



国家重点研发计划项目：ATLAS探测器升级

课题3：“ATLAS实验缪子探测器升级”

课题负责人：孙勇杰
中国科学技术大学

报告人：郭军
上海交通大学

1. 课题目标和考核指标
2. 研究内容
3. 研究方法和技术路线
4. 创新点和关键技术问题
5. 进度安排和年度计划
6. 参与单位人员与分工
7. 组织管理与保障措施
8. 风险分析与应对措施

1. 课题目标和考核指标

课题目标：研制计数率能力达到 1 kHz/cm^2 ，探测效率高于95%，时间分辨率好于 1 ns 的阻性板室（RPC）探测器

- 最前沿的RPC性能指标
- 极苛刻的RPC结构参数
- 大面积建造需求
- 批量工艺和质量控制
- 需完成~50%的工程建造任务，并完成安装和调试

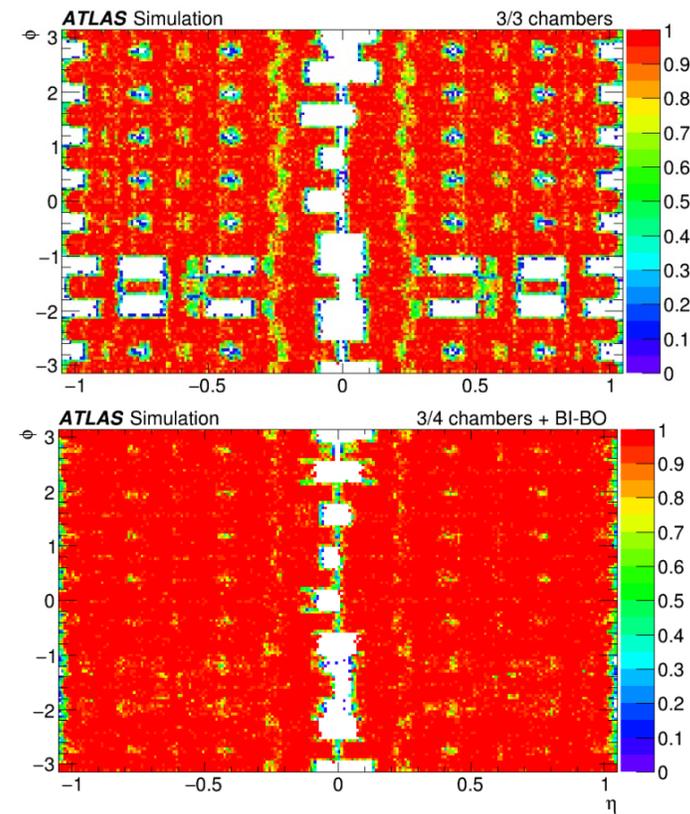
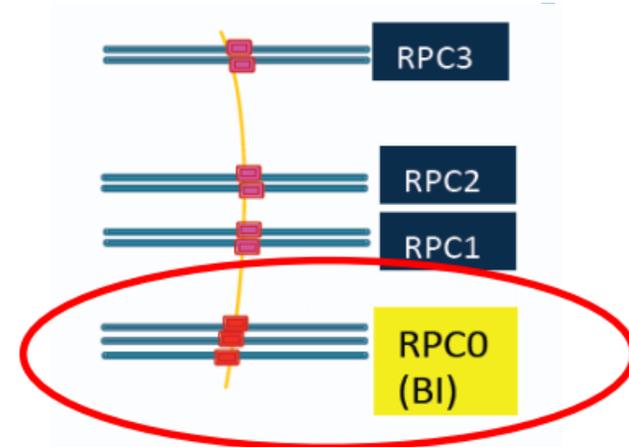
考核指标 ²				考核方式(方法)及评价手段 ⁴
指标名称	立项时已有指标值/状态	中期指标值/状态 ³	完成时指标值/状态	
计数率	原型探测器 1 kHz/cm^2 (关键核心指标)	预生产探测器 1 kHz/cm^2	安装到ATLAS实验的RPC: $>1 \text{ kHz/cm}^2$	实验测试或由ATLAS验收
探测效率	RPC样机 $>95\%$ (关键核心指标)	预生产探测器 $>95\%$	安装到ATLAS实验的RPC $>95\%$	实验测试或由ATLAS验收
时间分辨	原型探测器 1 ns (关键核心指标)	预生产探测器 1 ns	安装到ATLAS实验的RPC $<1 \text{ ns}$	实验测试或由ATLAS验收

ATLAS二期升级的窄气隙RPC

Potentially for future experiment...



