 年度 2 项（延长资助 1 项），2020 年 6 项，2022 年 4 项，资助经费共 92 万元，课题执行期为两年。在这些开放课题的资助下，2013-2023 年度共发表了包括 Phys. Rev. Lett.、Nanoscale 等在内的 48 篇高水平 SCI 论文。

2024 年度，实验室在研开放课题 4 项，名单见下表。分别资助了来自复旦大学、浙江大学、华南理工大学和深圳技术大学的四位年轻申请者。2024 年度，在研开放课题已发表标注实验室名称的 SCI 论文 2 篇，均标注实验室名称。2025 年，实验室拟增开放课题 3 项，金额共 12 万元，目前已进行课题征集。

开放课题的设立，为实验室与国内各单位学者间创造了学术接触、交流和讨论的良好环境。有利于引入外部优秀人才、创新思路和技术手段，弥补自身短板，提升研究水平。并有效提升了实验室在领域内的影响力和知名度。

实验室开放课题列表:

序号	课题名称	经费额度	承担人	职称	承担人单位	起止时间
1	新型二维材料的制备和物态研究	4万	阮威	青年研究员	复旦大学	2022.12-2024.11
2	基于转角 TMD 异质结中层间激子的关联物态研究	4万	汤衍浩	教授	浙江大学	2022.12-2024.11
3	二维人工量子结构莫尔有序态的探测与调控	4万	谢弘超	教授	华南理工大学	2022.12-2024.11
4	分子束外延薄膜及块体剥离薄片(Bi, Sb) ₂ Te ₃ 器件的光电性质	4万	李慧	副教授	深圳技术大学	2022.12-2024.11

(2) 主办或承办大型学术会议情况

序号	会议名称	主办单位名称	会议主席	召开时间地点	参加人数	类别
1	2024 第二十届中国太阳级硅及光伏发电研讨会 (20 th CSPV)	半导体量子结构与量子过程调控团队 (上海交通大学太阳能研究所)、中国可再生能源学会、浙江大学、中山大学、	石定寰 朱俊生 沈文忠 (副主席、秘书长)	2024.11.20-23 深圳	1200	全国
2	城市分布式光伏和BIPV技术应用研讨会暨 2024 年上海市太阳能学会学术年会	半导体量子结构与量子过程调控团队 (上海交通大学太阳能研究所)	代彦军 沈文忠	2024.7.26 上海	150	行业研讨会
3	SJTU 凝聚态物理暑期学校	人工材料物性的计算研究与结构设计团队	许霄琰 姚元	2024.7.15-21 上海	100	暑期学校

(3) 国内外学术交流与合作情况

请列出实验室在本年度内参加国内外学术交流与合作的概况,包括与国外研究机构共建实验室、承担重大国际合作项目或机构建设、参与国际重大科研计划、在国际重要学术会议做特邀报告的情况。请按国内合作与国际合作分类填写。

2024 年度,实验室积极开展与国内外科研机构的合作与交流,取得了一批实质性的合作成果。

本年度,国际交流方面,继续邀请 2003 年诺贝尔物理学奖获得者、著名物理学家 Anthony J. Leggett 教授担任兼职教授。实验室在研国际合作项目 1 项:国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”港澳台科技创新合作重点专项(负责人:陈鹏副教授)。贾金锋教授担任期刊《Quantum Frontiers》执行主编,另有 24 人次担任国际期刊副主编/编委;国际学术机构任职 4 人。2024 年新增史志文教授任《Materials Futuresr》青年编委,陈鹏副教授任《Surface Review and Letters》客座编委,李昕昕副教授任中国物理学会期刊青年编委。马杰、陈国瑞、李昕昕等青年教师与麻省理工学院、加州大学伯克利分校、美国橡树岭实验室、美国杜克大学等十余家海外科研机构继续保持密切合作,在量子自旋液体表征、转角二维半导体新奇量子物性研究、石墨烯纳米带等领域进行合作研究,取得重要成果。在实验室 2024 年度代表性工作中,实验室为主发表的以下论文:《Nature》3 篇、《Science》1 篇、Nature 子刊 6 篇,均有国外合作者参与。此外,贾金锋院士团队与荷兰乌德勒支大学 Cristiane Morais Smith 教授团队在《Nature Physics》上发表研究论文,对凝聚态体系中分形材料的电子态进行了细致研究,首次揭示了自组装的分形 Bi 薄膜中拓扑态的存在【Nature Physics 20, 1421-1428 (2024)】,在这项工作中贾金锋院士为共同通讯作者。

国内交流方面,实验室组织大型全国性学术会议一次(第二届中国太阳级硅及光伏发电研讨会);组织行业研讨会一次(城市分布式光伏和 BIPV 技术应用研讨会暨 2024 上海市太阳能学会年会);组织暑期学校一次(上海交通大学首届凝聚态物理暑期学校)。组织学术讲座 50 场,固定人员参加学术会议 36 人次,其中作邀请报告 19 人次;贾金锋院士受邀担任第三届 CCF 量子计算大会指导委员会委员;沈文忠教授受邀担任中国光伏行业协会咨询顾问、第七届中国国际光伏与储能产业大会组委会学术委员会副主席。开放课题在研项目 4 项,2024 年度共发表 SCI 论文 2 篇,均标注实验单位。表面和界面量子现象与调控团队加入建设沈阳材料科学国家研究中心量子材料联合研究分部。实验室骨干团队继续参与南京大学牵头教育部“2011 计划”——“人工微结构科学与技术协同创新中心(CICAM)”项目的科研工作。沈文忠教授为上海高校 IV 类高峰学科

