



年度考核报告

赵梅

中国科学院高能物理研究所
实验物理中心 电子学组



岗位职责

▶ 硅探测器设计与性能研究

LGAD探测器、AC-LGAD探测器、SiPM探测器、HVCMOS探测器

▶ 完成项目内承担的各项工

ATLAS HGTD项目、CEPC Ref-TDR河南项目、MOST 项目、所创新、自然科学基金面上项目

▶ 完成领导交予的其他工作

本年度工作

▶ ATLAS HGTD LGAD探测器研究

▶ AC-LGAD探测器研究

▶ 高压CMOS硅像素探测器研究

▶ 抗辐照SiPM器件研究

▶ 其他工作

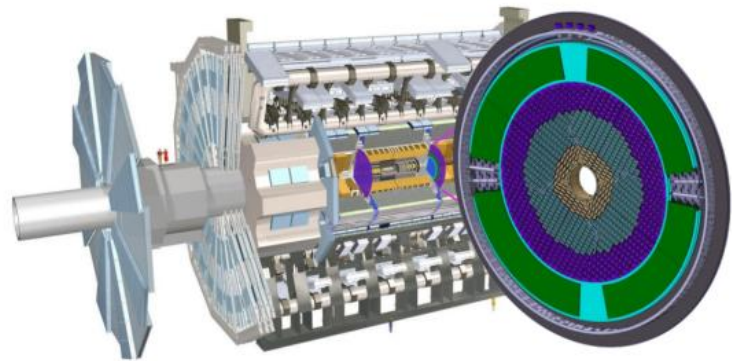


ATLAS HGTD项目—LGAD探测器

➤ ATLAS LHC升级HGTD项目

HGTD: High Granularity Timing Detector
高颗粒度高时间分辨探测器

➤ LGAD传感器: Low Gain Avalanche Diode 总面积6.4m², ~21000个LGAD sensor



参数要求:

像素大小: 1.3 x 1.3 mm²

像素阵列: 15x15

工作电压: <550V

时间分辨率: <50ps

抗辐照特性: 2.5e15 n_{eq}/cm²

Hit efficiency at normal incidence with discrete/testing electronics and ALTRIROC (central part of pad ~1x1 mm ²)	> 97% (>95%) before (after) irradiation
Time resolution (discrete/testing electronics)	<40 ps (<50 ps) before (after) irradiation
Time resolution (ALTRIROC)	<50 ps (<70 ps) before (after) irradiation
Collected charge	>10 fC (>4 fC) before (after) irradiation
pad leakage current	<5 μA
Maximum V _{op}	11 V/μm · D
Power supply limit at the sensors	800 V

➤ 现有研究单位:

西班牙CNM、日本滨松HPK、意大利FBK, 中国NDL, 中国USTC等



ATLAS HGTD项目—LGAD探测器

□ ATLAS HGTD项目LGAD器件研究工作（sensor部分L2协调负责人）

□ 高能所自主研发LGAD芯片方面：

IHEP-IMEv1(2020.9)，性能满足HGTD项目要求

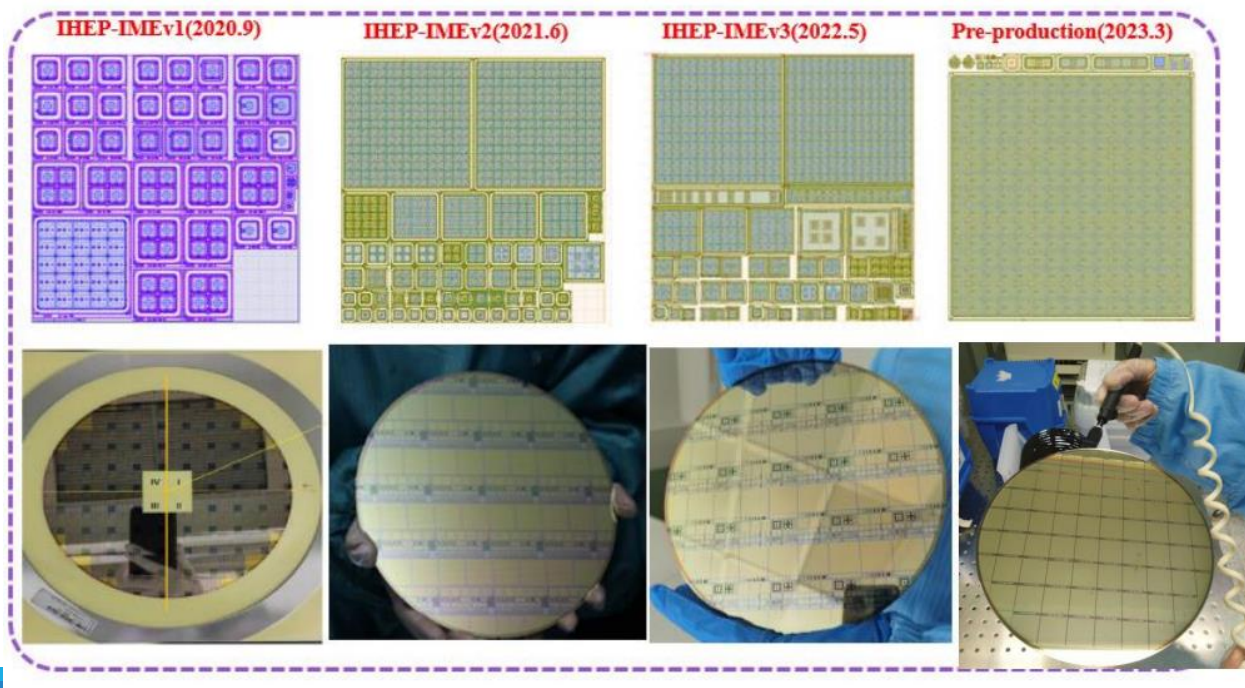
IHEP-IMEv2(2021.6)，具有最优的抗辐照性能，大阵列器件

IHEP-IMEv3(2022.5)，工艺重复性验证，优化大阵列器件设计

2023年-2024年完成批量预生产

2024年10月开始正式生产

HGTD sensor部分
L2协调负责人
仿真、设计与测试
负责人：
赵梅





ATLAS HGTD项目—LGAD探测器

本年度具体工作

sensor预生产

- sensor预生产完成
- 性能评估完成
- 与ASIC联调测试
- 束流测试
- 预生产器件通过PRR

sensor正式生产

- 正式生产版图微调完成
- 流片进行中

测试系统

- 质量监控测试系统
与CERN、JSI、USP等单位一样

LGAD特性研究

- Sensor温度特性
- Sensor抗辐照特性

L2协调工作

- 国内器件生产
- 国内外单位测试工作
- HGTD sensor双周会议与季度会议
- HGTD 项目sensor计划与总结
- 参与人员工作评估

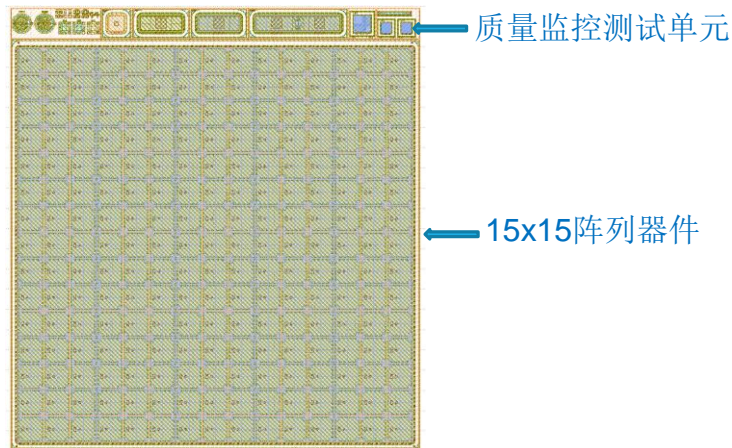


ATLAS HGTD项目—LGAD探测器

➤ 预生产sensor设计、制备、性能验证

➤ IHEP芯片设计