- RPC探测器是ATLAS实验实现缪子触发的关键探测器
- 在高亮度HL-LHC环境下，现有RPC面临以下问题：
 - 2mm气隙的计数率能力 $<100 \text{ Hz/cm}^2$
 - 寿命已达到10年的设计年限
 - 只能在低电压下运行，效率降低
 - 系统覆盖率较低
- 解决方案：
 - 在桶部内层增加3层高计数率RPC，提高冗余度，确保触发效率
 - 采用窄气隙结构提高计数率，并提高时间分辨和寿命
 - 大幅度提高缪子系统的覆盖率



2. 研究内容

- Phase-II升级RPC的主要技术方案包括：
 - 采用1 mm宽度的窄气隙结构：减小雪崩电荷量，提高计数率，提高探测器寿命，提高时间分辨
 - 采用1.4 mm电木板厚度：提高计数率能力
 - 采用高灵敏度、高信噪比的前端电子学：补偿气体增益
 - 采用双端读出方法：减少通道数，利用时间差定位，提高位置分辨，
- 以上方案，已经过原理性验证、原型探测器和工程样机的测试验证。

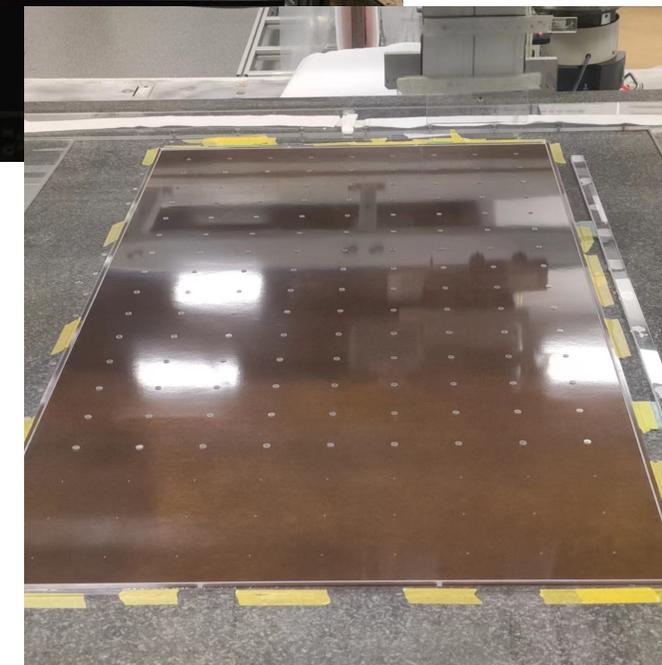
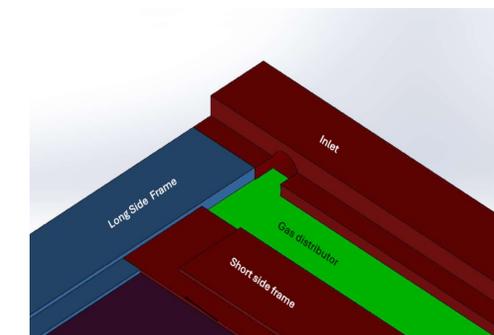
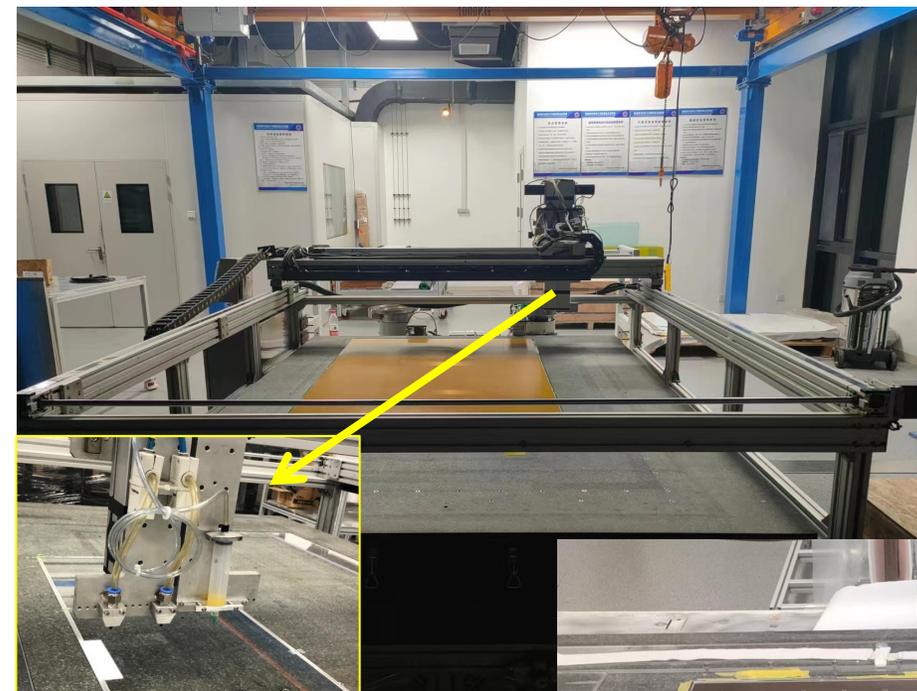
本课题主要研究内容：