—能源科学与技术中的高效太阳能电池技术团队负责人。2024年，贾金锋院士领衔组建国家自然科学基金委基础科学研究中心（基金委卓越创新群体：拓扑量子计算的基础科学问题）。

(4) 科学传播

简述实验室本年度在科学传播方面的举措和效果。

作为依托高等院校的科研单位，实验室不仅肩负科研与教学。两项重要任务，也承担着进行科学传播的社会责任。本年度实验室的科学传播主要体现为面向青少年、面向大学生、面向公众三方面，举措与成果如下：

面向青少年

- 1、2024年4月26日，贾金锋院士为奉贤区曙光中学师生作了题为《神奇的量子世界》的科普讲座。这是上海市科协和上海市教委联合主办的“大师课堂”活动的一部分。“大师课堂”活动以邀请“两院”院士、科学家做专题讲座或报告会的形式巡讲各区中小学校，与学生面对面互动，让青少年得以接触到前沿的科技知识和技术，拓宽他们的视野，增强创新意识和创造力，鼓励青少年树立科学梦想。

面向大学生

- 2、2024年11月8日，人工结构及量子调控教育部重点实验室举行了2024年度的实验室开放日活动。开放日活动共接待了上海电力大学数理学院80余名大二、大三本科生。本次开放日活动分科普报告和实验室现场参观两部分。实验室主任沈文忠教授和刘洪研究员、优秀博士研究生李楚善分别做了科普报告，实验室高年级博士研究生并带领大学生参观实验室。

面向公众

- 3、2024年2月，沈文忠教授作为第一作者与赵一新教授、刘烽教授共同为《Frontiers in Energy》撰写新闻热点“2023年主流太阳能电池效率进展”，第一时间总结了晶硅、钙钛矿和有机三种主流太阳能电池的认证效率进展，分析了相关结构、材料、工艺等方面的支撑作用，同时给出了下一步发展展望。
- 4、沈文忠教授2024年度受邀参加光伏行业研讨会、论坛做邀请报告或对话嘉宾10余次。通过对话访谈、学术前沿报告等助力行业新技术的推广和发展。2024年12月3日，备受瞩目的“向新而行BC共生”BC领袖对话正式播出。对话由中国绿色供应链联盟光伏专委会秘书长吕芳主持，隆基绿能科技股份有限公司董事长钟宝申、上海爱旭新能源股份有限公司董事长陈刚和沈文忠教授共论BC的技术优势、市场潜力与协同发展，引起业界巨大反响。

2、运行管理

(1) 学术委员会成员

序号	姓名	性别	职称	年龄	所在单位	是否外籍
1	甘子钊 (主任)	男	教授 (院士)	86	北京大学	否
2	沈学础 (副主任)	男	教授 (院士)	86	复旦大学	否
3	薛其坤 (副主任)	男	教授 (院士)	61	南方科技大学	否
4	祝世宁 (副主任)	男	教授 (院士)	75	南京大学	否
5	陶瑞宝	男	教授 (院士)	87	复旦大学	否
6	孙昌璞	男	教授 (院士)	62	北京计算科学研究中心	否
7	闻海虎	男	教授	61	南京大学	否
8	陆 卫	男	研究员	62	中科院上海技术物理研究所	否
9	陈 鸿	男	教授	64	同济大学	否
10	张文清	男	研究员	58	南方科技大学	否
11	雷啸霖	男	教授 (院士)	86	上海交通大学	否
12	郑 杭	男	教授	73	上海交通大学	否
13	马红孺	男	教授	64	上海交通大学	否
14	沈文忠	男	教授	56	上海交通大学	否

(2) 学术委员会工作情况

请简要介绍本年度召开的学术委员会情况，包括召开时间、地点、出席人员、缺席人员，以及会议纪要。

按《教育部重点实验室建设与运行管理办法》的要求，实验室成立了由十四位知名学者组成的学术委员会，指导实验室的学术方向，评估实验室的研究成果，审议实验室的重大学术活动和年度工作计划。实验室同时制定了《人工结构及量子调控教育部重点实验室学术委员会工作条例》，对学术委员会的组成和相关职能进行规范。

实验室通过验收以来每年均举行学术委员会会议或举行通讯评议。为了完整的对年度工作进行梳理后向学术委员会汇报，每年的学术委员会会议或通讯评议均在次年度的4-5月份举行，2024年度的学术委员会计划于2025年5月举行。

我们本年度通过通讯评议的方式向学术委员会介绍实验室的年度工作进展，请学术委员予以评议。我们的评议评审材料寄出后，收到了14位学术委员中的10位委员的反馈。学术委员会对实验室2023年度的工作高度评价，均给予实验室“优秀”评价。

学术委员沈学础院士评价：“实验室在2023年度在科研成果、人才培养、对外开放等方面都取得十分优秀甚至可以说是杰出的成果或进展”。

学术委员陆卫研究员评价：“总体来说，实验室已经在科学研究和技术开发上取得了诸多显著成果，未来通过加强产学研系统性的合作，有望在国际科学前沿领域继续发挥重要影响力。”

学术委员陶瑞宝院士评价：“在培养人才上，对研究生坚持“少而精”的教学模式、以培养精英型科技人才为目标、产学研结合，取得了明显的效果，去年有8篇在相关专业领域的顶尖的期刊上发表。此外，2023年实验室在国内外学术交流和合作、科学普及、实验室开放等方面也做得很好。”

学术委员陈鸿教授评价：“特别值得指出的是，实验室将基础科研工作与国家重要产业发展需求有机结合，形成了一支在国内有重要影响的学术团队。”

