

2024年度职工绩效考核

(2023.12-2024.11)

实验物理中心 探测器一组 卢云鹏

2024.11.20



一、岗位职责

■ 粒子物理实验中的硅像素顶点探测器研究

- 空间分辨率，功耗和读出速度三项**关键指标**互相制约
- 顶点分辨性能 Impact Parameter Resolution

$$\sigma_{r\phi} = 5\mu m \oplus \frac{10}{p(\text{GeV}) \sin^{3/2} \theta} \mu m$$

直接影响
第一项

间接影响
第二项

- **核心问题**：如何在 50 mW/cm^2 的**功耗预算**下，设计出最佳的**空间分辨率**和**读出速度**？

air cooling的上限



一、岗位职责

■ 粒子物理实验中的硅像素顶点探测器研究

- 空间分辨率, 功耗和读出速度三项**关键指标**互相制约
- 顶点分辨性能 Impact Parameter Resolution

$$\sigma_{r\phi} = 5\mu\text{m} \oplus \frac{10}{p(\text{GeV}) \sin^{3/2} \theta} \mu\text{m}$$

直接影响
第一项

间接影响
第二项

- **核心问题**: 如何在 50 mW/cm^2 的**功耗预算**下, 设计出最佳的**空间分辨率**和**读出速度**?

air cooling的上限

■ 中国空间站高能宇宙辐射探测设施HERD实验

- 晶体量能器标定光源的**原理验证**
- 增强相机数据零压缩的**原理验证**

如何用**最小化资源**实现相应功能? 安装空间, 供电功耗, 数传带宽



一、岗位职责

■ 粒子物理实验中的硅像素顶点探测器研究

- 空间分辨率, 功耗和读出速度三项**关键指标**互相制约
- 顶点分辨性能 Impact Parameter Resolution

$$\sigma_{r\phi} = 5\mu\text{m} \oplus \frac{10}{p(\text{GeV}) \sin^{3/2} \theta} \mu\text{m}$$

直接影响
第一项

间接影响
第二项

- **核心问题**: 如何在 50 mW/cm^2 的**功耗预算**下, 设计出最佳的**空间分辨率**和**读出速度**?

air cooling的上限

■ 中国空间站高能宇宙辐射探测设施HERD实验

- 晶体量能器标定光源的**原理验证**
- 增强相机数据零压缩的**原理验证**

如何用**最小化资源**实现相应功能? 安装空间, 供电功耗, 数传带宽

■ 学生培养



CMOS像素芯片JadePix-5的设计

■ JadePix系列的最新设计

- 由科学院培育项目（2021-2024）和科技部重点研发计划（2024-2028）资助
- 立足国外180nm CIS**成熟工艺**
- 面向**CEPC**顶点探测器需求
- 探索**空间分辨，功耗和读出速度的设计极限**

■ JadePix-5的设计成果

- 引入了JadePix-3小像素和低功耗的**成功经验**
- 升级了HIT驱动的像素读出逻辑，**弥补短板**（JadePix-3读出速度慢）
(读出时间100us → 1us)
- 解决了20mm x 15mm大面积带来的**复杂度问题**：电压衰减，时序裕量， ...