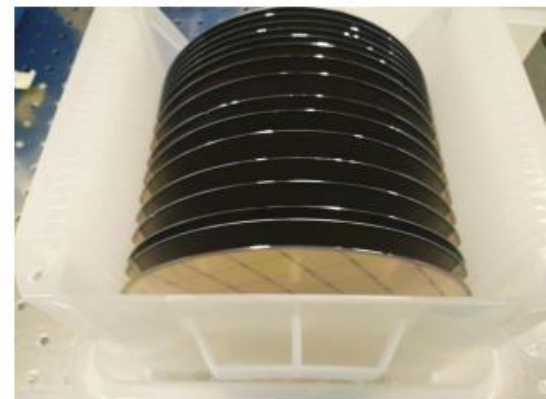
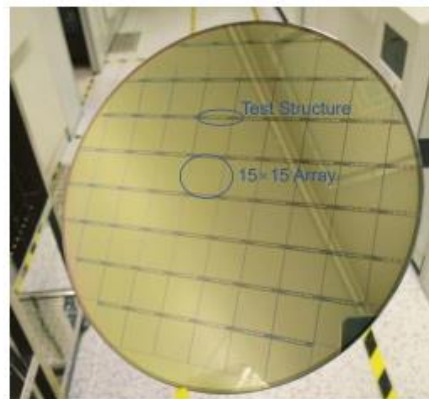
- 优化设计大阵列器件外围保护环结构
- 包含工艺验证测试结构



➤ 预生产完成情况

HGTD项目需求1085颗

Pre-production	Wafers		Sensors		
	IHEP-IME	USTC-IME	IHEP-IME	USTC-IME	Total
Fabricated	90	27	4680	1404	6084
Passing preproduction requirements	52	13	1702	208	1910
Pre-production with UBM, diced and tested by HGTD	23	5	789	118	907



其他参与人员：孙维益(学生)，张田园(学生)，梁志均



ATLAS HGTD项目—LGAD探测器

预生产sensor设计、制备、性能验证

- Vendor测试数据分析，确定是否满足HGTD Specification
- Sensor 抽检与测试，IHEP测试：大阵列芯片测试，QC-TS结构的各项性能测试

IHEP-IME:
52 wafers be tested by IME.
Good sensors~1700

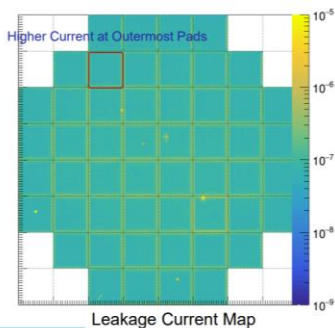
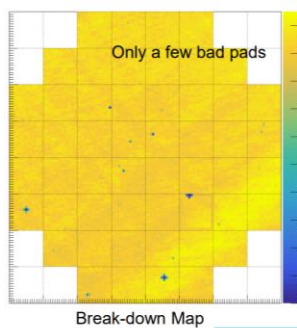
Here is list of 27 wafers that be diged and tested by HGTD (23 wafers with UBM, Good sensors with UBM: 789)