学术委员马红孺教授评价“实验室在多年稳定发展的基础上，继续保持在这方面取得优异成绩……对于我国和上海市凝聚态物理的发展做出了显著贡献。”

学术委员雷啸霖院士评价“在承担重大任务、发表高水平论文、培养创新人才等方面都取得突出成绩，表现优秀”。

2023年度国家最高科学技术奖获得者，学术委员薛其坤院士也给予实验室“优秀”的评价。

以下为学术委员孙昌璞院士的评审意见：



《人工结构及量子调控教育部重点实验室 2023 年度报告》

学术委员评价

(请提出宝贵意见和建议)

人工结构及量子调控教育部重点实验室自建设以来,从国家高新技术需求和学科前沿的有机结合点出发,取得了显著的基础科学研究进展和产业化应用成果。2023 年度,实验室在学术成果和产业应用方面成效突出。实验室根据国家需求和科学前沿,有针对性地开展研究,着力解决拓扑绝缘体相关量子现象、半导体量子器件物理和高温超导电性机理等领域的关键科学问题,这有助于提升在相关领域的科技影响力。实验室注重学术团队的高质量建设,对长期发展具有重要意义。在学科发展、人才培养方面也采取了一些创新举措,并形成了自己的特色。

实验室应当紧密跟随国家战略需求和科学前沿的最新动态,持续优化和调整研究方向,以确保研究内容与国家发展需求紧密结合。为此,实验室应采取多维度的科技评价体制,不仅要注重科研成果的数量和质量,还要考虑其对国家发展和社会进步的实际贡献。通过综合评价研究的创新性、实际应用价值和社会影响力,确保科研工作始终围绕国家重大战略任务和科学前沿问题展开,推动科技成果的转化和应用,为国家的经济、科技和社会发展提供强有力的支撑。

签名: 孙昌璞

日期: 2024.6.5

(请将本页扫描或拍照通过邮件发送至 zzjiang@sjtu.edu.cn)

(3) 主管部门和依托单位支持情况

简述主管部门和依托单位本年度为实验室提供实验室建设和基本运行经费、相对集中的科研场所和仪器设备等条件保障的情况，在学科建设、人才引进、团队建设、研究生培养指标、自主选题研究等方面给予优先支持的情况。

本实验室是依托单位上海交通大学校内注册的独立实验室，在实验室用房、设备管理、人员编制等方面独立统计，并给予专职管理人员名额。上海交通大学每年为实验室划拨每年至少 100 万元的基本运行经费（具体额度由考核结果而定），2024 年度实验室实际获拨运行费 200 万元。运行费由实验室主任负责，专款专用，保证了实验室正常运转。同时，近年来，学校已投入“985”新一轮学科建设经费、青年教师启动经费、人才计划配套、教育部“中央高校改善基本办学条件经费项目”、高峰学科建设等超过 5500 万元经费为实验室新引进的海外青年人才提供科研启动经费。利用这些投入，实验室近五年吸引国家级海外青年人才 11 人，搭建起了新的具有国际领先水平的材料生长及测试平台，这些青年学者的引进和科研平台的建立，不仅拓展了实验室的研究方向，也为实验室的可持续发展奠定扎实的基础。

上海交通大学为实验室提供的办公、科研用房总面积超过 3600 平米下设计算凝聚态物理实验室、凝聚态光谱与光电子物理实验室、高温超导带材实验室、表面和界面量子现象与调控实验室以及太阳能研究所等，此外，2020 年起，学校投入超过 4000 万元，建立院级微纳加工和测试平台，面积约 500 平。该平台本着“院内优先、全校共享、对外开放”的原则，安排专门实验师和工程师维护大型精密的加工测试设备，并提供测试服务，大大提升了科研效率。

实验室的建设运行中，关系到实验室发展大局的中长期规划通常由学术委员会及实验室主任、学术带头人共同讨论制定，依托单位配合实施。上海交通大学在人才引进、团队建设、研究生培养指标、自主选题研究等方面给予了充分的支持。依托单位在管理上给予的自主权及优先权，为实验室更好的凝练研究方向，完善学科结构提供了良好的条件。

上海交通大学十分重视对创新基地的培育和考核等基地建设过程管理。学校每年组织专家集中对校内各省部级重点实验室进行考核，并将考核结果与实验室运行经费挂钩，促进了校内各实验室间的良性竞争。截至 2024 年，本实验室通过验收后，在历年校内评估中多次获评“优秀”。

3、仪器设备

简述本年度实验室大型仪器设备的使用、开放共享情况，研制新设备和升级改造旧设备等方面的情况。

截至 2024 年底，本实验室固定资产总额超过 1.8 亿元，包括 50 万元以上的大型设备 53 台（套），总价值 13042 万元。实验室大型仪器设备均设专职管理员，负责重大仪器设备的登记、使用与维护。在所制定的《人工结构及量子调控教育部重点实验室管理条例》中，对实验室的设备购置、大型仪器设备使用与维护做出明确规范。实验室仪器设备在优先满足本实验室科学研究、教学实验需求的前提下，面向社会、开放使用，以提高使用效率。实验室所属物理与天文学院上线院级设备共享平台，实验室总计 28 台高精设备纳入线上平台，实现校内外设备共享。

为提高设备使用效能，集中解决教育部重点实验室、凝聚态物理研究所乃至上海交通大学物理与天文学院和兄弟学院各课题组的微纳测试及加工需求，实验室副主任钱冬教授 2020 年负责筹建了院级微纳加工和测试平台。该平台计划总投资超 4000 万元，建设有百级超净间，总面积约 500 平方米。设备包括场发射扫描电镜、X 射线衍射仪、光学显微镜、光学浮区炉、等离子体清洗机等。2024 年度新增电子束曝光系统、等离子体刻蚀系统、热蒸发&电子束蒸镀设备、综合物性测量系统(PPMS)等设备。截止 2024 年底，平台已经基本完成设备采购和安装调试，固定资产总额约 3500 万元。本年度为全校十几个院所提供测试服务，并向社会相关科研机构与企业公开开放，提供相关项目合作与微纳加工服务，年测试费收入 170 余万元。