■ 已完成版图设计，将与法国IPHC**合作流片**

- 卢云鹏，周扬，王云翔，王安琪
- **高能所团队独立完成**

JadePix-5与ALPIDE的主要区别

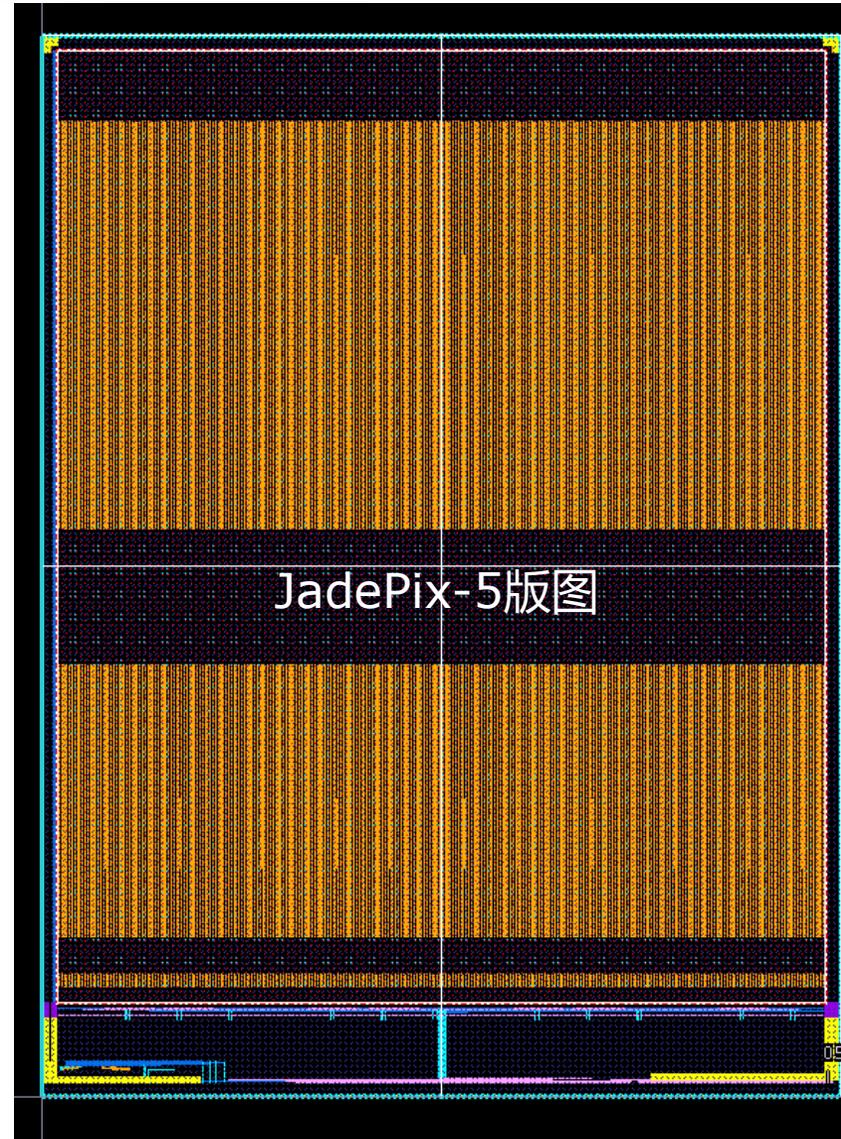
像素尺寸减小23%，工作模式更适用于CEPC实验

	JadePix-5	ALPIDE
像素尺寸	20um x 30um	27um x 29um
工作模式	(过阈) 自触发	Global Shutter



JadePix-5版图

15 mm



6.1 mm

10.4mm



JadePix-3 Telescope

JadePix-3研究小像素设计对空间分辨率的影响

- 同类芯片中像素最小：16um x 23um

CEPC/MOST1项目代表性成果

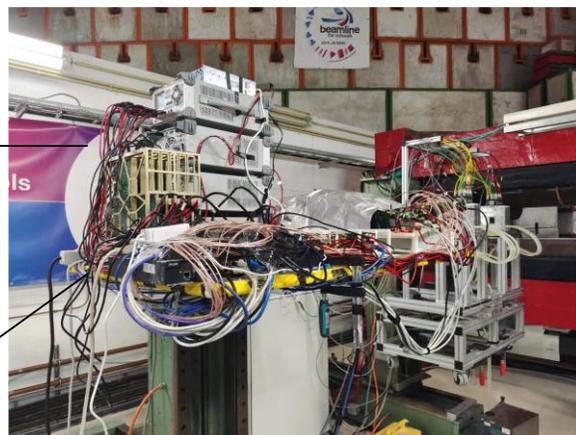
1、650MHz高性能超导腔

2、基于CMOS工艺的高空间分辨硅像素探测器和低功耗探测器读出芯片

3、高能环形正负电子对撞机设计方案

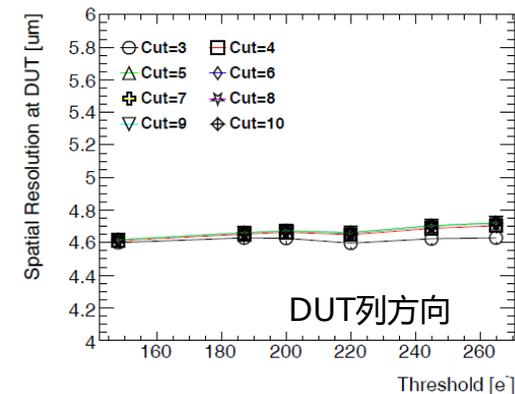
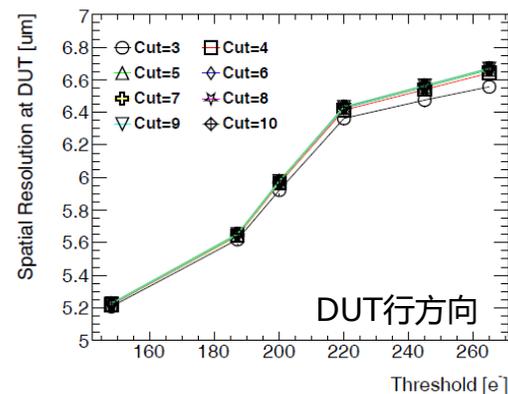
进一步完成JadePix-3 Telescope研制与束流测试

- 验证了空间分辨率指标
- 研究了多层芯片的tracking性能
- 研究了负偏压对探测性能的影响



JadePix-3 Telescope束流测试文章在NIMA正式发表

- 最高效率 > 99%