ATLAS ID	IHEP-IME ID	thickness(um)	Average Vbd (V)	good sensor number per wafer	sensor yield	UBM
20WS0000110002	v1-R2(w1)	775	212.7	19	36.50%	no
20WS0000110003	v1-R3(w2)	775	222.5	25	48%	no
20WS0000110016	v1-A16(w3)	775	196	18	35%	no
20WS0000200012	v2-12(w4)	775	180.8	39	75%	no
20WS0000110015	v1A15	775	217.7	22	48%	yes
20WS0000110005	v1R5	300	190	42	80.77%	yes
20WS0000200016	v216	300	201.7	40	76.92%	yes
20WS0000300010	V310	300	196.1	31	59.62%	yes
20WS0000400007	V4-7	300	169.9	31	59.62%	yes
20WS0000400009	V4-9	300	168.2	33	63.46%	yes
20WS0000400011	V4-11	300	170.8	39	75.00%	yes
20WS0000400012	V4-12	300	170.7	33	63.46%	yes
20WS0000400014	V4-14	300	162.1	30	57.69%	yes
20WS0000400015	V4-15	300	172	39	75.00%	yes
20WS0000400020	V4-20	300	177.8	28	53.85%	yes
20WS0000400022	V4-22	300	160	26	50.00%	yes
20WS0000400024	V4-24	300	178.1	31	59.62%	yes
20WS0000400001	V4-1	300	178.1	43	82.69%	yes
20WS0000400003	V4-3	300	167.4	6	11.54%	yes
20WS0000400013	V4-13	300	174.9	40	76.92%	yes
20WS0000400023	V4-23	300	164.8	34	65.38%	yes
20WS0000300001	V3-1	300	178.1	43	82.69%	yes
20WS0000300005	V3-5	300	172.3	36	69.23%	yes
20WS0000300015	V3-15	300	177.6	38	73.08%	yes
20WS0000300022	V3-22	300	176.6	44	84.62%	yes
20WS0000300023	V3-23	300	171.1	39	75.00%	yes
20WS0000300024	V3-24	300	174.3	41	78.85%	yes

预生产LGAD器件特性满足项目要求:

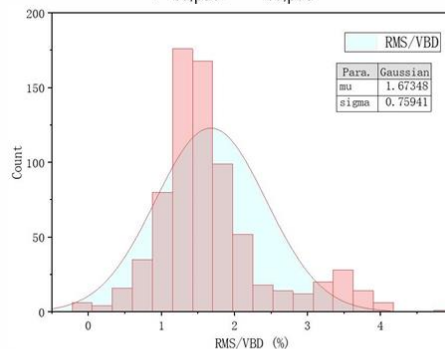
- Vendor 测试、数据上传
- IHEP大阵列抽检测试
- CERN、USP等单位质量监控测试
- JSI 抗辐照性能测试

2024年7月预生产的评审PRR通过



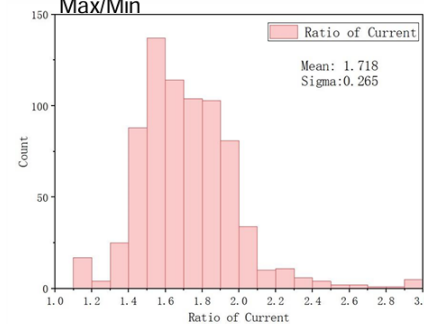
Break-down Voltage: 188.0±8.53 V
Leakage Current: 9.3E-8 A
Yield:
Sensor: 46(88.5%) Pad: 11675 (99.8%)