2024 年 7 月，国际知名学术刊物《PNAS》在线刊登了东南大学物理学院苗霖团队、董帅团队与实验室钱冬课题组合作的研究论文【PNAS 121, e2321193121 (2024)】。揭示了金属绝缘相变起源于受温度调控的自旋态转变的物理机制，该研究为理解量子材料的金属绝缘相变，进一步利用开发相关的量子技术奠定了科学基础。微纳加工和测试平台专职工程师王国华为论文共同第一作者，钱冬教授为论文共同通讯作者。本工作所涉及的单晶样品制备以及变温电阻测量均在微纳加工和测试平台完成。

本年度实验室以下多项年度代表性工作中涉及的器件微纳加工部分均在微纳加工和测试平台完成：超高质量石墨烯纳米带助力碳基纳米电子学【Nature

628, 758-764 (2024)】、首次在天然单晶石墨烯中实现了量子反常霍尔效应【Science 384, 414-419 (2024)】、首次在单晶石墨烯中观测到电子掺杂情况的超导电性【Nature 631, 300-306 (2024)】。

可以看到，先进设备平台及创新性测试技术，是实验物理基础研究方向持续取得突破性进展的关键和基础。而统一的微纳加工平台模式可集中优势资源，避免重复建设和低效投入，实现高端仪器设备、核心工艺技术与专业队伍的集约化共享。通过支撑前沿基础研究、关键共性技术攻关，微纳加工和测试平台显著提升了实验室服务国家重大前沿科研任务的能力。

3、实验室安全

说明实验室当年是否发生安全事故,如有需要填报详细信息,包括伤亡人数、经济损失、事故原因以及是否属于责任事故等。

全面实施实验室、课题组、安全员等分级安全责任制,并对实验室流动人员实行准入制,将实验室安全责任落实到实验室每个人。

2024 年度未发生安全事故。

六、审核意见

1、实验室负责人意见

实验室承诺所填内容属实，数据准确可靠。

本人承诺所填写内容属实，数据准确可靠。

数据审核人：蒋震宗

实验室主任：沈文忠

(单位公章)

2025年2月28日

2、依托高校意见

依托单位年度考核意见：

(需明确是否通过本年度考核，并提及下一步对实验室的支持。)

依托单位负责人签字：

(单位公章)

年 月 日

附：年度代表性成果一

1.成果名称：超高质量石墨烯纳米带助力碳基纳米电子学

2.成果类型：基础研究

3.主要表现形式：学术论文

4.成果介绍：

尽管目前已经发展了多种制备石墨烯纳米带的方法，但在可用于半导体器件的高质量石墨烯纳米带的制备问题一直没有解决。特别地，已制备出的石墨烯纳米带的载流子迁移率均远低于理论值。为了提高低维材料器件性能，人们尝试了多种方法来减少环境无序效应。迄今为止最成功的方法是六方氮化硼（hBN）封装法。然而，已有的机械封装法效率很低，目前仅能用于科研领域，难以满足未来先进微电子产业发展的需要。针对以上挑战，史志文教授团队开发出一种全新的制备方法，实现了石墨烯纳米带在 hBN 层间的嵌入式生长，形成“原位封装”的石墨烯纳米带。

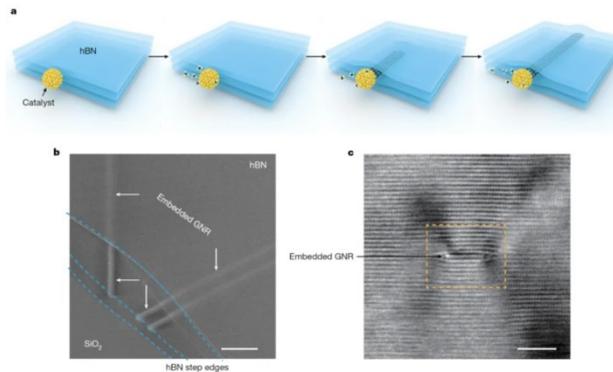


图 1：石墨烯纳米带层间嵌入式生长的示意图和电子显微镜表征

层间石墨烯纳米带的生长是通过一种纳米颗粒催化的化学气相沉积（CVD）实现的。实验中，催化剂纳米颗粒会在高温作用下运动并附着在 hBN 的边缘和台阶处。在这里，甲烷分子会在催化剂表面裂解出碳原子，随后这些碳原子会溶解到纳米颗粒中。当纳米颗粒中的碳含量过饱和后，纳米带会在颗粒表面形核同时嵌入 hBN 的层间。扫描透射电子显微镜（STEM）截面图像表明，镶嵌在 hBN 层间的纳米带宽度为 3-5 纳米，对应的能隙大小约为 0.2~0.6 eV。