- DUT列（行）方向最高分辨：4.6um (5.2um)
- 望远镜系统列（行）方向最高分辨分辨：2.3um (2.6um)



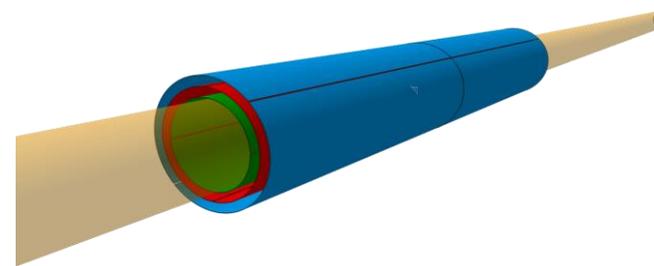
作者分工:

- 策划和组织协调 (卢云鹏, 欧阳群)
- 电路板设计 (卢云鹏)
- Telescope组装, 调试 (董胜)
- 束流实验和取数 (董胜, 周佳)
- 基于Corryvreckan的数据分析 (董胜, 陈智良)
- TCAD仿真 (中科院大学)
- 负偏压测试 (中国科大)
- 阈值和噪声研究 (吉林大学)

Performance study of the JadePix-3 telescope from a beam test, NIMA, 1065 (2024) 169551

国内先进工艺研发

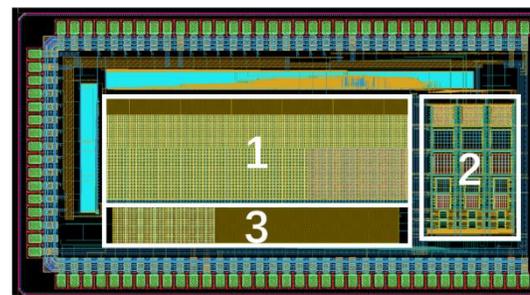
- 55nm工艺下的CMOS-Stitching是实现**低质量**的关键
 - CEPC ref. TDR将CMOS-stitching作为顶点探测器**首选**
- 2021年完成了**Diode阵列芯片设计**，用于工艺测试
 - 研究不同外延层 (epi) 的电荷收集效率与信号特征
 - 研究深P阱 (deep-p-well) 的离子注入参数
- 今年完成了 ^{55}Fe 和 ^{90}Sr 放射源的电荷收集效率测试@阵列2
 - ^{55}Fe 电荷收集效率**93.5%**，与180 nm成熟工艺相当 (94%)
 - 初步验证了国内先进CIS工艺开发的可行性