$RMS(V_{bd,pad}) / <V_{bd,pad}>$



$RMS(V_{bd,pad}) / <V_{bd,pad}>$ of all the sensors are less then 0.05

Pad leakage current spread at 0.8V_{bd}, Max/Min



Pad leakage current spread at 0.8V_{bd}, peak to peak within a factor of 3X

其他参与人员：孙维益(学生)，张田园(学生)，梁志均



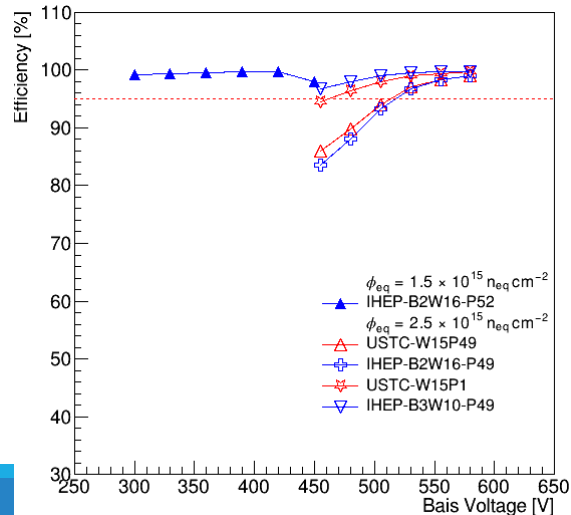
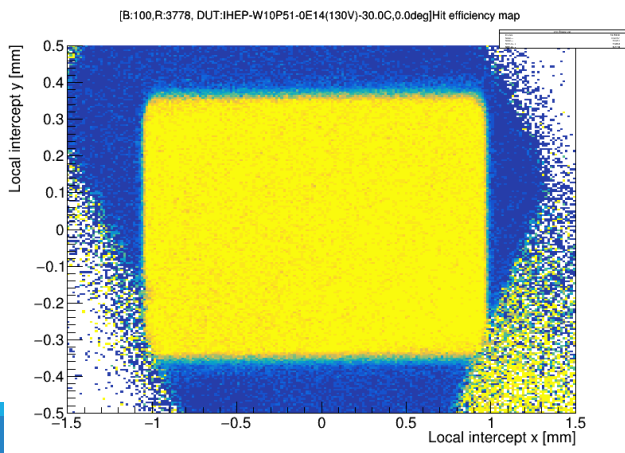
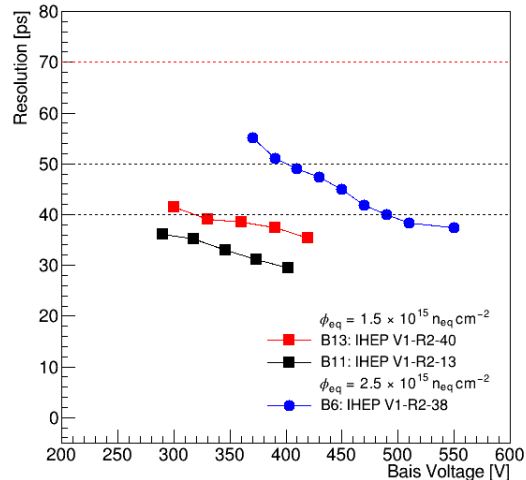
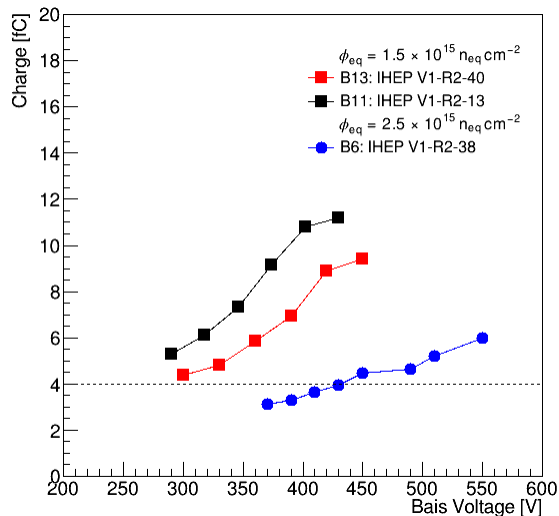
ATLAS HGTD项目—LGAD探测器