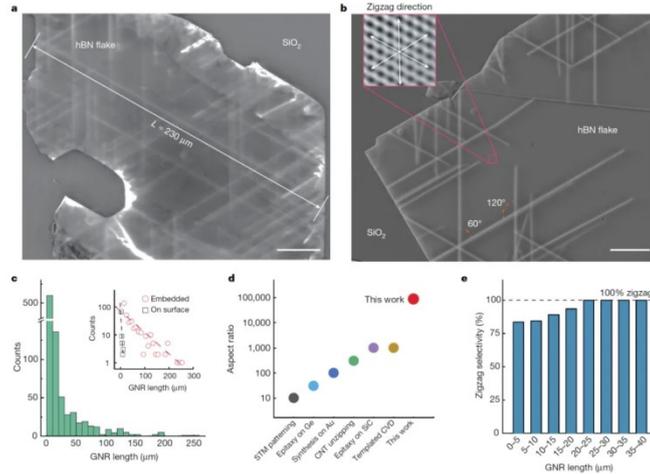


图 2：手性统一的超长石墨烯纳米带

在层间生长的石墨烯纳米带长度可达亚毫米量级，远大于以往报道的结果。结合其亚 5 纳米的宽度，层间纳米带的长宽比达到了 105，比以往的结果大至少两个数量级。更重要的是，层间纳米带的具有统一的 zigzag 手性结构。统计结果表明，zigzag 纳米带的纯度随长度上升，且长度在 20 微米以上的纳米带全部为 zigzag 手性。理论上 zigzag 纳米带边缘存在自旋极化拓扑边缘态，对自旋电子学和自旋量子计算器件具有潜在的应用前景。史志文教授团队与合作者还研究了六方氮化硼层间超长 zigzag 石墨烯纳米带的生长机理，发现层间超长 zigzag 纳米带的形成是 hBN 层间超润滑特性（近零摩擦损耗）的结果。

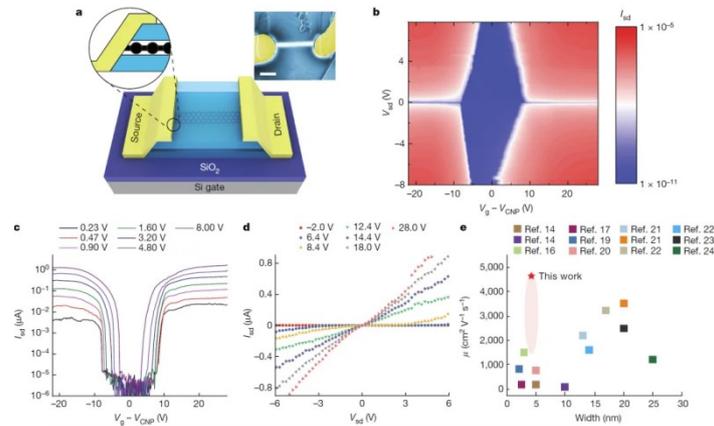


图 3：基于原位封装石墨烯纳米带的高性能场效应晶体管

由于所生长的石墨烯纳米带被绝缘 hBN“原位封装”，所以理论上可获得极高性能纳米带电子器件。研究人员基于层间生长的纳米带制备了场效应晶体管（FET）器件，测量结果表明，石墨烯纳米带 FETs 都表现出典型的半导体器件的电学输运特性，室温下的开关比可达 10⁶。器件的载流子迁移率高达 4600 cm²V⁻¹s⁻¹，超越以往报道的结果。这些出色的性能表明层间石墨烯纳米带有望在未来的高性能碳基纳米电子器件中扮演重要的角色。本研究预计将对碳基纳米电子学领域产生重要影响。【Nature 628, 758-764 (2024)】

年度代表性成果二

1.成果名称：首次在天然单晶石墨烯中实现了量子反常霍尔效应

2.成果类型：基础研究

3.主要表现形式：学术论文

4.成果介绍：

石墨晶体由单层石墨烯以密堆积的形式一层层堆垛而成。由于石墨烯晶格的对称性，存在三个堆垛位置，命名为 A、B、C 位。因此，多层石墨烯具有多种不同的堆垛方式，例如三层具有 ABA 和 ABC 两种堆垛方式，四层具有 ABAB、ABCA 和 ABCB 三种堆垛方式。其中，ABCA 堆垛形式又被称为菱方堆垛，是一类理论上具有电子平带和强关联的特殊堆垛石墨烯。天然石墨晶体中存在不同堆垛方式的石墨烯，其中菱方堆垛的石墨烯以亚稳态形式广泛存在。

陈国瑞课题组前期开发了一套独具特色的针对高质量菱方堆垛石墨烯的器件制备和表征方法，并成功在 ABCA 四层石墨烯中观测到由于强关联效应导致的多个自发磁性物态，包括层间反铁磁绝缘态、准自旋极化金属态等【Nature Nanotechnology 19, 188-195, 2024】。基于前期工作，团队成员创新性的将菱方石墨烯与另外一种二维材料——二硒化钨（WSe₂）结合在一起，从而将 WSe₂ 中的自旋轨道耦合成功引入到石墨烯中，进而带来了拓扑的性质。结合菱方石墨烯本身具备的自发磁性，使得实现量子反常霍尔效应的两个条件，拓扑与磁性，同时存在于石墨烯中。