- 针对工程建造优化探测器设计，完善探测器制作方法，建立可靠的制作工艺流程和质量控制方法，确保所有探测器单元具有**优异的、均匀的、一致的性能**，完成工程建造和现场安装调试。

3. 研究方法和技术路线

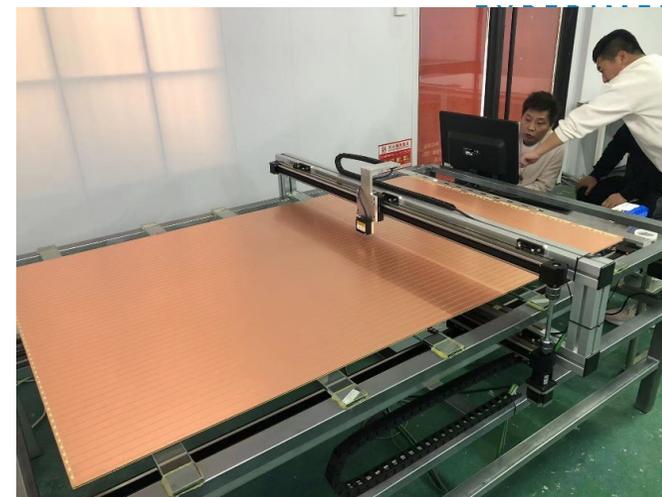
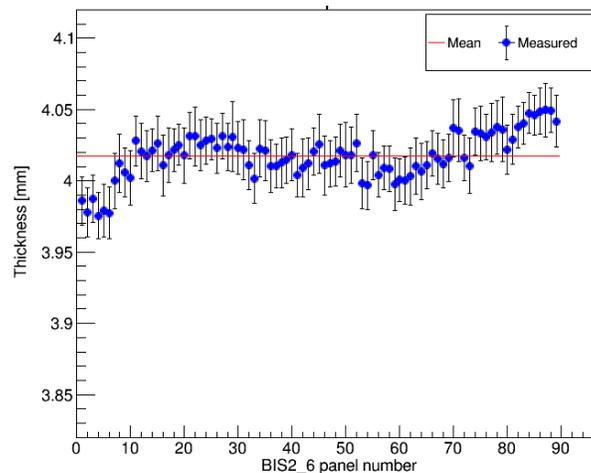
① RPC窄气隙制作工艺和均匀性控制

- 承担~70个RPC气隙的建造
- 主要挑战：
 - 探测器面积大：长度~1.7米，宽度~1.1米
 - 气隙宽度精度要求高： $1\text{ mm} \pm 10\text{ }\mu\text{m}$
- 技术路线
 - 垫片和边框加工工艺和加工方法的优化
 - 自动化垫片排布和点胶、涂胶设备设计和优化
- ✓ 当前状态：
- ✓ 已建立完整制作工艺，参数可按照具体设计优化