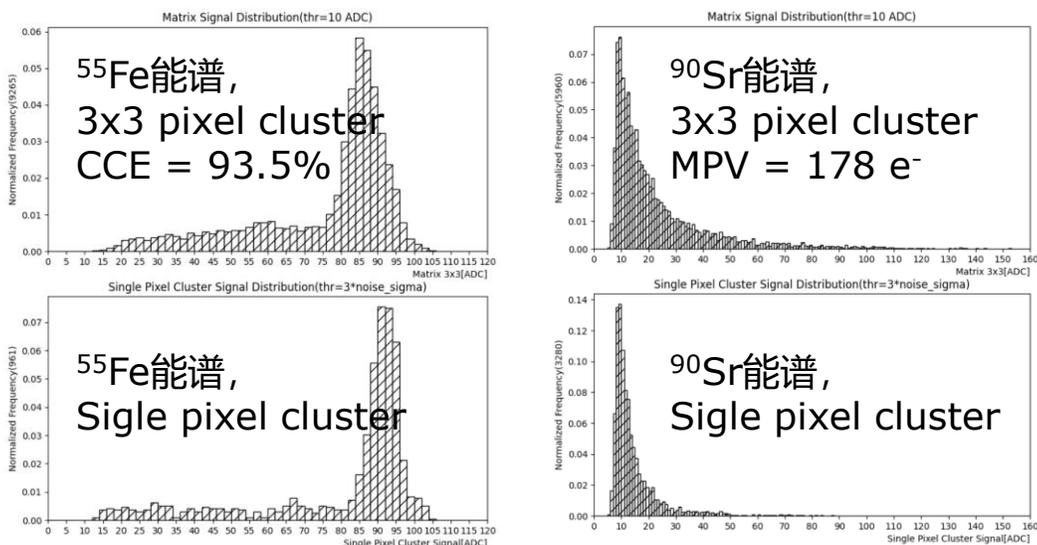
采用CMOS-Stitching的晶圆级芯片
减薄并卷制成桶状探测器的概念示意图

Diode阵列设计版图

设计团队：周扬，张颖，卢云鹏



阵列1：串行输出； 阵列2：并行输出；
阵列3：diode测试

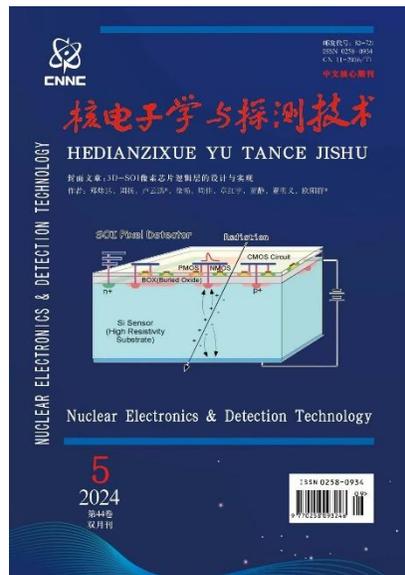


3D-SOI像素芯片的研究

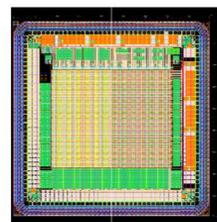
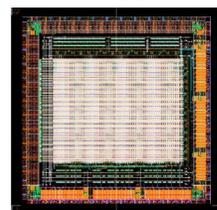
- NSFC重点项目，面向CEPC顶点探测器的高空间分辨率像素芯片研究
- 优化了CPV-4芯片的**垂直集成封装工艺**（关键难点）
 - 通过测试分析**指出**存在的问题
 - 与厂家共同**改进**工艺
- 完成了模拟芯片的激光响应测试（郑炜达）
 - 验证了传感器PDD结构与模拟前端的**兼容性**
 - 3D-SOI设计的关键点之一

2024年文章和报告：

- 1、核电子学与探测技术，**封面文章**
- 2、IEEE TNS，**会议论文**
- 3、Journal of Instrumentation，**会议论文**
- 4、半导体辐射探测器研讨会，**口头报告**