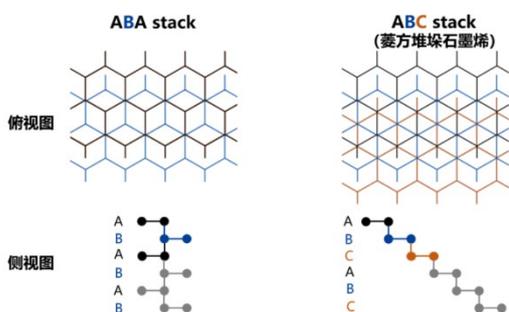


图 1

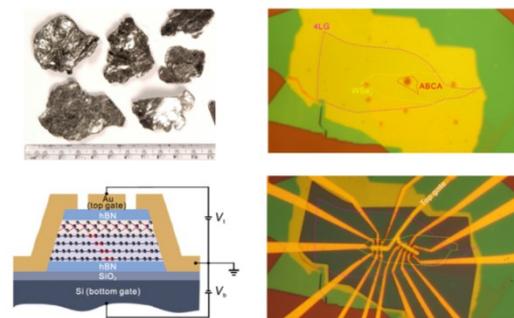


图 2

图 1：天然石墨晶体中的 ABA 和 ABC 两种堆垛方式示意图

图 2：实验中用到的天然石墨晶体和四层菱方石墨烯原型器件的示意图

实验上，课题组利用常见的透明胶带，将天然石墨晶体减薄到几个原子层厚度，并利用自主搭建的扫描近场红外显微镜，在特定厚度的四层石墨烯中，找到存在菱方堆垛结构的区域。进而，利用原子力显微镜针尖当作“纳米剪刀”，将菱方堆垛区域的石墨烯“裁剪”出来，将其与 WSe_2 一起封装到二维绝缘体 hBN 中间，使得结构得以稳定存在。最后，利用微纳加工的方法，将菱方石墨烯制备成场效应管原型器件，并对样品进行低温电输运的测量。

在电输运测量中，团队发现，由于极强的电子相互作用，通过对垂直电场的调控，石墨烯会连续展现出具备不同磁性的绝缘态。在电场为零的时候，石墨烯展现出层间反铁磁绝缘态，即上下表面的电子以自旋相反的方式自发有序排列；在电场较大的时候，石墨烯表现为层间极化绝缘态，即所有电子被电场极化到一个表面；而当电场处于以上两个绝缘态中间值的时候，没有 WSe_2 的样品展现出半金属行为，而有 WSe_2 的样品展现出了非常大的霍尔信号，并伴随有电滞回线。这意味着 WSe_2 成功地将自旋轨道耦合引入到石墨烯中。

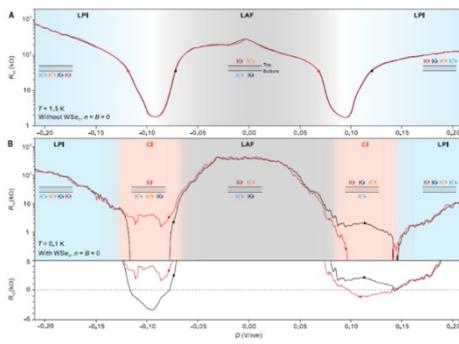


图 3

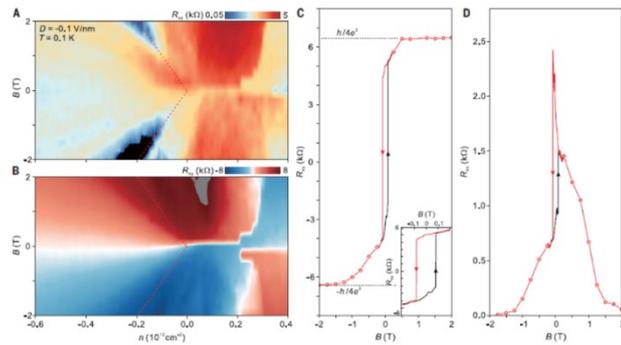


图 4

图 3: 四层菱方石墨烯中不同磁性绝缘态的电场调控

图 4: 四层菱方石墨烯陈绝缘态和量子反常霍尔效应

进一步，通过对中间电场态的深入测量，团队发现菱方石墨烯此时展现出了磁滞回线这一典型的铁磁行为，并且在零磁场下有非常大的霍尔信号。通过施加磁场，团队最终证实，这个中间态是陈绝缘态，展现出量子反常霍尔效应。有趣的是，这个系统的陈数（表征拓扑序的指标）为 4，与石墨烯的层数相等，且理论上，更厚的石墨烯的陈数应始终与层数相等，这是目前实验上发现的最大陈数的体系。同时，团队还发现，石墨烯的铁磁性不仅可以被磁场调控，还可以被电场和载流子浓度调控，展现出非常丰富有趣的多重调控性。此项工作表明，尽管石墨烯结构简单且广泛存在，但却能为探索前沿的拓扑物态和研究拓扑相变开辟新的道路。并可以大大降低研究拓扑物理和未来多通道拓扑量子计算的门槛和成本。【**Science 384, 414-419 (2024)**】

年度代表性成果三

1.成果名称：首次在单晶石墨烯中观测到电子掺杂情况的超导电性

2.成果类型：基础研究

3.主要表现形式：学术论文

4.成果介绍：

李昕昕团队通过优化样品制备方法，成功制备出高质量双层石墨烯与二硒化钨异质结样品，使得可以对其施加高达 1.6 V/nm 的垂直位移电场。通过开展系统的极低温量子输运测量，结合电场调控和静电掺杂调控，他们揭示了该系统中空穴掺杂超导随位移电场和载流子浓度变化的完整相图；更为重要的是，实验上在电子掺杂的情况也观察到超导态，这是在单晶石墨烯中首次观察到电子掺杂的超导电性。空穴端和电子端的超导态强度都可以通过外加的垂直位移电场进行有效调节，实验上测量到的最高超导转变温度分别约为 450 mK 和 300 mK，这也是目前在单晶石墨烯系统中观察到超导转变温度的最高记录。

