

申报编号：2023-212092

第三批国家级一流本科课程申报书

(虚拟仿真实验教学课程)

课程名称：二维体系中磁电阻量子振荡
和量子霍尔效应虚拟仿真实验

专业类代码：0702

负责人：夏庆林

联系电话：13873120583

申报学校：中南大学

填表日期：2024. 01. 27

推荐单位：中南大学

中华人民共和国教育部制

二〇二三年十一月

填报说明

1.专业类代码指《普通高等学校本科专业目录（2022）》中的专业类代码（四位数字）。

2.文中○为单选；□可多选。

3.团队主要成员除主讲教师外，可以包含一位确实发挥重要支持作用的技术人员，并在“承担任务”栏中说明属于技术人员。

4.文本中的中外文名词第一次出现时，要写清全称和缩写，再次出现时可以使用缩写。

5.具有防伪标识的申报书及申报材料由推荐单位打印留存备查，国家级评审以网络提交的电子版为准。

6.涉密课程或不能公开个人信息的涉密人员不得参与申报。

1. 基本情况

实验名称	二维体系中磁电阻量子振荡和量子霍尔效应虚拟仿真实验		是否曾被推荐	○是●否	
实验负责人	夏庆林				
负责人所在单位	中南大学				
是否国家级一流本科专业建设点	●是○否	(如是) 专业名称	应用物理学	专业代码	070202
实验所属课程 (可填多个)	近代物理实验、固体物理、半导体物理、功能材料				
性质	●独立实验课 ○课程实验				
实验对应专业	应用物理学				
实验类型	○基础练习型 ○综合设计型 ●研究探索型 ○其他				
虚拟仿真必要性	<input checked="" type="checkbox"/> 高危或极端环境 <input checked="" type="checkbox"/> 高成本、高消耗 <input checked="" type="checkbox"/> 不可逆操作 <input checked="" type="checkbox"/> 大型综合训练				
实验语言	●中文 ○中文+外文字幕(语种) ○外文(语种)				
实验已开设期次	共 5 次: 1. 2020-03-01 ~ 2020-06-30、40 人 2. 2020-09-01 ~ 2020-12-31、31 人 3. 2021-03-01 ~ 2021-06-30、363 人 4. 2022-03-01 ~ 2022-06-30、227 人 5. 2023-03-01 ~ 2023-06-30、291 人				
有效链接网址	(要求填写标准 URL 格式的实验入口网页, 不允许仅为文件下载链接) https://quant2d.csu.edu.cn				

2. 课程团队情况

2-1 课程团队主要成员（序号 1 为课程负责人，总人数限 5 人以内）								
序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	手机号码	电子邮箱	承担任务
1	夏庆林	1973.03	中南大学	无	教授	13873120583	qlxia@csu.edu.cn	项目负责
2	马松山	1971.11	中南大学	副主任	副教授	13548632868	songshan@csu.edu.cn	整体规划
3	敬玉梅	1990.08	中南大学	无	副教授	18670039867	yumeijing@csu.edu.cn	实验设计
4	熊小努	1986.09	中南大学	副所长	特聘教授	18652383350	xnxiong@csu.edu.cn	仿真设计
5	陈智慧	1989.08	中南大学	无	讲师	15546396979	czh_nlo@csu.edu.cn	实验指导

2-2 团队主要成员教学情况（限 500 字以内）

(近 5 年来承担该实验教学任务情况, 以及负责人开展教学研究、学术研究、获得教学奖励的情况)

1. 近 5 年来承担该实验教学任务情况

团队成员承担大学物理、近代物理及物理类虚拟仿真实验的教学。夏庆林、敬玉梅和熊小努老师为原湖南省虚拟仿真实验一流课程(HNXN2020108, 主要成员: 欧阳方平、何军、夏庆林、敬玉梅、熊小努)核心成员, 一直承担本课程教学工作。

2. 负责人开展教学研究、学术研究、获得教学奖励的情况

夏庆林，男，博士，教授，博士生导师。湖南师范大学学士、硕士，中南大学博士，中科院半导体所博士后，加州大学伯克利分校访问学者，粉末冶金国家重点实验室固定成员。从事虚拟仿真、科教融合教学研究，讲授大学物理实验、近代物理实验、固体物理学等课程，国家级精品资源共享课“固体物理学”主讲教师，主持/参与省级、校级教改项目 5 项，发表教研论文 2 篇，作为副主编参编《近代物理实验》教材。从事新型二维材料磁性、输运特性研究，主持国家/省部级科研项目 10 余项，在 *Nature*, *Advanced Materials* 等学术期刊发表 SCI 论文 50 多篇。成果荣膺 2021 年度中国半导体十大研究进展。曾获省部级科技进步奖 1 项，获批软著 1 项，参编专著《石墨烯-从基础到应用》。

3. 实验描述

3-1 实验简介（实验的必要性及实用性，教学设计的合理性，实验系统的先进性）

习近平总书记在就量子科技研究和应用前景主持的中共中央政治局第二十四次集体学习时强调：“量子力学是人类探究微观世界的重大成果。量子科技发展具有重大科学意义和战略价值，是一项对传统技术体系产生冲击、进行重构的重大颠覆性技术创新，将引领新一轮科技革命和产业变革方向。要充分认识推动量子科技发展的重要性和紧迫性，加强量子科技发展战略谋划和系统布局，把握大趋势，下好先手棋。”二十大报告也指出，要推进科教融汇，加强基础学科、新兴学科、交叉学科建设；加快实施创新驱动发展战略，坚持面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求、面向人民生命健康，加快实现高水平科技自立自强。

量子效应一直是凝聚态物理领域研究关注的重点。二维材料体系的发现为研究量子效应、量子调控及其应用提供了丰富而理想的材料平台。二维体系中的 Dirac 半金属态、量子限制效应、磁电阻量子振荡、量子霍尔效应、本征和/或可控的铁磁性、超导电性、量子反常霍尔效应等涉及基础科学、纳米原型器件及应用等多层次的创新研究。如在足够强的磁场和足够低的温度下，实验测量得到的量子霍尔效应、量子反常霍尔效应霍尔平台处的霍尔电阻值可准确地为 25812.80Ω ，严格地等于 h/e^2 ，现已经被采用为电阻的新标准。量子霍尔效应只有边缘电流，在电子学中可以实现低功耗器件；量子霍尔效应在量子计算中可用来构造稳定的量子比特和量子门，为量子计算的实际应用提供可能；量子霍尔效应研究可以更好地理解和探索拓扑绝缘体的性质，为新型拓扑量子计算器件的设计和制备提供理论指导。对量子效应的研究具有重要的理论和实际意义。

磁电阻量子振荡、量子霍尔效应等量子效应是《固体物理学》、《半导体物理》、《功能材料》、《近代物理实验》等物理类主干课程的重要内容。开展有关量子效应的实验教学，对学生深刻理解凝聚态体系中量子现象的物理本质具有重要意义。但限于条件，本科专业往往很难开设出涉及微纳加工、低温强场下的高精度测量实验。本项目借助虚拟仿真技术，基于极端条件下的微纳测试平台和电子束光刻等大型高端设备，构建“二维体系量子效应虚拟仿真”

平台，以解决实验周期长、成本高、无法面向学生大规模开放的问题。

3-2 实验教学目标（实验后应该达到的知识、能力水平）

本项目依托我校国家级“物质结构与物性测量”虚拟仿真实验教学中心，结合学科特色，项目选题源自团队老师关于二维体系量子输运的科研成果（黑砷：Nature 2021, 593, 56-60）和凝聚态物理研究前沿成果（石墨烯：Nature 2005, 438, 197-200 & Nature 2005, 438, 201-204; 黑磷：Nature Nanotechnology 2016, 11, 593-597; Te 烯：Nano Letters 2018, 18, 5760-5767 & Nature Nanotechnology 2020, 15, 585-591; InSe: Nature Nanotechnology 2017, 12, 223-227; Bi₂O₂Se: Nature Nanotechnology 2017, 12, 530-534 & Nature Materials 2023, 22, 832-837）。通过本实验，使学生提高在极端条件下开展复杂测量的实验技能，培养其科研思维和创新能力，并达到以下目的：

- 1、熟悉获得低温、强磁场等极端条件的实验方法；
- 2、熟悉微纳器件加工技术和方法；
- 3、理解磁电阻、霍尔电阻等的物理本质；
- 4、掌握极低温、强磁场等极端条件下微纳器件物性参数（磁电阻、霍尔电阻）测试方法；
- 5、理解磁电阻量子振荡和量子霍尔效应的物理规律，导出载流子浓度、迁移率、有效质量、朗道能级指数、载流子寿命、朗德 g-因子等。

3-3 实验课时

- （1）实验所属课程课时：64 学时
- （2）该实验所占课时：4 学时

3-4 实验原理

(1) 实验原理(限 1000 字以内)

1) 霍尔效应与磁阻效应

运动的载流子在磁场中受洛伦兹力作用引起偏转，导致在垂直电流和磁场方向上产生正负电荷的聚集，形成附加的横向电场，称为霍尔效应。对通电金属或半导体施加磁场作用引起电阻的变化，称为磁阻效应。半导体中，载流子在电磁场下的运动和偏转如图 1 所示。