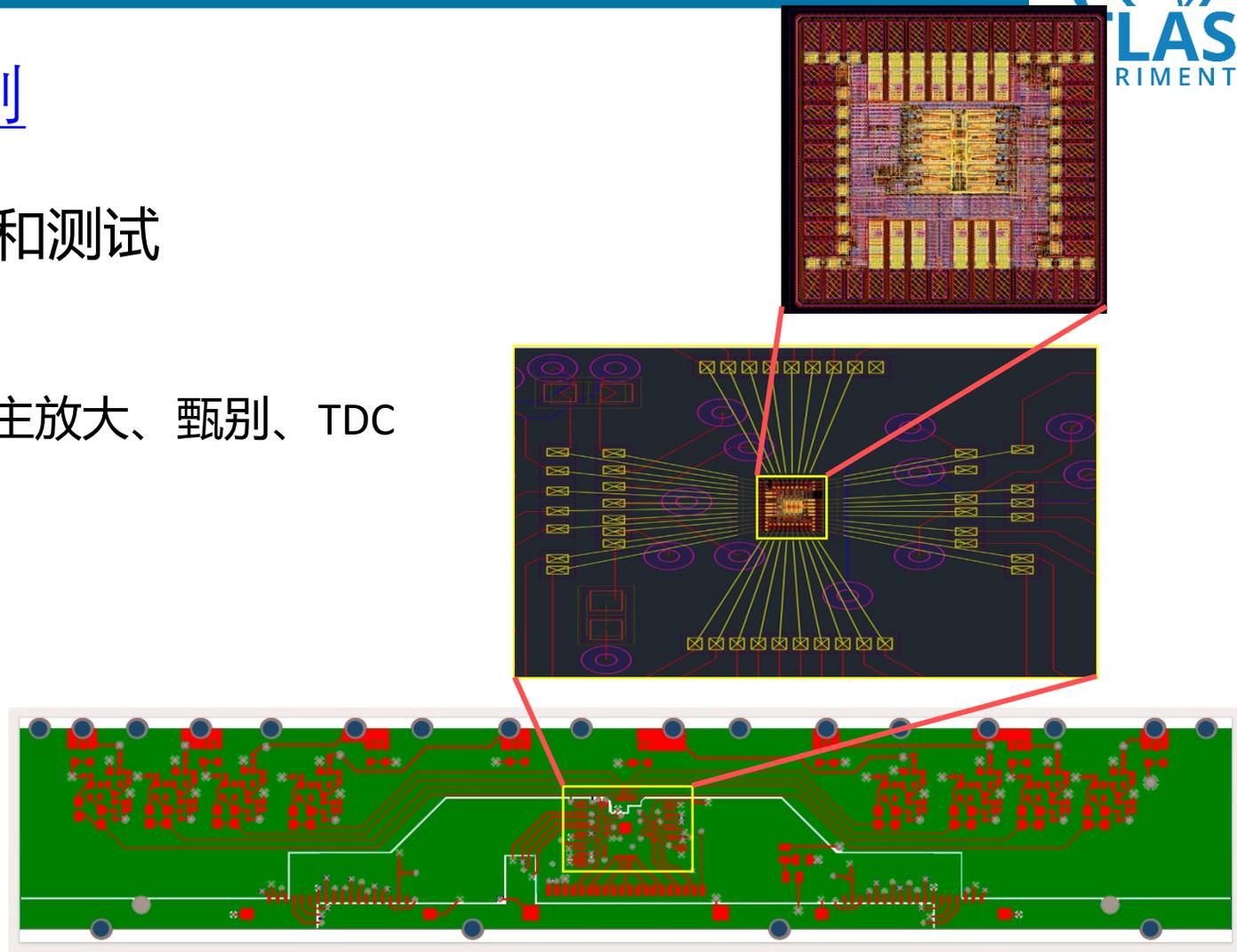
② 蜂窝读出板的平整性控制

- 承担~600个蜂窝读出板的工程建设
- 主要挑战：
 - 读出板面积大：长度~1.7米，宽度~1.1米
 - 厚度精度/平整性：< 100 μm
- 技术路线
 - 基于真空袋方法的制作工艺优化
 - 有效的厚度/平整度检测方法
- 当前状态：
 - ✓ 已进入工程阶段，~200个读出板制作合格