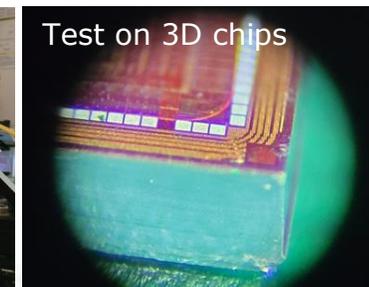
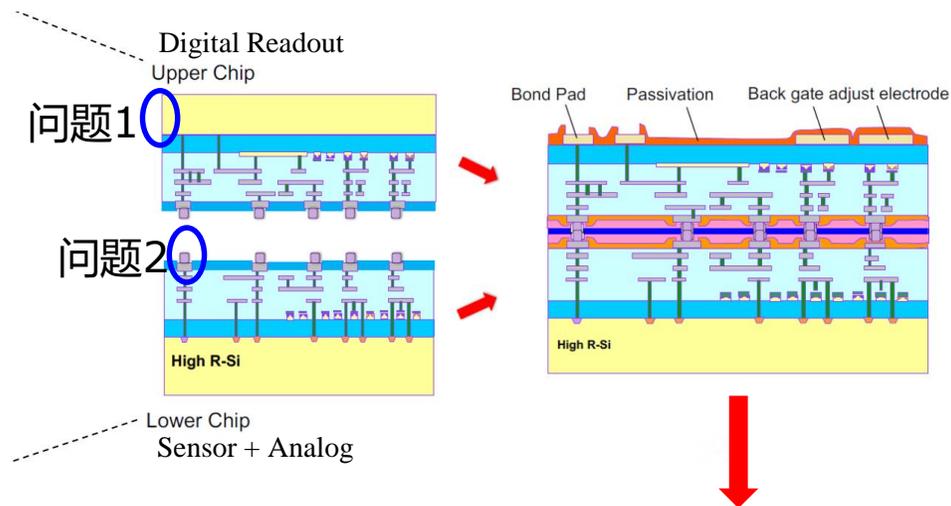


CPV4_Upper



CPV4_Lower

1. 上层芯片的减薄问题
2. Under-Bump-Metal层的缺失问题

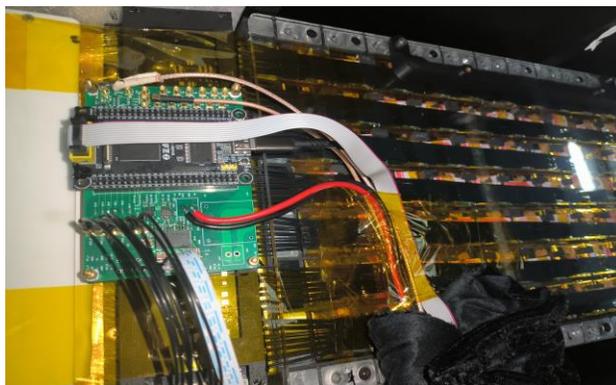


HERD实验在轨标定光源

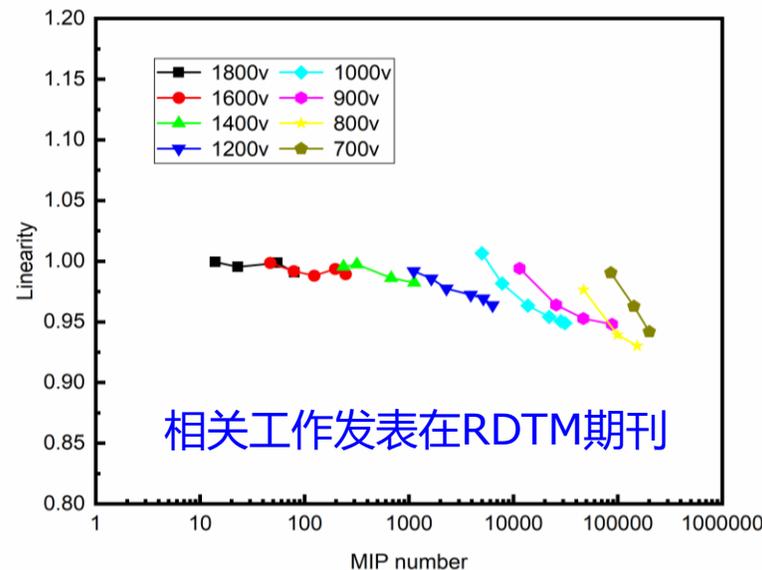
- HERD项目是空间天文和粒子天体物理实验，预计在中国空间站上运行10年以上
 - 其中核心的三维晶体量能器采用波长位移光纤+增强相机读出
- 在轨性能测试，需要一套高度集成和大动态范围LED光源系统
 - 光强可调范围**1MIP~2000MIP**，脉冲线性度优于 $\pm 5\%$ ，稳定性优于0.5%
 - 在非常狭小的空间内，安装**1058路LED与驱动电路**
- 完成了标定光源的概念设计和原理验证
 - 提供了一套资源需求小并且可灵活配置的设计方案
 - **总功耗54.1W**，支持在轨远程配置
 - 通过了初样设计评审和束流测试联试