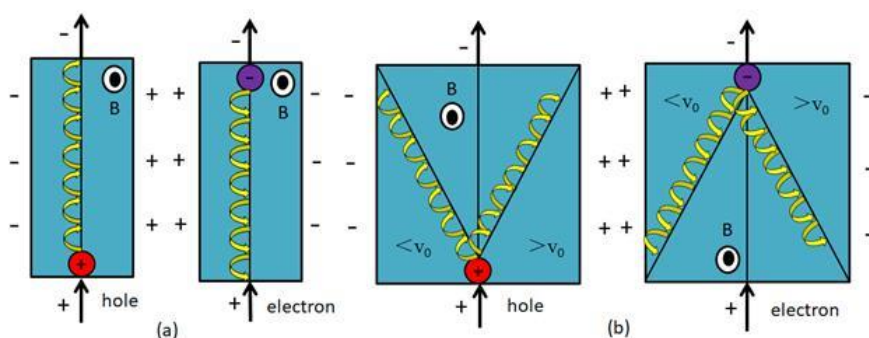


图 1 载流子在电场和磁场下的(a)运动和(b)偏转

2) 二维电子气、朗道能级量子化

三维固体中电子运动在 Z 方向受到限制，只能在 XY 平面内自由运动，称为二维电子气（2DEG）。

低温强磁场时，载流子在 XY 平面内运动呈现出量子化效应，原来连续的能带形成若干个子带，称为朗道能级，能量为：

$$E_n = \hbar^2 k_z^2 / 2m^* + (n+1/2)\hbar\omega_c \quad (1)$$

式中 $\omega_c = qB/m^*$ 是电子回旋频率，相邻朗道能级间能量相差 $\hbar\omega_c$ 。

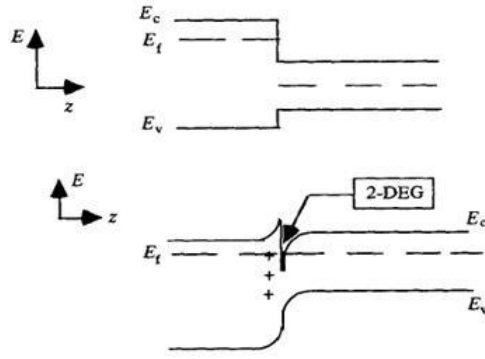


图 2 二维电子气示意图

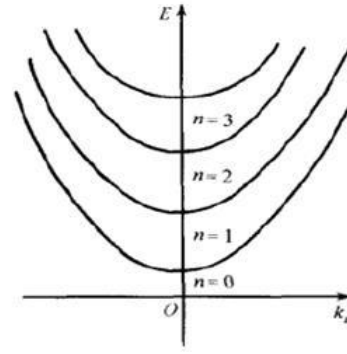


图 3 磁场中能带量子化

3) 磁电阻的 SdH 量子振荡

朗道能级的形成和能级间距随磁场线性增加，使得能级相继穿越费米面时，朗道能级就会被电子完全占据，形成电子态极大值，不断变化的磁场导致费米面电子态密度的周期性变化，在输运上表现为电阻随磁场倒数的周期性振荡，即 Shubnikov-de Haas (SdH) 振荡。量子振荡的周期和费米面的极值截面积 (S_F) 相对应

$$\Delta (1/B) = 2\pi / \hbar S_F \quad (2)$$

在此基础上，可给出描述 SdH 量子振荡的公式：

$$\rho_{xx} \propto \frac{2\pi^2 k_B T m^* / \hbar e B}{\sinh[2\pi^2 k_B T m^* / \hbar e B]} \exp(-2\pi^2 k_B T_D m^* / \hbar e B) \cos[2\pi(\frac{F}{B} + \gamma - \delta)] \quad (3)$$

由此可以得到载流子有效质量、丁格尔温度、贝利相位、载流子浓度和迁移率等。在实验中要观察到明显的 SdH 振荡，需满足一定条件：低温强磁场条件 $\hbar\omega_c > K_B T$ 、散射条件 $\omega_c \tau \gg 1$ 、量子极限条件 $E_F > \hbar\omega_c$ 。

4) 量子霍尔效应

2DEG 系统中电子在电磁场作用下的霍尔效应表现出明显的量子化性质。1980 年冯·克利青等首先在 Si 的 MOSFET 反型层中观察到了量子化霍尔效应。在 1.5K 低温、15T 强磁场下，其霍尔电阻 $\rho_{xy} = -V_H / I$ 是量子化的，随磁感应强度 B 呈台阶式变化（图 4）

$$\rho_{xy} = h/ie^2(i = 1,2,3,...) \quad (4)$$

它只与物理常数有关。此时，霍尔电压出现平台，且对应于霍尔平台， $V_p = 0$ 。

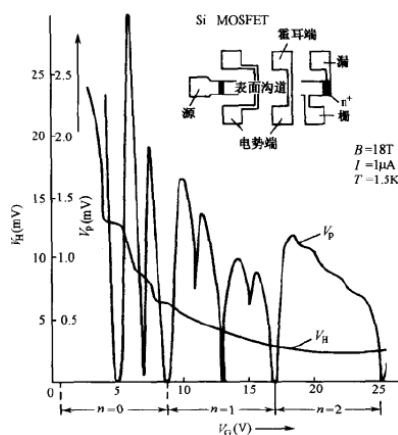


图 4 V_H 、 V_P 、 V_G 关系图

二维材料体系的发现，为研究量子效应提供了新的平台。本虚拟仿真实验模拟使用微纳器件加工系统（图 5-7）和低温、强磁场下微纳器件测试平台（图 8-9），研究二维高迁移率材料体系石墨烯、黑磷等的磁电阻 SdH 量子振荡和量子霍尔效应（图 10）。



图 5 电子束曝光系统 Raith 150 图 6 反应离子刻蚀系统 图 7 电子束蒸发镀膜系统



图 8 PPMS DynaCool



图 9 微纳器件测试系统

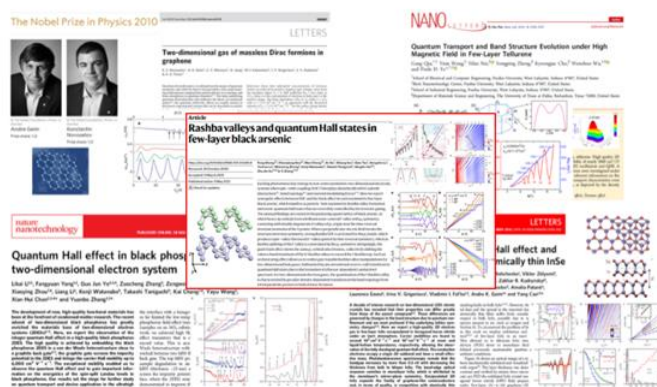


图 10 石墨烯、黑磷等高迁移率二维体系的磁电阻 SdH 量子振荡和量子霍尔效应

知识点：共 4 个

1. 霍尔效应与磁阻效应
2. 二维电子气、朗道能级量子化
3. 磁电阻的 SdH 量子振荡
4. 量子霍尔效应

(2) 核心要素仿真设计（对系统或对象的仿真模型体现的客观结构、功能及其运动规律的实验场景进行如实描述，限 500 字以内）

本虚拟仿真实验的核心要素涉及二维材料霍尔器件的微纳加工制备流程及霍尔器件的磁电阻、霍尔电阻测试，具体为二维材料霍尔器件电极曝光、电极蒸镀、器件刻蚀、霍尔器件磁电阻的 SdH 量子振荡测量、量子霍尔效应测量等。

实验选取了电子束曝光系统 Raith 150、反应离子刻蚀系统、电子束蒸发镀膜系统、综合物性测量系统 PPMS-DynaCool、微纳器件测试系统等大型仪器设备作为虚拟仿真设备原型，虚拟实验的操作流程与实物操作过程一致。

所测的样品均为凝聚态物理研究前沿文献和教师实际科研研究的样品，包

括石墨烯、黑磷、Te 烯、InSe、Bi₂O₂Se 和黑砷，有大量的实际数据，因此核心要素的测量过程与测量结果同真实的实验高度一致。仿真软件包含低温强场、电子束光刻（EBL）、微纳器件测试三个模块，由中南大学自主研究开发，为网络版，具有自主知识产权。可使用常见浏览器运行。测试样品、磁场和温度变化范围及步长、EBL 参数、霍尔器件测试中的工作电流由用户预设。

3-5 实验教学过程与实验方法

本实验具体教学过程如图 11 仿真实验流程图所示。实验室场景图如图 12。

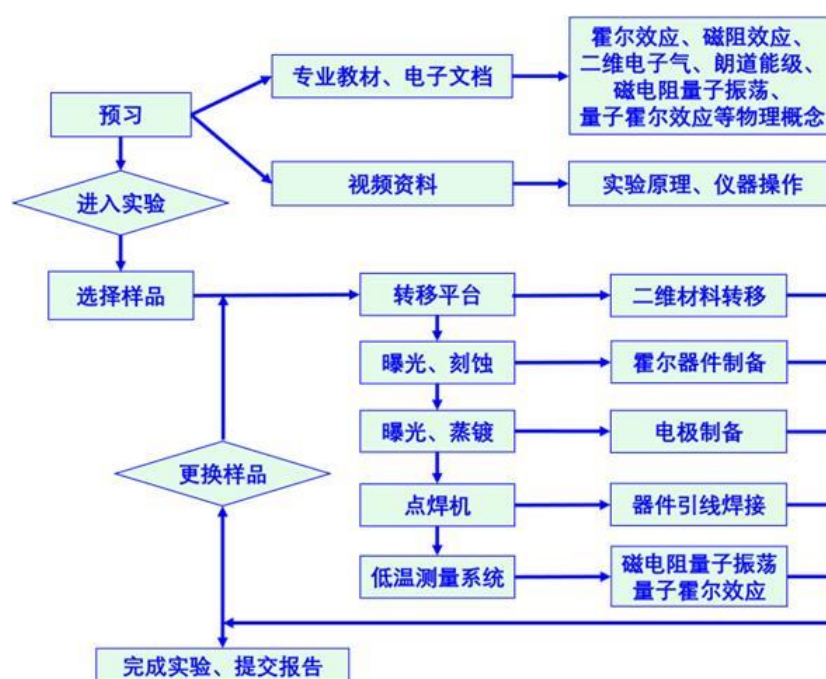


图 11 仿真实验流程图

本实验利用虚拟仿真技术，充分挖掘学院低维物理与器件、量子物理与量子调控研究团队的科研成果，以教师科研及文献资料相关数据为基础，开发了运用电子束曝光系统、反应离子刻蚀系统、电子束蒸发镀膜系统、低温强场测量系统研究二维体系量子效应的仿真实验，使这些无法对本科生开设的经济和时间成本极高的项目得以以虚拟的形式向本科生开放。本实验综合运用量子力学、固体物理、半导体物理等方面的物理原理与低温强场下的实验技术，利用高端测试设备，可实现在 50mK-室温范围内对器件的磁电阻、霍尔电阻进行测