③ 前端电子学板制作和质量控制

- 承担~5000个前端电子学板的制作和测试
- 主要挑战：
 - 数模结合的电路结构：SiGe预放大 + ASIC主放大、甄别、TDC
 - ASIC芯片打线和检测
 - 电子学批量功能性测试
- 技术路线
 - 建立制作工艺和质量控制流程
 - 建立功能性测试工艺流程
- 当前状态：完成100块前放板预生产，正在打线，待测试



④ 探测器制作和性能测试

- 承担~300个单层RPC的制作和测试
- 主要挑战：
 - 大面积单层RPC的装配：长度~1.7米，宽度~1.1米
 - 大规模多通道的集中测试：~2.48万通道
- 技术路线
 - 建立装配流程和质量控制方法
 - 建立专用大面积宇宙线测试平台
 - 基于FPGA的大规模数据采集系统：288通道
- 当前状态：完成装配流程验证，正在CERN搭建首个宇宙线测试系统



正在CERN搭建的宇宙线质量检测系统

⑤ 探测器安装和调试

- 全程参与BIS RPC的安装和调试，确保探测器稳定运行
- 主要挑战：
 - 多单位分工合作的建造流程：单层RPC → RPC triplet → triplet + sMDT
(意大利INFN, 中国组, 德国MPI, CERN)
 - 跟踪参与后续测试流程，直至CERN现场的安装与调试
- 技术路线
 - 全程参加探测器各阶段的安装和调试
 - 探索探测器问题定位和修复方法

4. 创新点和关键技术

- 窄气隙技术路线可以全面提升RPC的计数率、时间分辨率、工作寿命等主要性能，是未来RPC发展的重要方向。
- 本课题研制的1 mm气隙RPC，是在粒子物理实验中的首次大规模应用。
- 大面积窄气隙RPC对制作工艺、测试方法、质量控制方法都有极高的要求。
- 课题组全面开展ATLAS二期升级RPC的研制和建造工作，包括气隙的制作、读出板的制作、单层探测器的装配和集成、大规模的探测器和电子学性能测试系统、探测器系统安装和调试.....
- 最终建立并掌握窄气隙RPC的完整制作工艺和质量控制方法，在大面积气体探测器领域跻身世界领先行列。

5. 进度安排：第一年

- 工作任务：
 - 完成长度超过1米的RPC窄气隙原型制作，并进行I-V测试
 - 完成300块蜂窝读出板的制作和测试
 - 完成前端电子学板的测试流程设计，并启动制作和测试
 - 完成150个单层RPC的制作
 - 建立大规模宇宙线测试平台
- 考核指标：
 - 300块蜂窝读出板检测合格
- 成果形式
 - 蜂窝读出板质量检测报告

- 工作任务：

- 完成BIM/BIR位置气隙设计
- 完成300块蜂窝读出板的制作和测试
- 完成5000块前端电子学板的制作和测试
- 完成150个单层RPC的宇宙线性能测试

- 考核指标：

- 300块蜂窝读出板检测合格
- 探测器探测效率 $>95\%$ ，时间分辨 $< 1 \text{ ns}$

- 成果形式

- 蜂窝读出板质量检测报告，探测器性能测试报告

- 工作任务：
 - 完成150个单层RPC的宇宙线性能测试
 - 全面测试制作的RPC气隙性能，完成气隙建造
 - 参与三层探测器chamber的装配和性能测试（MPI），参与CERN现场组装调试
- 考核指标：
 - 探测器探测效率 $>95\%$ ，时间分辨 $< 1 \text{ ns}$
- 成果形式
 - 探测器性能测试报告

- 工作任务：
 - 探测器现场安装和调试
 - 基于CERN的测试平台，检测并修复探测器问题
- 考核指标：
 - 探测器探测效率 $>95\%$ ，时间分辨 $< 1 \text{ ns}$
- 成果形式
 - 探测器性能测试报告