Principle verification of the calibration light source subsystem for the calorimeter in herd experiment, *RDTM*, Volume 8, pages 1664–1671, (2024)



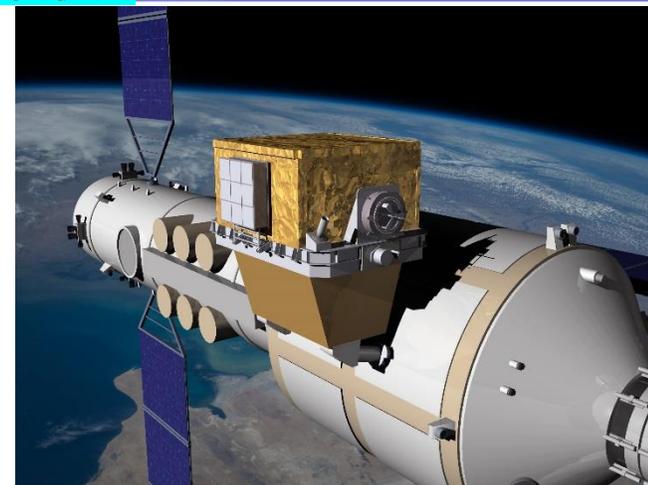
束流测试样机



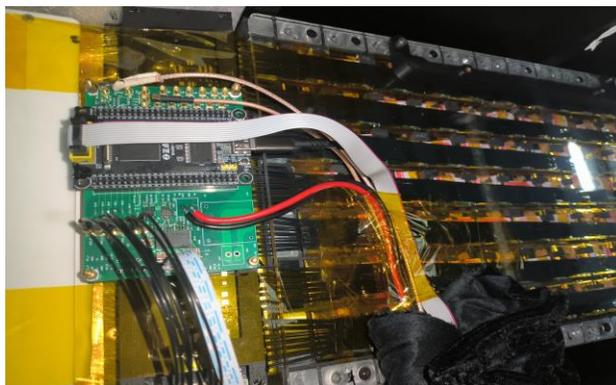
HERD实验在轨标定光源

注：HERD数据零压缩的工作主要于2022年完成，本次不报告

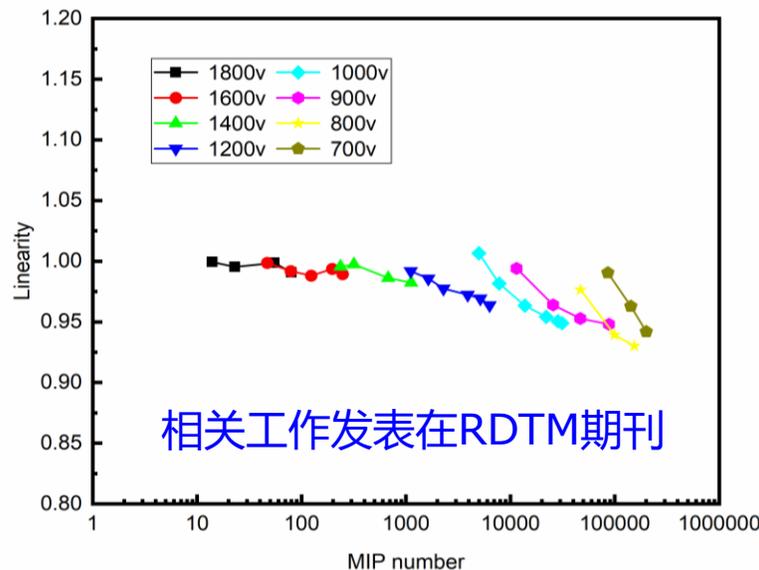
- HERD项目是空间天文和粒子天体物理实验，预计在中国空间站上运行10年以上
 - 其中核心的三维晶体量能器采用波长位移光纤+增强相机读出
- 在轨性能测试，需要一套高度集成和大动态范围LED光源系统
 - 光强可调范围**1MIP~2000MIP**，脉冲线性度优于 $\pm 5\%$ ，稳定性优于0.5%
 - 在非常狭小的空间内，安装**1058路LED与驱动电路**
- 完成了标定光源的概念设计和原理验证
 - 提供了一套资源需求小并且可灵活配置的设计方案
 - **总功耗54.1W**，支持在轨远程配置
 - 通过了初样设计评审和束流测试联试