量，实验提供多种不同性质的仿真样品供学生选择，并进行微纳器件的加工制作及器件的磁电阻 SdH 量子振荡、量子霍尔效应测试等。



图 12 仿真实验室场景

3-6 步骤要求（不少于 10 步的学生交互性操作步骤。操作步骤应反映实质性实验交互，系统加载之类的步骤不计入在内）

（1）学生交互性操作步骤，共 14 步

步骤序号	步骤目标要求	步骤合理用时	目标达成度赋分模型	步骤满分	成绩类型
1. 机械剥离二维材料	用蓝膜胶带，通过机械剥离二维材料，获得二维材料薄层。	5	用金刚石切割衬底成方形；切割蓝膜胶带，将二维材料单晶颗粒黏在胶带上；对折、粘合、撕开胶带，将材料在胶带上展开成薄片；将胶带贴合到硅片表面，轻轻按压；揭开胶带在显微镜下找到材料薄层。	5	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
2. 干法转移制备叠层 hBN/hBN/BP/h	使用 PDMS 薄片、蓝膜胶带，利用机械剥离黑磷（BP）、hBN 单晶	5	切割 PDMS 薄片成方形；切割蓝膜胶带，将黑磷单晶颗粒黏在胶带上；对折、粘合、撕开胶带，将材料在胶带上展开成薄片；将胶带样品区域对准 PDMS 上，轻轻按压；将带有样	6	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告

BN (以黑磷为例)	成薄层,通过干法转移,在二维转移平台获得hBN/BP/hBN叠层。		品的PDMS倒置按压到hBN上;在二维转移平台观察获得的hBN/BP/hBN叠层。		
3. 电极图形曝光	利用旋胶机将样品均匀旋涂上电子束光刻胶,设计好电极图形,在电子束曝光系统中曝光后显影,得到对应电极图形。	10	将样品放入旋胶机中心区域;滴上电子束光刻胶;启动旋胶机进行涂胶;将样品放置在样品盘上,装载样品盘;打开软件进样,上升高度,聚焦,测电子束流,曝光;出样,显影。	6	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
4. 电极蒸镀	样品放置在电子束蒸发镀膜系统中,选择目标金属和合适的工艺参数,进行电极蒸镀,得到对应的电极。	10	将样品圆盘放进电极蒸镀仪器中,关上门,扣紧卡扣;点击软件界面LOADLOCK自动抽气按钮;点击送样界面,点击自动送样按钮;进入工艺控制界面,点击电子束控制界面按钮3,颜色从红变绿;点击HV ON按钮,颜色从红变绿;点击画图按钮,打开速率监测软件界面;点击File,弹出UI界面;在左上角的下拉菜单中,选择pd1_0_8A;在下方的Final Thick框中输入0.05;点击START按钮,绘制曲线。	10	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
5. 光刻制备Hall bar	利用旋胶机将样品均匀旋涂上电子束光刻胶,	10	将样品放入旋胶机中心区域;滴上电子束光刻胶;启动旋胶机进行涂胶;将样品放置在样品盘上,装载样品盘;打开软件进	6	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报

刻蚀掩膜	设计好 Hall bar 刻蚀掩膜图形，在电子束曝光系统中曝光后显影，得到对应刻蚀掩膜。		样，上升高度，聚焦，测电子束流，曝光；出样，显影。		告
6. 反应离子刻蚀制备 Hall bar 结构	设置合适的工艺，在反应离子刻蚀系统中对做好掩膜的 Hall bar 图形进行刻蚀，得到 Hall bar 结构。	10	鼠标点击 LogOn 按钮登录；点击 Loadwater 按钮；点击样品进行进样操作；点击 OK 按钮，关闭舱门；点击 Download Recipe 按钮；点击 Manual Process Control 按钮；点击 Vacuum Open 按钮；点击 Clamp Off 按钮；点击 Press Iso Open 按钮；点击 Gasses Open 按钮；点击 RF Open 按钮；点击 UnLoad Water 按钮，进行出样操作。	12	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
7. 电极引线焊接	在点焊机上将 Hall bar 器件上的电极和器件样品托上对应电极连接好。	5	器件放置在点焊机上；打开点焊机电源开关；点焊机工作，自动点焊。	3	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
8. 装载器件	确定焊接好的 Hall bar 器件导通后，将器件通过样品旋转杆插入到开启的 PPMS 的低温强磁场	10	开启低温强磁场系统；器件放置到检测盒中，确认所有连线导通；器件放置到样品杆上；进入气压控制面板，点击 Vent/Seal，腔体充氦气至大气压；打开 PPMS2 顶部的装置，把样品旋转杆插入，随后将 PPMS2 顶部盖上。	10	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告

	系统中。				
9. 连接 测量 电路	利用导线将 Hall bar 器件和外接测试源表进行电路连接，为后续测试做准备。	5	打开电机柜；点击导线进行电路连接。	4	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
10. 转 移、 输出 特性 测量	确定样品在 PPMS 测试系统中导通、器件电极接触状况良好，所得转移、输出特性曲线符合预期。	5	打开测试软件，选择样品及实验条件，进行转移、输出特性测量；点击确定按钮，观察测量的曲线；点击保存按钮，将当前数据下载到本地。	6	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
11. 测量 量子 振荡 和量 子霍 尔效 应随 栅压 的演 化	选择样品及不同栅压，测量磁电阻量子振荡和量子霍尔效应随磁场变化的数据，并保持到本地磁盘。	5	选择样品及不同栅压实验条件，进行量子振荡和量子霍尔效应随磁场变化的测量；点击确定按钮，观察测量的曲线；点击保存按钮，将当前数据下载到本地。	6	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
12. 测量 量子 振荡 和量 子霍 尔效 应随 温度 的演	选择样品及不同温度，测量磁电阻量子振荡和量子霍尔效应随磁场变化的数据，并保持到本	5	选择样品及不同温度实验条件，进行量子振荡和量子霍尔效应随磁场变化的测量；点击确定按钮，观察测量的曲线；点击保存按钮，将当前数据下载到本地。	6	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告

化	地磁盘。				
13. 实验 数据 处理	利用 Origin 软件，将保存的数据进行数据处理绘制 Rxx、Rxy 随栅压、磁场、温度的演化曲线，保存好图像，对实验结果进行总结，撰写实验报告。	10	打开 Origin 软件，导入保存的数据，进行数据处理；绘制 Rxx-1/B 曲线、Rxy-B 曲线及其随栅压、温度的演化曲线；打开实验报告 word 文档，将图像保存其中；总结描述实验现象。	10	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
14. 提交 报告	将撰写好的实验报告 word 版电子文档在线提交，完成整个实验。	5	登录网站；点击上传报告按钮，上传实验报告。	10	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告

(2) 交互性步骤详细说明

合法用户登录仿真系统后，可以进行交互性操作，包含以下十四大步骤。具体如下：

步骤一、机械剥离获得二维材料薄层

(1) 用金刚石刀将带标记的衬底 (Si/SiO_2) 切割成大小合适的方形形状 (10 mm×10 mm)；

(2) 切割一段蓝膜胶带，挑取几颗二维材料单晶黏在胶带上；

(3) 对准胶带的空白区域，反复对折、黏合、撕开，直到将材料在胶带上展开成 8mm x 8 mm 区域大小的密集薄片；

(4) 将蓝膜胶带中带有样品的一端贴合到硅片表面，通常从一个边角缓慢漫过整个硅片，这个过程要缓慢，避免气泡的产生，最后用塑料头镊子轻轻按压一下；

(5) 缓慢揭开胶带，注意撕开时胶带和硅片的角度，最后在显微镜下寻找需要的二维材料薄层。（图 13）

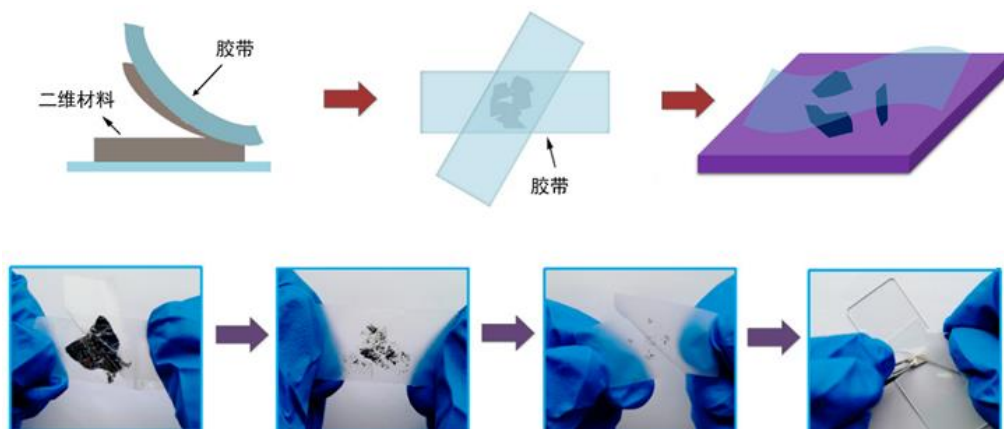


图 13 机械剥离获得的二维材料薄层

步骤二、干法转移制备异质结叠层 hBN/BP/hBN（以黑磷为例）

(1) 用刀片切割一块 8x8 mm 大小的 PDMS 薄片，用镊子夹住小心并缓慢地贴在干净载玻片上作为刚性支撑，以保持 PDMS 的平整，用薄刀片切割 PDMS 四周边角(特别是镊子夹过的地方)，并剥去保护层，最后在载玻片上获得 3x3 mm 薄片；