► 预生产sensor设计、制备、性能验证

• 辐照前后器件性能测试（束流测试）

预生产LGAD器件辐照前后的时间和收集电荷性能完全满足项目指标要求

（项目指标辐照后>4fC,时间性能好于50ps）



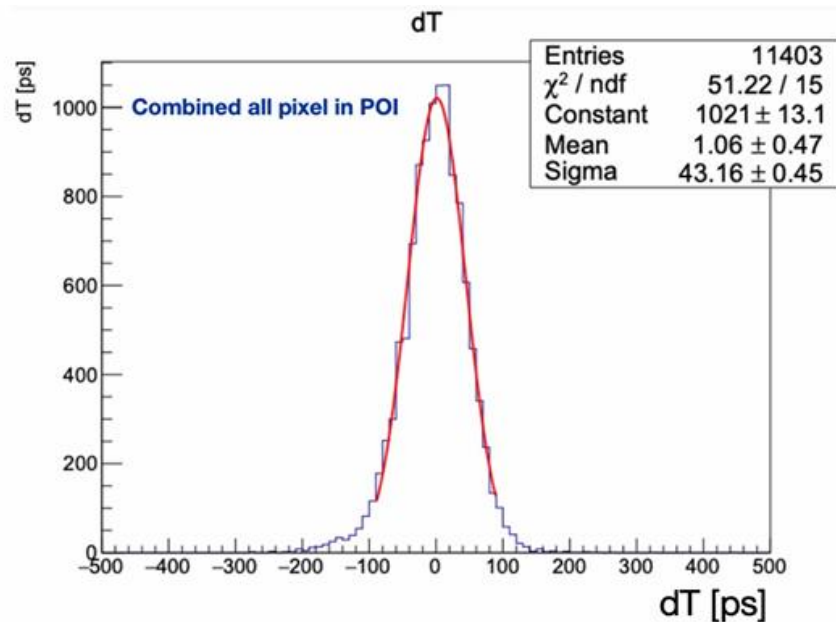
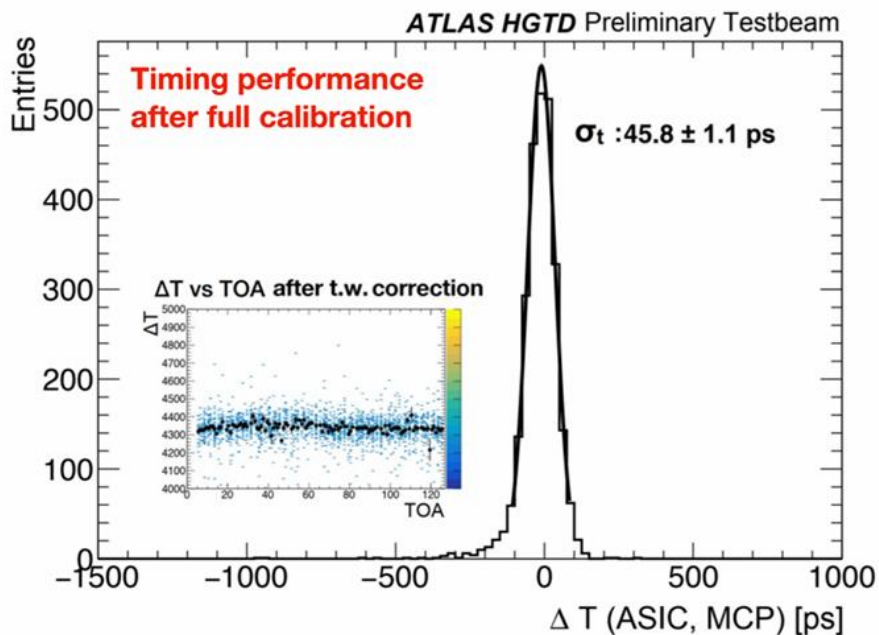
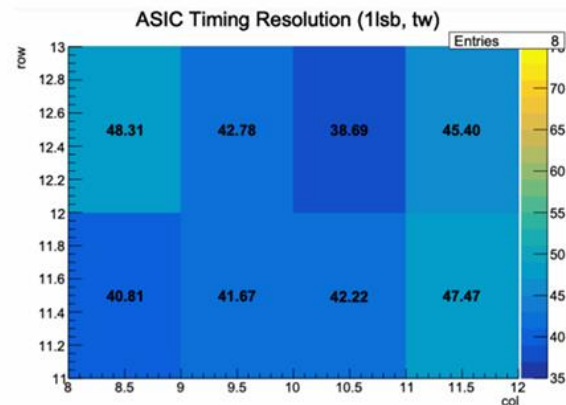
其他参与人员:
Khuram, 大川