- 工作任务：

- 完成探测器现场安装和调试
- 启动无束流状态下的试运行
- 总结项目经验，撰写批量工艺文章，准备项目结题和验收

- 考核指标：

- 探测器探测效率 $>95\%$ ，时间分辨 $< 1 \text{ ns}$ ，计数率能力 $> 1 \text{ kHz/cm}^2$

- 成果形式

- 探测器性能测试报告，课题结题报告

课题进度时间表

任务	2023.12-2024.11	2024.12-2025.11	2025.12-2026.11	2026.12-2027.11	2027.12-2028.11
RPC气隙	原型探测器制作和测试	工程设计	气隙制作		
蜂窝读出板	方案设计	读出板制作	读出板测试		
前端电子学	测试方案设计	电子学制作	电子学测试		
单层RPC	方案设计	单层RPC制作	单层RPC测试		
RPC chamber			装配与测试、修复		
安装和调试				安装与调试	

6. 参与单位和人员

- 牵头单位：中国科学技术大学，课题负责人：孙勇杰
- 参与单位：上海交通大学，单位负责人：郭军
- 参与人员：12人
 - 中国科学技术大学：9人，其中：副高4人、其他5人
 - 上海交通大学：3人，其中：副高1人，其他2人
- 分工：
 - 关键技术研究部分：根据已有基础条件和专长合理分工，最大程度发挥各单位的研究力量，保证各关键技术研究按时完成。
 - 探测器与电子学的制作和测试：共同集中人力，在中科大完成，尽量避免大面积探测器的运输专场。
 - 探测器的现场安装和调试：则由两家单位按合适比例共同承担

7. 组织管理与保障措施

- 本课题实行课题负责人全面负责制。
- 课题负责人组织和协调课题各项研究工作的开展和实施。课题负责人根据课题研究内容指定各方面的具体负责人，他们与课题负责人保持密切的沟通和交流，在课题负责人的领导下开展各项研究工作。
- 课题每周组织课题组例会，讨论和解决具体技术问题；每周参加ATLAS RPC升级合作组例会，与其他合作组单位保持密切联系；每年召开二次课题组研讨会，针对课题实施过程中存在的重要问题进行专题讨论；每年召开一次年终总结会，检查课题进度，安排一下年度的具体工作。
- 课题将严格执行国家和科技部对“国家重点研究计划”的政策要求，课题各参加单位及各参加单位所在的国家、教育部重点实验室将在研究人员、支撑人员和研究生等人力资源、实验室场地和相关条件上给予支持，以保障项目顺利实施，达到目标。

8. 风险分析与应对措施

- 大型国际合作进度调整的风险：参与单位众多，各单位承担的任务互相牵连，互为支撑；并受整个ATLAS实验、HL-LHC升级计划的影响。
- ✓ 应对措施：积极参与升级项目相关的沟通与讨论，掌握各任务最新的发展动态，合理调整具体工作安排，确保各项任务按期完成。
- 大面积探测器长途运输的风险：各单位分别承担不同的装配步骤，涉及意大利→中国→德国→瑞士的探测器运输链。
- ✓ 应对措施：合理设计探测器支撑、包装、保护结构，避免探测器运输中受损。

- 窄气隙结构是RPC未来发展的最主要方向之一，可以全面提升RPC的各项性能。
- 窄气隙RPC对应非常苛刻的机械结构，对探测器设计、部件加工、装配工艺和流程、质量控制方法等都提出了严峻的考验。
- 在前期深入研究和广泛合作的基础上，课题组有信心按计划、高质量完成研制和建造任务。
- 通过课题执行，为未来大型实验的探测器建造做好人才储备和技术储备。

感谢各位专家莅临指导！

backup

参与人员名单



单位	姓名	职称	工作	
中国科学技术大学	孙勇杰	副教授	课题负责人	
上海交通大学	郭军	副教授	交大负责人	
中国科学技术大学	梁昊	副教授	电子学负责人	
	杜东硕	副研究员	RPC气隙制作	
	Francois Lagarde	副研究员	单层RPC制作和质量控制	
	Mohamed Zaazoua	博士后	RPC气隙测试	
	丁玥心	博士生	RPC性能测试系统	
	李家璇	博士生	电子学性能测试	
上海交通大学	王曦	博士生	单层RPC制作和测试	
	毛厉宁	博士生	RPC安装和调试	
中国科学技术大学	沈瑞	技术员	RPC制作	
	孙跃东	技术员	RPC制作	