(2) 切割一段蓝膜胶带，挑取几颗黑磷（BP）单晶颗粒黏在胶带上，对准胶带的空白区域，反复对折、黏合、撕开，直到将材料在胶带上展开成密集薄片；

(3) 将蓝胶带有样品的区域对准 PDMS，并轻轻按压使得样品能粘在 PDMS 上，然后缓慢揭开胶带；

(4) 将载玻片（带有样品的 PDMS）倒置固定在干法转移台的微操作台上，同时，在微操作台下方固定好衬底（步骤一中做好的有 hBN 的硅片），借助视频显微系统，在 50 倍镜头下精确对准 PDMS 上的石墨烯和硅片上的 hBN

后，缓慢下压 PDMS 直到 BP 与 hBN 完全贴合，随后缓慢升起 PDMS，因为 PDMS 对 BP 的粘力弱于范德华力，这样就能使少层 BP 留在衬底上的 hBN 上；

(5) 重复步骤 (1) - (4)，继续将顶层 hBN 转移到制备好的 BP/hBN 叠层上，得到 hBN/BP/hBN 叠层。(图 14)



图 14 干法转移制备叠层 hBN/BP/hBN

步骤三、霍尔器件的电极图形曝光

(1) 利用 Raith 150II 绘图软件，根据样品形状尺寸设计 Hall 器件的电极图形；

(2) 选择合适的光刻胶（如 PMMA），设置适当的转速（如 5000 r/min 的转速），在带有 hBN/BP/hBN 叠层的衬底上旋涂一层电子束光刻胶，用 170°C 热板烘烤 3 分钟（图 15）；

(3) 将涂好电子束光刻胶的样品放入电子束曝光系统，先进行样品坐标位置的定位、校准，再设置合适的曝光参数（如曝光剂量、时间、步进等）进行电极图形曝光（图 16）；



图 15 旋涂光刻胶



图 16 准备曝光

(4) 取出曝光完的样品后，在显影液（MIBK：IP A = 1：3）中显影 90 s，用 IPA（异丙醇）清洗 30 s 去除残留的显影液，氮气吹干（图 17）。



图 17 显影定影

步骤四、电极蒸镀

- (1) 将制备好电极图形的样品放入电子束蒸发镀膜仪，抽至超高真空；
- (2) 选择需要蒸镀的第一层金属（如 Ti），先对金属预熔，设置蒸镀的速率、膜厚等参数，完成第二层金属的蒸镀；
- (3) 选择需要蒸镀的第一层金属（如 Au），先对金属预熔，设置蒸镀的速率、膜厚等参数，完成第二层金属的蒸镀，然后取出样品；
- (4) 将覆盖有金属膜的样品置于热丙酮（约 70℃）中浸泡 15 分钟以上，待 PMMA 被丙酮完全溶解后，用去离子水清洗干净，用氮气吹干，电极制备完成。（图 18）



图 18 电极蒸镀

步骤五、光刻制备 Hall Bar 刻蚀掩膜

(1) 利用 Raith 150II 绘图软件，设计 Hall bar 器件图形；

(2) 重复步骤三中的 (2) (3) (4)，在电子束光刻胶上获得 Hall bar 器件图形，作为刻蚀 Hall bar 的掩膜。(图 19)

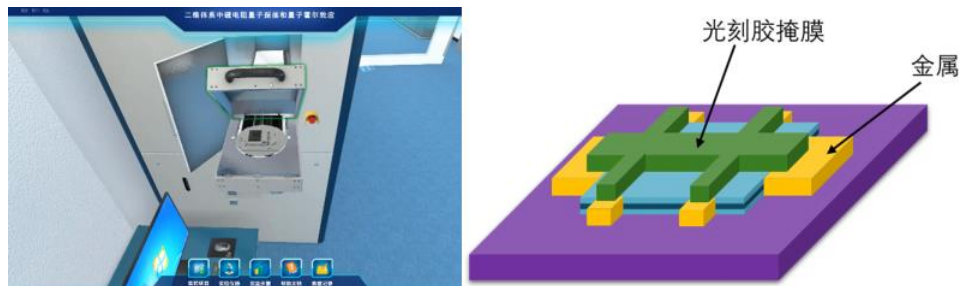


图 19 曝光

步骤六：反应离子刻蚀制备 Hall bar 结构

(1) 将带有 Hall bar 掩膜的样品放入刻蚀设备，选择刻蚀所用气体（如 Ar 或氟基气体），设置刻蚀参数（如气体流量、功率等），对样品进行刻蚀得到 Hall bar 结构；

(2) 将样品放入热丙酮去胶，用去离子水清洗干净，氮气吹干，器件制备完成。(图 20)



图 20 通过刻蚀制备的 Hall 器件示意图

步骤七、电极引线焊接

采用导电银胶把器件衬底粘到样品托上，待银胶变干牢固后，通过引线焊接（图 21）将待测器件的电极与样品托的针脚电极相连（图 22）。

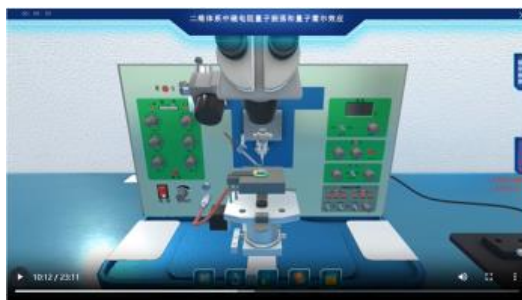


图 21 超声点焊机

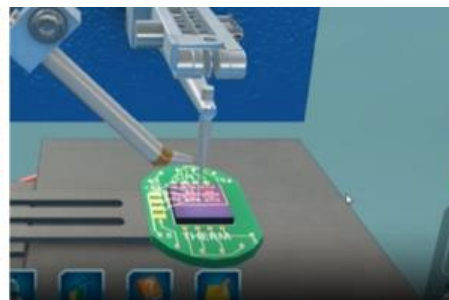


图 22 焊接好的样品托中的器件

步骤八、装载器件

- (1) 利用室温样品检测盒检测器件（图 23），确认所有连线导通；
- (2) 将样品托安装到样品杆上，通过样品杆将器件安装到低温强场系统测量位置；
- (3) 启动系统降温程序，将器件所在位置温度降到所需温度。



图 23 检测器件

步骤九、连接测量电路

从仪表库中选择所需的测量仪表，如电源表、放大器、电压表、电流表等，按照图 24 所示测量示意图连接好电路（图 25）。

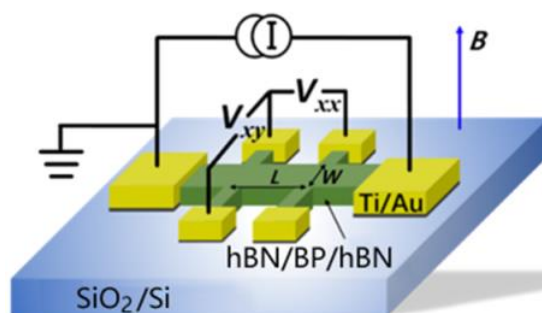


图 24 Hall bar 器件结构及测量示意图



图 25 测量电路连接

步骤十、转移、输出特性测量

(1) 在不同的栅极电压 V_g 下，扫描源漏电压 V_{DS} ，同时测量电流 I_{DS} ，绘制器件的线性 I - V 曲线随栅极电压的演化；

(2) 在不同的源漏偏压 V_{DS} 下，扫描栅压 V_g ，同时测量电流 I_{DS} ，绘制转移特性曲线 I - V_g 随源漏偏压的演化；

步骤十一、测量量子振荡和量子霍尔效应随栅极的演化

(1) 设定温度，设置背栅 $V_g=0$ V，器件源漏电极间加上 17 Hz、100 nA 的恒定交流电（根据电阻大小选择合适电流，避免电流热效应），利用锁相放大器测量器件的纵向电压 V_{xx} 和横向霍尔电压 V_{xy} ，在 -9~ 9 T（14T）范围扫描垂直方向磁场，步进为 0.01 T（根据测量的曲线精度要求可以自由调整），测得 V_{xx} -B 和 V_{xy} -B 曲线；