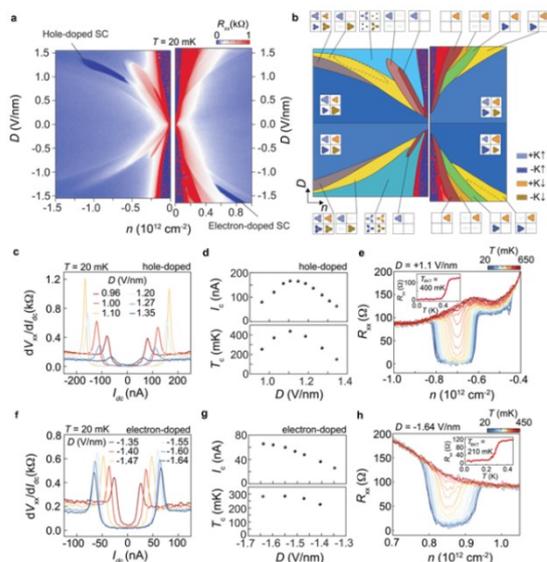


图 1

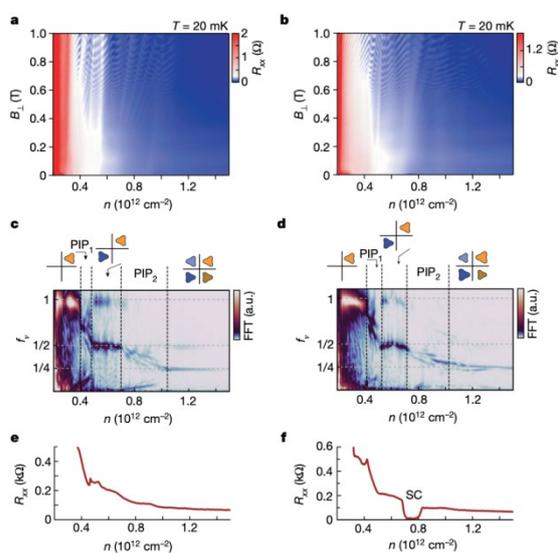


图 2

图 1：实验揭示的双层石墨烯与二硒化钨异质结系统的相图，以及观察到的空穴和电子掺杂情况的超导态

图 2：在外加高垂直位移电场下，Bernal 堆叠双层石墨烯电子端量子振荡及费米面分析

通过测量高质量石墨烯样品的纵向电阻随垂直磁场的量子振荡（简称 SdH 振

荡)，可以得到有关能带费米面的重要信息，这对于理解体系中由于电子关联相互作用导致的自发对称性破缺态，以及超导配对机制等都具有重要的意义。该研究工作详细测量了在不同位移电场下，低磁场区间空穴掺杂和电子掺杂时的 SdH 振荡。分析结果表明，在较高的位移电场下，双层石墨烯在空穴掺杂和电子掺杂时均出现了一系列自发对称性破缺态，这些态的出现与能带的范霍夫奇点以及电子-电子相互作用相联系。特别地，当施加电场使得双层石墨烯中的电子或空穴靠近二硒化钨层时，SdH 振荡的频率发生了进一步的变化，这是因为当电子和空穴靠近二硒化钨层时，感受到了明显的自旋轨道耦合作用，从而导致电子态的简并度和费米面的结构发生变化。实验结果表明，空穴掺杂和电子掺杂的超导的正常态均对应于费米面为部分极化的情况。

最后，研究团队详细对比了双层石墨烯中电子掺杂超导和空穴掺杂超导的性质。出乎意料的是，在选取的超导转变温度，超导临界垂直磁场等超导性质类似的情况下，空穴掺杂超导和电子掺杂超导展现了截然不同的平行磁场依赖性。具体而言，空穴掺杂的超导态违反了泡利顺磁极限，而电子掺杂的超导性却始终遵循泡利顺磁极限。之前的研究工作认为，二硒化钨对石墨烯系统超导态的增强效果可以通过近邻效应引入的 Ising 自旋轨道耦合相互作用的角度来理解，而超过泡利顺磁极限的空穴掺杂超导是 Ising 自旋轨道耦合相互作用的直接结果。而在此项工作中，尽管通过费米面分析在导带中也观测到明显的 Ising 自旋-轨道耦合相互作用，但电子掺杂的超导电性却没有违反泡利顺磁极限。这一观察预示着二硒化钨对双层石墨烯中超导的增强效果可能不仅仅来自于近邻效应引入的 Ising 自旋轨道耦合相互作用。

这一研究工作突显了在高位移电场下双层石墨烯系统中涌现的丰富量子物态，其中很多现象和性质还值得进一步的理论和实验研究。该工作不仅为理解单晶石墨烯乃至魔角石墨烯的超导机理提供了重要的实验信息和约束，而且为基于稳态结构的单晶石墨烯设计和制造新型超导量子器件奠定了坚实基础。【Nature 631, 300-306 (2024)】

年度代表性成果四

1.成果名称：首次发现多重 Majorana 零能模存在的证据

2.成果类型：基础研究

3.主要表现形式：学术论文

4.成果介绍：

贾金锋院士、李耀义副教授团队从 2017 年以来长期研究拓扑晶体绝缘体的拓扑超导电性。在前期研究中，他们利用分子束外延技术制备出原子级平整的拓扑晶体绝缘体 $\text{Sn}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Te}$ 与超导体 Pb 形成的侧向和纵向异质结，并且利用扫描隧道显微镜发现这些异质结具有极强的超导近邻效应【*Adv. Mater.* **31**, 1905582 (2019)】，以及由拓扑表面态引起的反常超导能隙特征【*Phys. Rev. Lett.* **125**, 136802 (2020)】。随后，他们利用分子束外延技术不仅制备出大面积原子级平整的 Pb 薄膜，还在 Pb 薄膜上又外延生长出大面积原子级平整的单晶 SnTe 薄膜，并通过改变界面粗糙度抑制钉扎效应从而实现了拓扑晶体绝缘体费米能级的显著调节【*Sci. China- Phys. Mech. Astron.* **67**, 286811 (2024)】。