Principle verification of the calibration light source subsystem for the calorimeter in herd experiment, *RDTM, Volume 8, pages 1664-1671, (2024)*



束流测试样机



相关工作发表在RDTM期刊

学生培养

■ 在读研究生2人

- 郑炜达，**粒子物理与原子核物理专业**，2022年入学，已发表一作文章1篇
- 郁晗，**集成电路工程专业**，2024年入学

■ 参与培养学生（**今年毕业3人**）

- 徐畅，核技术及应用专业，2022年入学，已发表一作文章2篇
- 陈干骏，，2023-2024，已发表一作文章1篇，湖南科技大学硕士在读
- 陈智良，张睿洋，JadePix-3的负偏压性能测试，中科大硕士在读
- 翟星晔，《CMOS像素探测器芯片JadePix-3的性能研究》，2023-2024，吉林大学硕士，已毕业
- 王安琪，《高空间分辨CMOS像素探测器的像素阵列研究》，2023-2024，国科大本科，已毕业
- 王云翔，《面向顶点探测器的CMOS像素传感器结构和读出电路研究》，2023-2024，国科大本科，已毕业

指导研究工作，并指导3篇毕业论文和3篇期刊论文的撰写



科研成果

■ 期刊文章 (通讯作者4篇, 共同作者2篇)

[1] Performance study of the JadePix-3 telescope from a beam test, **NIMA** 1065 (2024) 169551, 通讯作者

[2] 3D-integrated pixel circuit for a low power and small pitch SOI sensor, **JINST** 19 (2024) C02046, 通讯作者

[3] Principle verification of the calibration light source subsystem for the calorimeter in herd experiment, **RDTM** 8 (2024) 1664, 通讯作者

[4] 3D-SOI像素芯片逻辑层的设计与实现, **核电子学与探测技术**, vol. 44 (2024) 791, 通讯作者

[5] An FPGA-Based Emulator and Test System for the 3D-SOI chip CPV-4, **IEEE/TNS**, accepted, 共同作者

[6] Feasibility study of CMOS sensors in 55 nm process for tracking, **NIMA** 1069 (2024) 169905, 共同作者



项目经费

■ 项目与经费

- 3个在研项目，执行到2024年
- **新增2项重点研发计划**，执行到2027/2028年

项目名称	项目来源	本人分工	本人负责经费	执行年限
高能加速器关键技术研究	科技部重点研发计划 (CEPC第三期)	课题骨干成员	/	2024-2028
用于对撞机实验和其它应用的单片有源硅像素探测器	科技部重点研发计划 (NICA第二期)	课题骨干成员	/	2025-2027
粒子和空间辐射前沿探测技术研究	中科院培育	硅探测器子课题 负责人	130万	2021-2024
重离子超导同步加速器 (NICA) 上的关键技术合作研究	科技部重点研发计划	硅探测器课题 高能所负责人	360万	2020-2024
高精度SOI像素顶点探测器研究	NSFC重点	芯片设计子课题 负责人	160万	2020-2024



学术发展规划与学术交流

■ 学术发展规划：发展先进硅像素探测器技术

- 立足国外成熟工艺开展**设计迭代**，尽快实现**可实用化芯片**
- 积极参与国内先进工艺的开发
- 关注国外同类型芯片的spin-off应用（以应用促发展）