(2) 改变背栅 V_g ，重复步骤（1），测量不同栅压下的 V_{xx} -B 和 V_{xy} -B 曲线（图 26）。

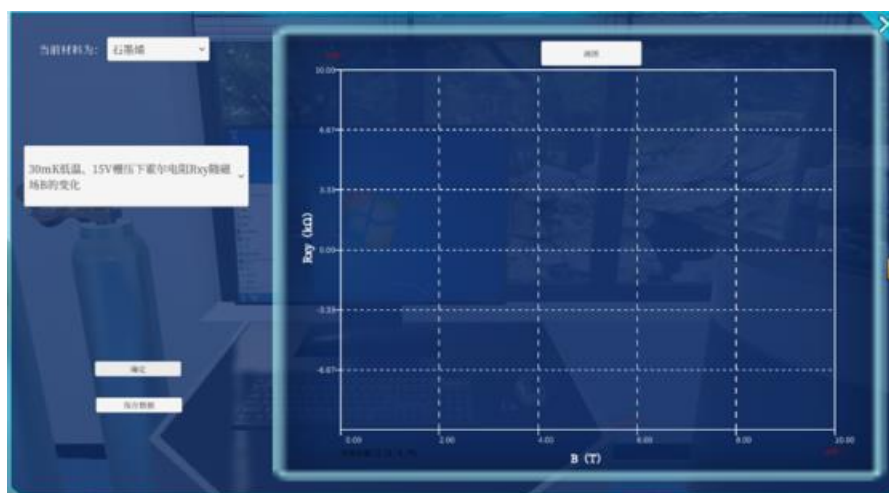


图 26 在不同栅压下测量霍尔电阻随磁场的变化

步骤十二：测量量子振荡和量子霍尔效应随温度的演化

(1) 设置背栅如 ($V_g = -2.5 \text{ V}$)，器件源漏电极间加上 17 Hz、100 nA 的恒定交流电（根据电阻大小选择合适电流，避免电流热效应），利用锁相放大器测量器件的纵向电压 V_{xx} 和横向霍尔电压 V_{xy} ，在 -9~9 T (14T) 范围扫描垂直方向磁场，步进为 0.01 T（根据测量的曲线精度要求可以自由调整），测得 V_{xx} -B 和 V_{xy} -B 曲线；

(2) 改变温度 T，重复步骤 (1)，测量不同温度下的 V_{xx} -B 和 V_{xy} -B 曲线。（图 27）

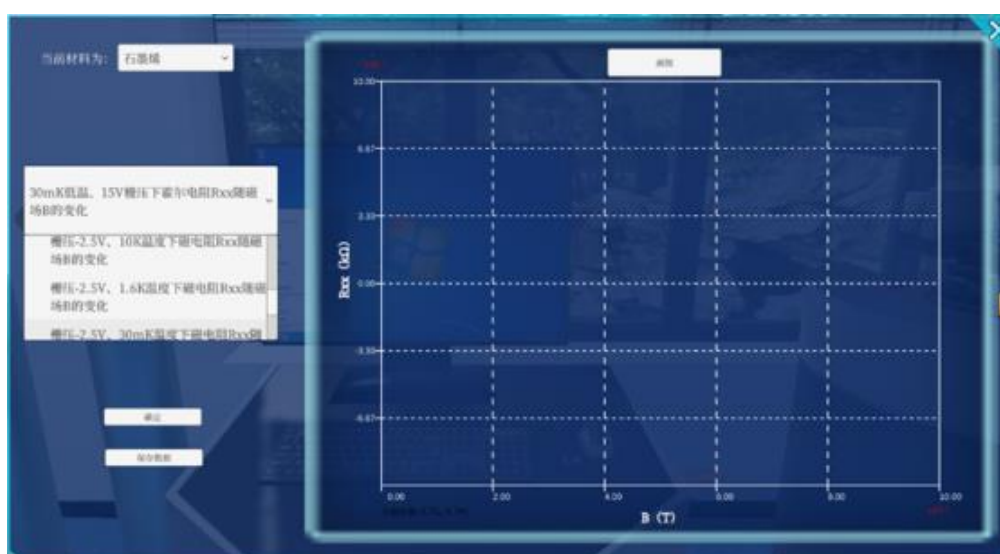


图 27 在不同温度下测量磁电阻随磁场的变化

步骤十三、数据处理

每完成一次测量，原始测试数据会以“DAT”格式的文件保存在电脑中硬盘 D 区的相应文件夹中。将上述原始数据导入 Origin 软件进行处理和分析（图 28），得到霍尔器件的磁电阻 SdH 量子振荡（图 29）和量子霍尔电阻曲线（图 30）。结合理论公式，提取物理参数如载流子浓度、迁移率、有效质量、朗道能级指数、费米截面等。

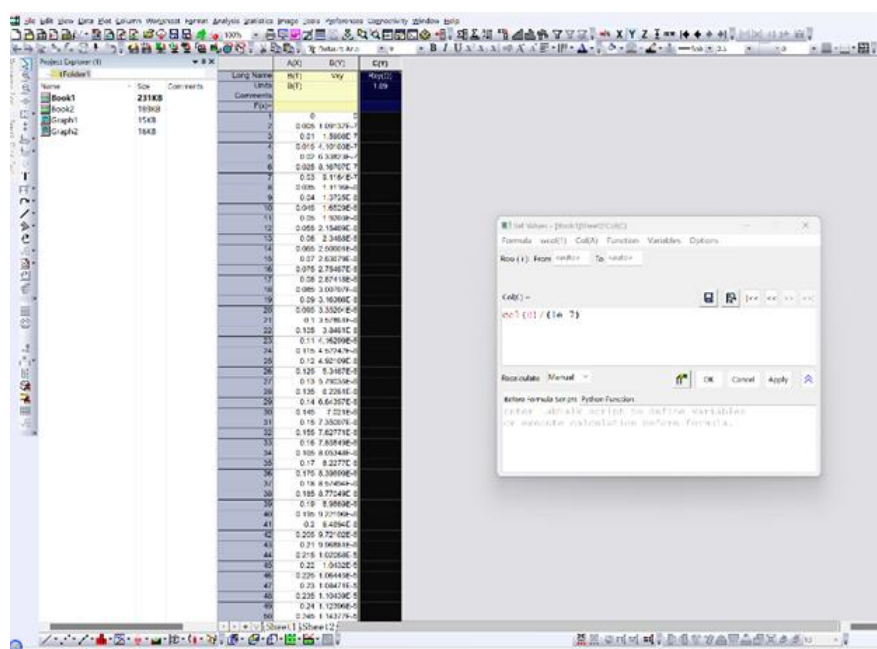


图 28 Origin 软件处理和分析数据

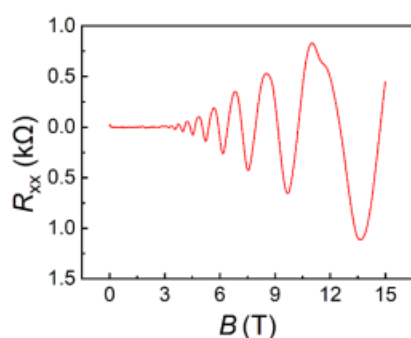


图 29 霍尔器件的磁电阻 SdH 量子振荡

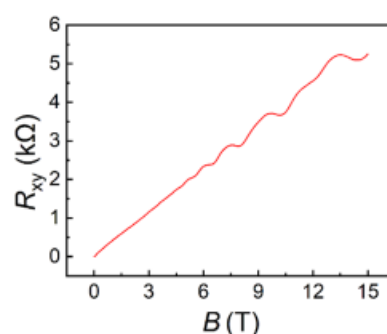


图 30 霍尔器件的量子化霍尔电阻

步骤十四、实验讨论及报告提交

点击网页的“在线讨论”按钮，可进入实验讨论区参与讨论，与老师和同学就实验过程中的问题进行交流；完成实验报告后，在“开始实验”页面点击上传实验报告，即可上传电子实验报告。

3-7 实验结果与结论（说明在不同的实验条件和操作下可能产生的实验结果与结论）

设定温度，设置背栅 V_g ，器件源漏电极间加上合适大小的电流，在 0~9 T（16T）范围扫描磁场，测量器件的纵向电压 V_{xx} 和横向霍尔电压 V_{xy} ，数据处理获得器件的 R_{xx} -B 和 R_{xy} -B 曲线；改变背栅 V_g ，可得不同栅压下的 R_{xx} -B 和 R_{xy} -B 曲线；改变温度 T，可得不同温度下的 R_{xx} -B 和 R_{xy} -B 曲线。

3-8 面向学生要求

（1）专业与年级要求

面向应用物理学、光电信息等相关专业大二及以上本科生。

（2）基本知识和能力要求

学生应具备大学物理、量子力学、固体物理、半导体物理、近代物理实验等的相关基础知识，具有常规仪器设备操作的基本能力，具有基本的现象分析、数据记录、数据处理能力。

3-9 实验应用及共享情况

(1) 本校上线时间：2019 年 12 月 7 日（上传系统日志，要求与实验已开设期次数数据保持一致）

(2) 已服务过的学生人数：本校 378 人，外校 574 人

(3) 附所属课程教学计划或授课提纲并填写：

纳入教学计划的专业数：2，具体专业：应用物理学、光电信息，

教学周期：5，学习人数：952

(4) 是否面向社会提供服务：●是 ○否

(5) 社会开放时间：2020 年 9 月 7 日

(6) 已服务过的社会学习者人数：100 多人人

4. 实验教学特色

（该虚拟仿真实验教学课程的实验设计、教学方法、评价体系等方面的特色，限 800 字以内）

1) 实验方案设计思路

本实验项目以培养学生创新实践能力为目标，以二维体系量子效应测试为主线，以大型高端仪器为手段，构建从微纳器件加工到性能测试和评价的完整实验过程，提高学生运用基本的物理原理和先进的测试技术，开展大型测试和解决复杂问题的综合能力，培养拔尖创新人才，使物理实验教学既能兼顾基础理论和科研前沿，又能面向实际工程应用。