在本工作中，他们系统地研究了 SnTe/Pb 异质结的磁通涡旋中零能峰（图 1）对磁场的响应情况。在垂直磁场下，SnTe 薄膜厚度在十几纳米以上时，磁通涡旋中才能形成零能峰（图 2）。得益于异质结极强的超导近邻效应，SnTe 薄膜厚度即使有几十纳米，在薄膜表面探测到的零能峰的特征依然非常明显，而且在表面可以延伸 100 纳米的距离而不发生劈裂（图 2e）。

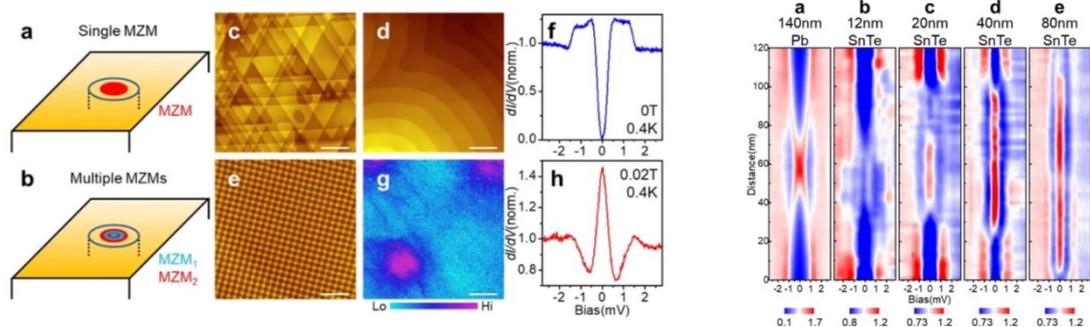


图 1: SnTe/Pb 异质结形貌和超导电性的测量 图 2: 垂直磁场下不同厚度的 SnTe 薄膜中磁通束缚态的空间分布

上面的实验表明该体系中可能存在 Majorana 零能模，但是怎么才能证明这些磁通中含有受对称性保护的多重 Majorana 零能模呢？他们巧妙地利用倾斜磁

场来破坏晶体对称性，并观察零能峰对磁场的响应。他们发现当倾斜磁场方向和 SnTe 镜面不平行时，磁通涡旋中的零能峰的空间分布呈现明显不对称的劈裂特征。即使倾斜磁场方向和(010)型镜面平行，零能峰依然呈现出不对称的劈裂特征（图 3a-c）。但值得注意的是，当倾斜磁场方向和(1-10)型镜面平行时(理论预言 Mojarana 零能模受该镜面保护，倾斜磁场和该镜面平行时不破坏这个镜面对称性)，零能峰却不发生劈裂（图 3d-f）。只要磁场方向不和(1-10)型镜面平行，不用很强的磁场就能使零能峰产生明显的不对称劈裂，而当磁场方向和(1-10)型镜面平行时，即使加较强磁场，零能峰也不会发生劈裂。大量的实验测量和大规模数值模拟对比证明，SnTe(001)表面的超导电性由 SnTe(001)拓扑表面态主导，磁通中零能峰的这种各向异性的磁场响应是受镜面对称性保护的多重 Majorana 零能模的独有特征，无法用普通束缚态或者单个 Majorana 零能模来解释。

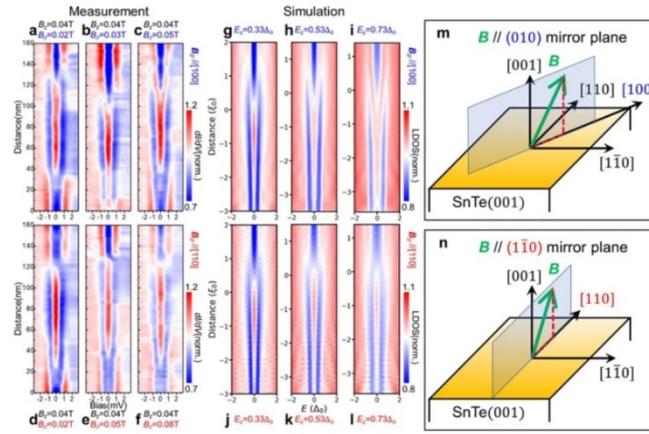


图 3：倾斜磁场下 SnTe 薄膜中磁通束缚态的空间分布

以前实验报道的 Majorana 零能模都是空间分离的，要想 Majorana 零能模之间发生相互作用，需要改变纳米线的长度或者磁通之间的距离，因此，探测 Majorana 零能模相互作用的特征非常困难。而在本工作中，在单个磁通里就存在多个 Majorana 零能模，只用改变磁场的方向，就可以使磁通内的多个 Majorana 零能模发生相互作用，比空间分离的 Majorana 零能模的体系更容易进行相互作用的调控。另外，与空间分离的单个 Majorana 零能模不同，多重 Majorana 零能模意味着粒子和反粒子可以在对称性的保护下共存于同一区域而不发生湮灭，它们之间是否相互作用由对称性是否被破坏来决定，是固体物理中准粒子涌现出的新的量子特性，这种特性没有实物粒子相对应而且无法用实物粒子来复刻。该工作不仅从晶体对称性的角度首次发现多重 Majorana 零能模存在的证据，还为控制 Majorana 零能模之间的相互作用开辟了新的方法，并且拓展了 Majorana 零能模的类型以用于拓扑超导态的调控和新型拓扑量子比特的构造。【Nature 633, 71-76 (2024)】