ATLAS HGTD项目—LGAD探测器

➤ 预生产sensor设计、制备、性能验证

- **Sensor与ASIC键合良好，模块辐照前后时间分辨均可达到50ps以下**



其他参与人员：杨轩（博后），孙维益（学生），贾雪薇（学生），梁志均，庄胥爱



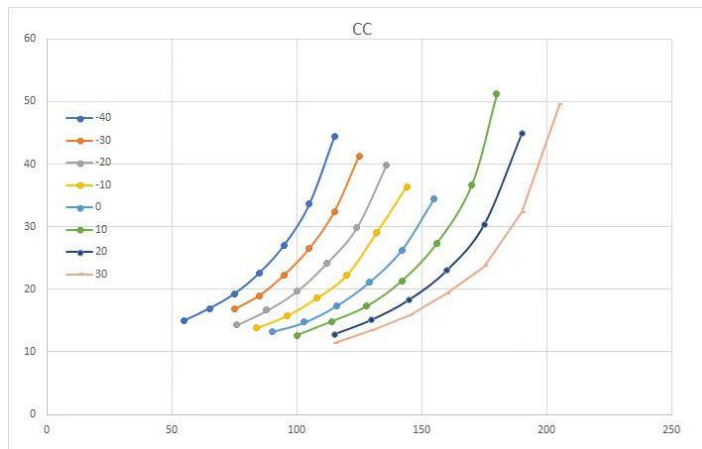
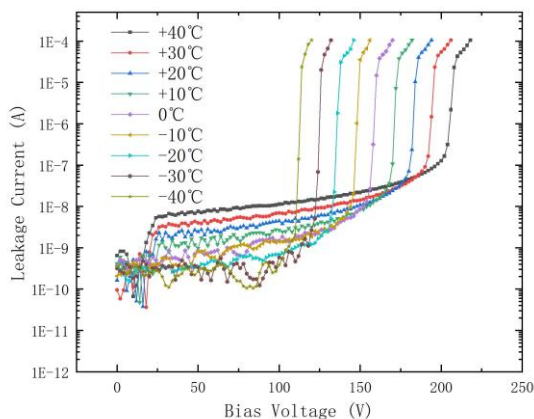
LGAD探测器

➤ LGAD温度特性与抗辐照性能研究

温度特性: 器件击穿、时间分辨、收集电荷等性能随温度变化的特性研究

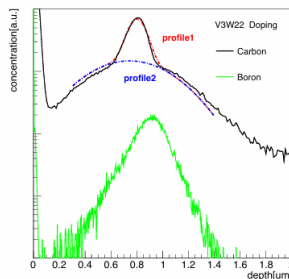
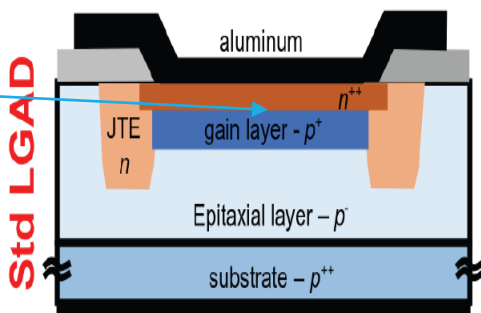
抗辐照特性: 不同注碳工艺, 不同EPI层厚度等

温度



其他参与人员:
孙维益(学生),
梁志均

掺碳工艺



深掺碳

A simple monte carlo scheme

Wafer	W20	W21	W22	W0
C (1e-16cm2) proton	2.48	1.63	1.44	3.11
C (1e-16cm2) neutron	-	-	-	1.06
C (neutron) Assumption 1	1.18	0.74	0.50	-
C (neutron) Assumption 2		0.82	0.70	
Ratio (proton / neutron)	2.10	2.20	2.88	2.93
		1.99	2.06	

其他参与人员:
冯缘(学生),
樊云云, 梁志均

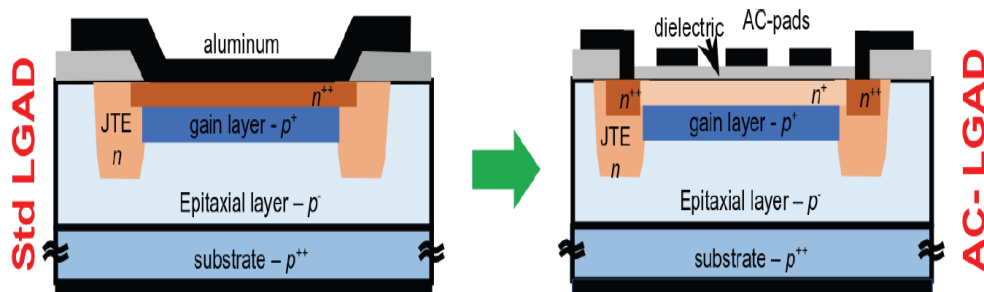
DRD3 project: Study of irradiation characteristics of carbon enriched LGAD for high radiation fluence application