2) 教学方法创新

强调以学生为中心，依托现代先进信息技术，采用在线开放教学模式，实行网上自主学习、虚拟仿真操作、实时考核、网络互动等教学方法。通过在教学过程中的预习、操作、数据记录和处理等环节严格要求，保证了教学效果。

在实验关键步骤中通过原理提示、注意事项及设问等，环环相扣，激发学生学习兴趣，达到自主学习的目的；建立讨论小组等，结合线上线下交流和讨论，引导学生对实验现象及问题进行讨论，鼓励他们畅所欲言，积极查阅文献资料等，进一步提高了教学效果。

3) 评价体系创新

加强过程考核。采用实验课前、课中、课后的分阶段评价模式，通过仿真系统的后台监测登录账号的情况，对预习、操作、在线报告等综合评价。仿真系统能自动对学生的每一个关键操作步骤进行记录和评分，有助于教师了解学生在实验要点和难点上的掌握情况和熟练程度，开展针对性的指导，提高实验教学效果。

4) 对传统教学的延伸与拓展

本项目在实验教学内容上克服了实物实验的周期长、成本高、无法面向学生大规模开放的，结合低温强场等极端条件，使学生对微纳器件加工和极端实验条件下的器件物理参数的测试方面有较为全面的了解，训练学生对实际实验中难以接触到的大型科研仪器的操作技能，具有较强的综合性。同时，实验项目还以涉及低温强场的大型科研仪器及二维体系量子效应最新科研成果为原型，来观测磁电阻 SdH 量子振荡和量子霍尔效应，将教学与科研的紧密结合，增加了学习的挑战性，具有研究性的特点。

5. 实验教学在线支持与服务

(1) 教学指导资源：☐教学指导书☐教学视频 ☒电子教材☐课程教案

(申报系统上传) ☒课件（演示文稿）☐虚拟仿真资源☐其他

(2) 实验指导资源：☐实验指导书☒操作视频 ☐知识点课件库☐习题库

(申报系统上传) ☐测试卷☐考试系统 ☐其他

(3) 在线教学支持方式：☐热线电话☐实验系统即时通讯工具 ☐论坛

☐支持与服务群☐其他

(4) 2 名提供在线教学服务的团队成员；2 名提供在线技术支持的技术人员；教学团队保证工作日期间提供 16 小时/日的在线服务

6. 实验教学相关网络及安全要求描述

6-1 网络条件要求

(1) 说明客户端到服务器的带宽要求（需提供测试带宽服务）
200M 以上校园网或公网。

(2) 说明能够支持的同时在线人数（需提供在线排队提示服务）
200

6-2 用户操作系统要求（如 Windows、Unix、IOS、Android 等）

(1) 计算机操作系统和版本要求

服务器操作系统采用 Windows Server 2008，基于.NET 技术构建。

(2) 其他计算终端操作系统和版本要求

用户机 Windows 7 以上版本。

(3) 支持移动端：○是 ●否

6-3 用户非操作系统软件配置要求（兼容至少 2 种及以上主流浏览器）

(1) 非操作系统软件要求（支持 2 种及以上主流浏览器）

☒谷歌浏览器 ☒IE 浏览器 ☐360 浏览器 ☒火狐浏览器 ☐其他

(2) 需要特定插件 ○是 ●否

如勾选“是”，请填写：

插件名称：（插件全称）

插件容量： M

下载链接：

(3) 其他计算终端非操作系统软件配置要求（需说明是否可提供相关软件下载服务）

支持 HTML5 主流浏览器（可免费下载），例如：谷歌 60.0 以上、火狐 Firefox 55.0 以上、IE 11.0 以上。

6-4 用户硬件配置要求（如主频、内存、显存、存储容量等）

（1）计算机硬件配置要求

CPU: i5-2400(主频 3.1G/缓存 6M/4 核)以上; 内存: 4G 以上; 硬盘: 500G 以上; 显示器: 分辨率 1920×1080; 网卡: 100M; 显卡: Intel HD Graphic 4600 (256M 显存)以上; 输入设备: 鼠标、键盘。

（2）其他计算终端硬件配置要求

建议用户机配置音箱或耳机。

6-5 用户特殊外置硬件要求（如可穿戴设备等）

（1）计算机特殊外置硬件要求

无

（2）其他计算终端特殊外置硬件要求：●无○有

如勾选“有”，请填写其他计算终端特殊外置硬件要求：

6-6 网络安全（实验系统要求完成国家信息安全等级二级认证）

（1）是否已完成定级备案：●是 ○否

请选择备案主体：●课程所属学校名称 ○其他

证书编号：4301014300323033

请附信息系统安全等级保护备案证明

（2）是否已完成等保测评：●是 ○否

请附正式测评报告中实验系统的相关描述页面（等级测评结论页、实验与平台隶属关系描述页等）

报告编号: 43010143003-23033-23-0156-01



网络安全等级保护
中南大学虚拟仿真实验教学课程系统平台
等级测评报告



被测单位: 中南大学
测评单位: 中国信息安全测评中心华中测评中心
(湖南省信息安全测评中心)
报告时间: 2023年12月29日

网络安全等级测评基本信息表

被测对象				
被测对象名称	中南大学虚拟仿真实验教学课程系统平台		安全保护等级	第2级 (S2A2)
备案证明编号	43010143003-23033			
被测单位				
单位名称	中南大学			
单位地址	湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号		邮政编码	410012
联系人	姓名	刘晓丹	职务/职称	课程管理员
	所属部门	中南大学本科生院	办公电话	---
	移动电话	13087319166	电子邮件	---
测评单位				
单位名称	中国信息安全测评中心华中测评中心(湖南省信息安全测评中心)		机构代码	SC202127130010156
单位地址	湖南省长沙市芙蓉区和光路102号		邮政编码	410000
联系人	姓名	李林秉	职务/职称	中级测评师
	所属部门	技术部	办公电话	0731-84733334
	移动电话	18670767792	电子邮件	lilb@cctec.org.cn
审核批准	编制人	李林秉	编制日期	2023-12-29
	审核人	王凡	审核日期	2023.12.29
	批准人	王凡	批准日期	2023.12.29

声明

本报告是中南大学虚拟仿真实验教学课程系统平台的等级测评报告。

本报告测评结论的有效性建立在被测单位提供相关证据的真实性基础之上。

本报告中给出的测评结论仅对被测对象当时的安全状态有效。当测评工作完成后, 由于被测对象发生变更而涉及到的系统构成组件(或子系统)本报告不再适用。

本报告中给出的测评结论不能作为对被测对象内部部署的相关系统构成组件(或产品)的测评结论。

在任何情况下, 若需引用本报告中的测评结果或结论都应保持其原有的意义, 不得对相关内容擅自进行增加、修改和伪造或掩盖事实。

中国信息安全测评中心华中测评中心

(湖南省信息安全测评中心)

(加盖单位公章或等级测评业务专用章)

2023 年 12 月 29 日

等级测评结论

测评结论和综合得分			
被测对象名称	中南大学虚拟仿真实验教学课程系统平台	安全保护等级	第 2 级 (S2A2)
扩展要求应用情况	<input type="checkbox"/> 云计算 <input type="checkbox"/> 移动互联 <input type="checkbox"/> 物联网 <input type="checkbox"/> 工业控制系统 <input type="checkbox"/> 大数据 <input type="checkbox"/> 区块链 <input type="checkbox"/> 容器		
被测对象描述	<p>中南大学虚拟仿真实验教学课程系统平台对中南大学的各级（国家级、省级、校级）虚拟仿真实验教学课程进行运营管理，由中南大学本科生院负责建设和运行，对信息系统具有信息安全保护责任。该信息系统托管在中南大学信息与网络中心机房，由其提供基础网络环境、网络防护以及机房设施。中南大学本科生院是中南大学虚拟仿真实验教学课程系统平台的责任单位。该平台承载的虚拟仿真实验教学课程名单如下：1、低温强场下材料的磁性测试与结构表征虚拟仿真实验；2、磁共振成像和波谱分析虚拟仿真实验；3、二维体系中磁电阻量子振荡和量子霍尔效应虚拟仿真实验；4、老年痴呆患者综合护理虚拟仿真训练；5、老年人跌倒的评估和应急处理；6、糖尿病常见急性并发症的护理虚拟仿真实训；7、WB-BGA 封装制造虚拟仿真实验；8、生物物证检测虚拟仿真实验；9、汉坦病毒的免疫学检测与分离培养；10、大脑磁共振成像的虚拟仿真实验；11、细胞生物电虚拟仿真实验；12、构建 3D 人脑类器官模型虚拟仿真实验；13、研磨工艺虚拟仿真实验；14、基于症状学的临床技能和临床思维虚拟实训教程；15、静脉曲张性消化道大出血临床诊疗虚拟仿真实验教学；16、地下工程盾构法智能建造虚拟仿真实验；17、基于案例的法医学综合分析能力培训项目；18、锂硫软包电池正极材料制备与组装；19、城市地铁浮置板轨道减振原理与设计；20、湘西苗族数字博物馆展陈与环境设计虚拟仿真实验；21、湘西文化遗产情景感知与活化虚拟仿真实验；22、有色金属轧制的板形与板厚控制虚拟仿真实验；23、高致病性病毒检测虚拟仿真实验；24、矿物浮选动态反应过程控制系统虚拟仿真实验；25、列车电力牵引传动与故障诊断虚拟仿真实验；26、结核病聚集性疫情处理虚拟</p>		