■ 本年度学术交流

- **IPHC-IHEP合作**：《Common R&D efforts on CMOS pixel sensors for the experiment of electron-positron colliders》，中法粒子物理研讨会（FCPPL 2024）学术报告
- **专业领域内交流**：《3 D - S O I 工艺的像素探测器芯片研发进展》，第四届半导体辐射探测器研讨会
- **CEPC项目交流**：The 2024 International Workshop on the High Energy Circular Electron Positron Collider



公共服务

- 期刊文章评审
 - Nuclear Technology, 1篇
 - IEEE TNS, 2篇
- 研究生学位论文开题评审
 - 2024年5月17日
- 推免生交流会
 - 2024年6月22日
- 部门年终考核材料
 - 硅像素顶点探测器研究工作亮点
 - HERD实验研究工作亮点



四、存在问题：人力短缺

不同层面的缺人	应对策略
<p>缺稳定的团队成员</p> <ul style="list-style-type: none">• 客座的本科生和研究生，基础薄弱，培训周期长，流动性大	<p>收缩战线，聚焦芯片设计，把芯片测试交给别人</p>
<p>缺集成电路设计人员</p> <ul style="list-style-type: none">• 粒子物理与原子核物理专业的学生很难参与芯片设计	<p>跨学科专业招生，核技术及应用专业，包括工程硕士</p>
<p>缺数字集成电路设计人员</p> <ul style="list-style-type: none">• 目前的设计力量集中在传感器和模拟前端	<p>拓展专业技能，学习掌握数字集成电路设计流程</p> <ul style="list-style-type: none">• 需要投入几个月时间• 但是能够充分利用FPGA设计的丰富经验

自力更生，艰苦奋斗



下年度工作计划

■ 面向CEPC/MOST3项目的考核指标，完成一个小面积的HR-CMOS测试芯片设计

- 位置分辨 < 3um, 平均功耗 < 100 mW/cm², 定时精度 < 100 ns
- 已经提出设计想法，在JadePix-5的基础上进一步缩小像素尺寸

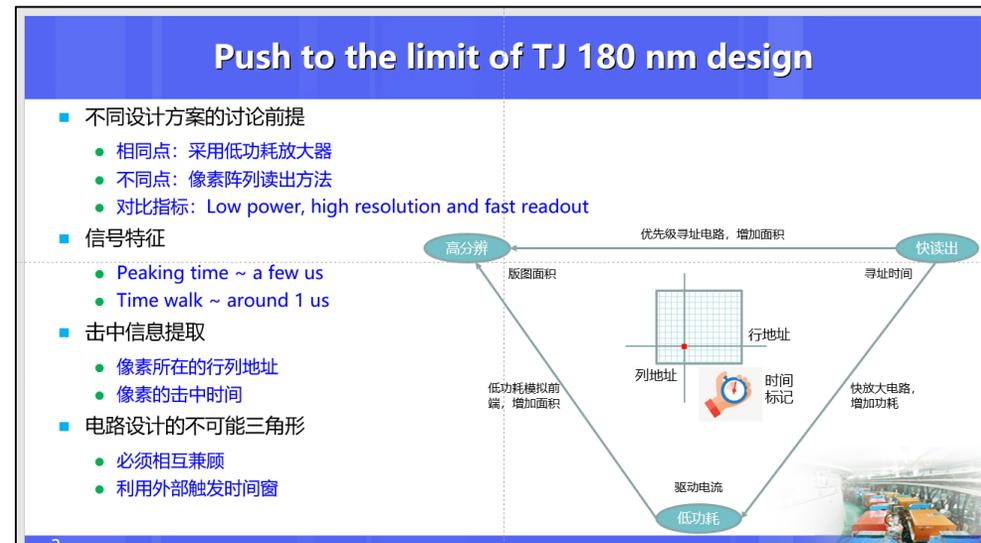
■ HERD实验的初样研制

- 增强相机数据零压缩的参数优化与格式匹配
- 标定光源子系统的样机联试

其它：

- 现有工作的自然承接：JadePix-5测试，国内工艺研发等
- 中心和组里可能安排的工作

计划在MOST3年会讨论



谢谢关注!