等级测评结论

V

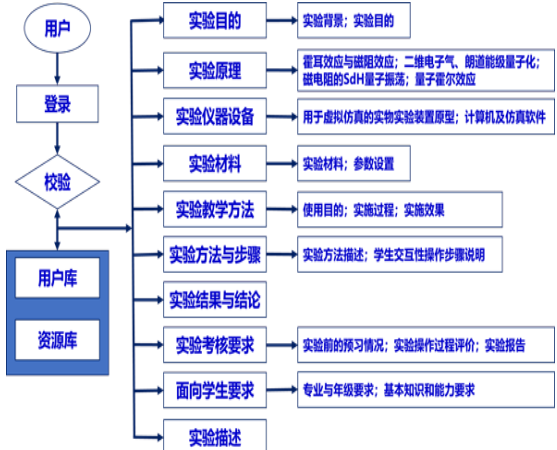
	<p>仿真实验。</p> <p>中南大学虚拟仿真实验教学课程系统平台部署在中南大学新校区网络主机房, 通过 H3C-CAS 云计算管理平台进行服务器虚拟化, 服务器操作系统通过镜像快照进行备份, 备份保存于本地。服务器区域网络边界处与核心区域之间部署有 H3C 防火墙、锐讯 WEB 防火墙, 已配置并启用访问控制策略, 对系统提供安全防护; 部署有启明星辰 TSOC-USM-CDB, 对网络设备、安全设备、服务器日志进行集中收集, 部署安全感知平台对网络流量进行分析, 当发现入侵事件时能够及时告警, 部署锐讯 -NVS-2000 漏洞扫描, 对网络中各类设备定期进行漏洞扫描。</p>
安全状况描述	<p>对中南大学虚拟仿真实验教学课程系统平台进行现场测评, 在安全物理环境、安全通信网络、安全区域边界、安全计算环境、安全管理中心、安全管理等层面做有安全防护措施, 但仍存在以下安全问题: 中风险描述为网络中未部署恶意代码防范系统, 无法对恶意代码进行检测和清除。未配置口令复杂度策略和口令有效期策略。未配置登录连接超时策略。未限制管理账户的远程登录权限。存在默认账户。未设置安全员、审计员账户, 未实现管理用户的权限分离。审计记录仅保存在本机, 未进行定期备份。由于考虑到系统可用性要求, 本次测评未进行漏洞扫描。未采用校验技术保证重要数据在传输过程中的完整性。未进行过恢复性测试。未将重要数据定时备份至异地。不具备《系统维护手册》等日常管理操作类规程。未对各个岗位人员进行安全教育和岗位技能培训, 并告知相关的安全责任和惩戒措施。经核查和访谈, 未在软件交付前通过第三方检测工具或人工检测软件包中可能存在的恶意代码。未提供详细的工程实施方案, 未明确项目实施过程、方法、项目进度及项目质量管理等内容。</p> <p>综合上述评价结果, 中南大学虚拟仿真实验教学课程系统平台在本次测评中, 测评项符合率为 79.58%, 其中部分符合率为 6.10%, 不符合率为 14.32%, 其中测评项总数 520 个, 符合项总数 339 个, 部分符合项总数 26 个, 不符合项总数 61 个, 不适用项总数 94 个。问题数 (含验证测试) 总计 22 个, 其中高风险问题 0 个, 中风险问题数 18 个, 低风险问题 4 个。结合风险评价与风险对国家安全、社会秩序、公共利益以及公民、</p>

	法人和其他组织的合法权益造成的危害情况, 最终风险值为: 81.29。通过对网络安全等级保护基本安全保护状态的分析, 中南大学虚拟仿真实验教学课程系统平台等级测评结论为良。		
等级测评结论	良	综合得分	81.29



7. 实验教学技术架构及主要研发技术

指标	内容
系统架构图及简要说明	系统分前端操作和后台管理两部分, 可自动识别用户身份, 前端界面具备实验目的、实验原理、实验仪器设备、实验材料、实验教学方法、实验方法与步骤、实验结果与讨论、实验考核要求、面向学生要求、实

		<p>验描述等功能模块；后台可对用户和上述资源等进行管理。本系统及其所有资源均可在电脑、手机、平板等终端跨平台使用，移动端兼容 Android 和 iOS 用户。</p>  <pre> graph TD User((用户)) --> Login[登录] Login --> Verify{校验} Verify --> UserLib[用户库] Verify --> ResourceLib[资源库] UserLib --> ExpPurpose[实验目的] UserLib --> ExpPrinciple[实验原理] UserLib --> ExpEquipment[实验仪器设备] UserLib --> ExpMaterials[实验材料] UserLib --> ExpMethods[实验教学方法] UserLib --> ExpSteps[实验方法与步骤] UserLib --> ExpResults[实验结果与结论] UserLib --> ExpRequirements[实验考核要求] UserLib --> ExpStudentRequirements[面向学生要求] UserLib --> ExpDescriptions[实验描述] ResourceLib --> ExpPurpose ResourceLib --> ExpPrinciple ResourceLib --> ExpEquipment ResourceLib --> ExpMaterials ResourceLib --> ExpMethods ResourceLib --> ExpSteps ResourceLib --> ExpResults ResourceLib --> ExpRequirements ResourceLib --> ExpStudentRequirements ResourceLib --> ExpDescriptions </pre>
实验 教学	开发技术	<input type="checkbox"/> VR <input checked="" type="checkbox"/> AR <input type="checkbox"/> MR <input checked="" type="checkbox"/> 3D 仿真 <input checked="" type="checkbox"/> 二维动画 <input checked="" type="checkbox"/> HTML5 <input type="checkbox"/> 其他
	开发工具	<input checked="" type="checkbox"/> Unity3D <input checked="" type="checkbox"/> 3D Studio Max <input checked="" type="checkbox"/> Maya <input type="checkbox"/> ZBrush <input checked="" type="checkbox"/> SketchUp <input checked="" type="checkbox"/> AdobeFlash <input checked="" type="checkbox"/> UnrealDevelopment Kit <input checked="" type="checkbox"/> Animate CC <input checked="" type="checkbox"/> Blender <input checked="" type="checkbox"/> Visual Studio <input type="checkbox"/> 其他

运行环境	服务器 CPU 8 核、内存 16 GB、磁盘 600 GB、 显存 8 GB、GPU 型号 操作系统 <input checked="" type="checkbox"/> Windows Server <input type="checkbox"/> Linux <input type="checkbox"/> 其他 具体版本：2013 数据库 <input type="checkbox"/> Mysql <input checked="" type="checkbox"/> SQL Server <input type="checkbox"/> Oracle <input type="checkbox"/> 其他 备注说明 （需要其他硬件设备或服务器数量 多于 1 台时请说明） 是否支持云渲染： <input type="radio"/> 是 <input type="radio"/> 否
实验品质（如：单场景模型总面数、贴图分辨率、每帧渲染次数、动作反馈时间、显示刷新率、分辨率等）	单场景模型面数：8 个； 贴图分辨率：1440px * 900px； 每帧渲染次数：calls； 动作反馈时间：10ms； 显示刷新率：60FPS； 分辨率：1280ppi * 720ppi 其他：

8. 实验教学课程持续建设服务计划

（本实验教学课程今后 5 年继续向高校和社会开放服务计划及预计服务人数）

（1）课程持续建设

日期	描述
第一年	开发对应的功能模块
第二年	增加新的材料体系；
第三年	增加仿真系统的测试功能与测试参数
第四年	实现本仿真系统的规模化、功能化性能测试
第五年	优化完善测试系统

其他描述：

a.加强管理，完善服务。紧跟计算机软硬件和虚拟仿真技术的发展趋势，不断升级新版本；通过调查了解教师和学生的个性化需求，开发相应的功能模块；进一步完善网络信息平台，持续做好项目后续管理，使虚拟仿真教学资源实现更大范围的开放共享，预计在未来 5 年内，服务 5000 人次以上。

b.拓展内容，扩充资源。一是增加新的材料体系，二是增加仿真系统的测试功能与测试参数，实现本仿真系统的规模化、功能化性能测试。

(2) 面向高校、社会的教学推广应用计划

日期	推广高校数	应用人数	推广行业数	应用人数
第一年	5	1000	0	0
第二年	10	2000	0	0
第三年	25	3000	0	0
第四年	40	4000	0	0
第五年	50	5000	0	0

其他描述：

本项目主要面向普通高等学校的物理、微电子类、电子信息类专业开设，目前全国开设这些专业的高校众多，可以进行交流合作与资源共享。将通过会议报告、主办虚拟仿真实验教学研讨会、开展虚拟仿真技术培训、接待参观等各种途径，开展面向其他高校的教学推广应用。在建设虚拟仿真资源和完善服务的同时，免费向社会开放使用。入选国家虚拟仿真实验教学项目后，计划在1年内继续完善教学内容，并面向高校和社会免费开放，此后将持续提供教学服务和技术保障。


9. 知识产权

软件著作权登记情况	
以下填写内容须与软件著作权登记一致	
软件名称	二维体系中磁电阻量子振荡和量子霍尔效应虚拟仿真实验软件
是否与课程名称一致	<input checked="" type="radio"/> 是 <input type="radio"/> 否

<p>每栏只填写一个著作权人，并勾选该著作权人类型。如勾选“其他”需填写具体内容；如存在多个著作权人，可自行增加著作人填写栏进行填报。</p>	
著作权人	著作权人类型
中南大学	<input checked="" type="radio"/> 课程所属学校 <input type="radio"/> 企业 <input type="radio"/> 课程负责人 <input type="radio"/> 学校团队成员 <input type="radio"/> 企业人员 <input type="radio"/> 其他
权利范围	全部权利
软件著作权登记号	2020SR1820611（证书号：软著登字第 6623613 号）
<p>请附软件著作登记证书</p> 	
<p>如软件著作权正在申请过程中，尚未获得证书，请填写受理流水号。</p>	
受理流水号	

10. 诚信承诺

本团队承诺：申报课程的实验教学设计具有一定的原创性，课程所属学校对本实验课程内容（包括但不限于实验软件、操作系统、教学视频、教学课件、辅助参考资料、实验操作手册、实验案例、测验试题、实验报告、答疑、网页宣传图片文字等组成本实验课程的一切资源）享有著作权，保证所申报的课程或其任何一部分均不会侵犯任何第三方的合法权益。

实验教学课程负责人（签字）：

2024 年 01 月 27 日

11. 附件材料清单

1. 课程团队成员和课程内容政治审查意见（必须提供）

（申报课程高校党委负责对本校课程团队成员以及申报课程的内容进行政审，出具政审意见并加盖党委印章；团队成员涉及多校时，各校党委分别对本校人员出具意见；非高校成员由其所在单位党组织出具意见。团队成员政审意见内容包括政治表现、是否存在违法违纪记录、师德师风、学术不端、五年内是否出现过重大教学事故等问题；课程内容审查包括价值取向是否正确，对于我国政治制度以及党的理论、路线、方针、政策等理解和表述是否准确无误，对于国家主权、领土表述及标注是否准确，等等。）

政治审查意见

“二维体系中磁电阻量子振荡和量子霍尔效应虚拟仿真实验”教学课程团队成员包括：课程负责人夏庆林，男，1973.03 出生，汉族，教授；马松山，男，1971.11 出生，汉族，副教授，整体规划；敬玉梅，女，1990.08 出生，中共党员，汉族，副教授，实验设计；熊小努，男，1986.09 出生，中共党员，汉族，特聘教授，仿真设计；陈智慧，女，1989.08 出生，中共预备党员，汉族，讲师，实验指导。

课程团队成员拥护党的路线、方针、政策，坚持四项基本原则，坚持用习近平新时代中国特色社会主义思想铸魂育人，积极践行党的二十大精神；组织纪律性强，严格遵守国家法律法规及各项规章制度，恪守高校教师职业道德规范，注重为人师表、立德树人；教学能力强，对待教学认真负责，能坚持积极开展教研教改工作。

经审查，该课程内容价值取向正确，对我国政治制度以及党的理论、路线、方针、政策等理解与表述准确无误，对国家主权、领土的表述及标注准确；未发现团队成员存在师德师风问题及学术不端等问题，未发现团队成员五年内出现过重大教学事故，未发现课程内容有危害国家安全、涉密及其他不适宜公开传播的内容。

中国共产党中南大学委员会
2020年1月9日

2. 课程内容学术性评价意见（必须提供）

[由学校学术性组织（校教指委或学术委员会等），或相关部门组织的相应学科专业领域专家（不少于 3 名）组成的学术审查小组，经一定程序评价后出具。须由学术性组织盖章或学术审查小组全部专家签字。无统一格式要求。]

中南大学学术委员会关于“二维体系中磁电阻量子振荡和量子霍尔效应虚拟仿真实验”课程的评价

夏庆林教授主持的“二维体系中磁电阻量子振荡和量子霍尔效应虚拟仿真实验”课程是物理学院应用物理学、光电信息专业《固体物理》、《半导体物理》、《功能材料》、《近代物理实验》等相关专业课程的重要组成部分。该课程为 2020 年度湖南省一流本科课程(虚拟仿真实验)。

该课程深入贯彻习近平新时代中国特色社会主义思想 and 党的二十大精神，面向世界科技前沿，注重科教融汇，将团队老师关于二维少层黑磷量子输运的科研成果（Nature 2021, 593: 56-60）和其它重要二维体系（石墨烯、黑磷、Te 烯、InSe、Bi₂O₂Se 等）前沿研究成果纳入实验内容，支撑拔尖创新人才培养和“三高四新”建设。

课程进一步落实国家教育数字化战略行动，注重在课程设计、教学内容、教学方法、评价形式上的创新，强调对学生能力、素质的培养，关注创新理念在教学过程中的落实及课程的应用和示范情况。

课程资源丰富，项目简介、引导视频、实验演示、实验目的、实验原理、实验教学方法、实验方法与步骤、实验描述等内容齐全、规范，能满足实验教师和学生线上自主学习和进行实验的需求。

课程内容导向正确，遵循教育教学规律，体现现代教育思想，具有较高的科学性水平。课程资源版权清晰，未涉及盗版、反动言论、不健康内容。



3. 校外评价意见（可选提供）

（评价意见作为课程有关学术水平、课程质量、应用效果等某一方面的佐证性材料或补充材料，可由课程应用高校或社会应用机构等出具。评价意见须经相关单位盖章，以1份为宜，不得超过2份。无统一格式要求。）

“二维体系中磁电阻量子振荡和量子霍尔效应虚拟仿真实验”

校外评价

量子效应一直是凝聚态物理领域研究关注的重点。二维材料体系是研究量子效应的理想平台。开展有关量子效应的实验教学，对学生深刻了解凝聚态体系中量子现象的物理本质具有重要意义。中南大学物理学院“二维体系中磁电阻量子振荡和量子霍尔效应虚拟仿真实验”课程内容融汇课程团队老师二维黑磷层状材料的新奇量子效应和近年来凝聚态物理二维体系中量子效应研究的前沿成果，借助虚拟仿真技术，构建了“二维体系量子效应虚拟仿真实验”平台，解决了普通本科院校根本不可能开展的实验周期长、成本高、无法面向学生大规模开放此类实验的问题。

该虚拟仿真实验课程教学文件齐全，实验老师和学生可以在仿真实验课前通过项目简介、实验目的、实验原理、实验仪器设备、实验方法和步骤、实验描述等预习了解量子效应相关基础知识；通过引导视频、在线演示等了解仿真实验的主要步骤、重点难点等。仿真实验环境设计模拟真实场景，能给学生带来沉浸感、真实感；动画讲解通俗易懂，使学生易于接受，从而激发学生的学习兴趣，在短时间内了解量子效应前沿进展，掌握与量子效应相关的基本实验技能，达到良好的教学效果。

虚拟仿真教学过程中，项目团队提供优质的在线服务，及时解决实验老师和同学们遇到的各种问题，免除了使用者的后顾之忧。我院物理专业2017级01-03班80人、2018级01-04班118人、2019级01-05班150人、2020级01-04班127人（共计470多人）先后进行了该虚拟仿真实验项目的学习，反响很好！学生既了解了二维体系量子效应前沿进展、加深了对物理本质的理解，又学习了先进的微纳器件加工制备和物性测试的技能，收获满满！

总之，该虚拟仿真实验是一门学术水平高、课程质量优、应用效果好的课程！

湖南科技大学物理与电子科学学院

2023年12月10日



“二维体系中磁电阻量子振荡和量子霍尔效应虚拟仿真实验”

校外评价

习近平总书记在中共中央政治局集体学习及二十大报告中强调：量子力学是人类探究微观世界的重大成果，量子科技发展具有重大科学意义和战略价值；要充分认识推动量子科技发展的重要性和紧迫性，加强量子科技发展战略谋划和系统布局，把握大趋势，下好先手棋。要推进科教融汇，加强基础学科、新兴学科、交叉学科建设；加快实施创新驱动发展战略，坚持面向世界科技前沿……。

二维材料体系中的量子效应是近来凝聚态物理领域研究关注的重点。开展有关二维材料体系中量子效应现象的实验教学，既能满足培养创新型人才的需求，又能加深学生深刻理解二维体系中量子现象的物理本质。但与之相关的磁电阻量子振荡和量子霍尔效应实物实验涉及到的设备繁多、价格昂贵、实验周期长、成本高、普通本科院校无法面向学生大规模开放。中南大学物理学院的“二维体系中磁电阻量子振荡和量子霍尔效应虚拟仿真实验”课程融汇团队老师二维少层黑砷中的新奇量子霍尔效应和近年来二维体系中量子效应研究的前沿成果，借助虚拟仿真技术，构建了“二维体系量子效应虚拟仿真实验”平台，解决了此类问题。

该虚拟仿真实验课程网站内容充实，实验老师和学生可以在仿真实验课前通过预习知识模块了解量子效应相关基础知识；通过项目简介、引导视频、在线演示等了解仿真实验的主要内容、主要步骤、重点难点等。仿真实验模拟真实实验场景，使学生能在沉浸教学环境中短时间内了解和掌握与量子效应相关的基本实验技能，达到良好的教学效果。

我院物理专业 2020 级 3 个教学班共计 99 人进行了该虚拟仿真实验项目的学习。虚拟仿真实验教学前后，中南大学物理学院虚拟仿真项目团队提供优质的实时在线服务，解答实验老师和同学们遇到的各种问题，反响强烈！学生们纷纷表示以后要多接触和学习此类虚拟仿真实验课程，既能了解物理学相关领域的前沿进展、加深对其物理现象本质的理解，又能学习先进的测试技术一举多得！虚拟仿真实验大大激发了同学们学习物理的热情和兴趣！

总而言之，中南大学物理学院的“二维体系中磁电阻量子振荡和量子霍尔效应虚拟仿真实验”是一门水平高、质量优、效果好的课程！

新疆大学物理科学与技术学院

2023 年 12 月 12 日