AC-LGAD探测器研究

➤ AC-LGAD器件

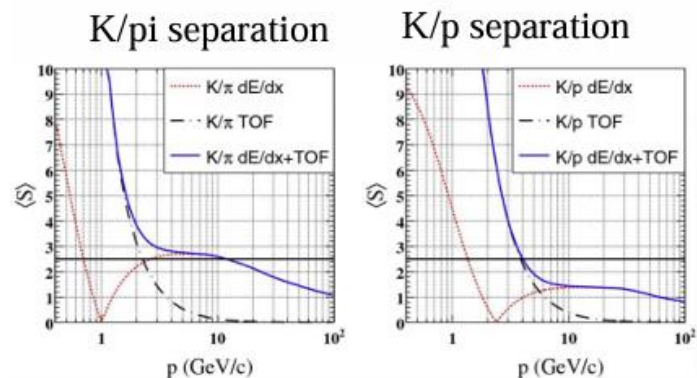
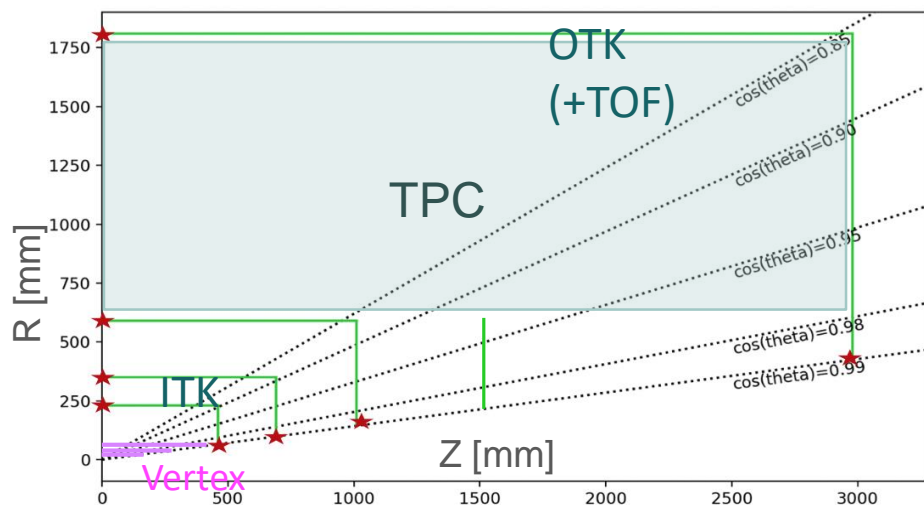
- 填充系数100%，可实现 $<10\mu\text{m}$ 位置分辨
- 兼具高时间（50ps）与空间（ $<10\mu\text{m}$ ）分辨率
- CEPC内部和端盖的baseline方案



AC-LGAD器件：在LGAD器件内部放置交流耦合的像素单元与电极，所有像素单元共用一个增益层

优点：可以只在像素阵列外围设置保护环结构而中间无需类似结构，在器件内部几乎无探测死区。

➤ CEPC OTK&TOF应用





AC-LGAD探测器研究

▶ 本年度具体工作

- AC-LGAD器件性能测试
- CEPC Ref-TDR 方案讨论与撰写
- 针对CEPC应用，进行第三版芯片仿真、设计

IHEP AC-LGAD R&Dv2 测试

- 器件测试板制备
- 器件性能测试
(IV, CV, 时间、位置)

CEPC Ref-TDR

- 方案讨论
- 探测器性能评估
- 河南项目预算与申请书撰写
- TDR文案撰写

CEPC应用AC-LGAD设计

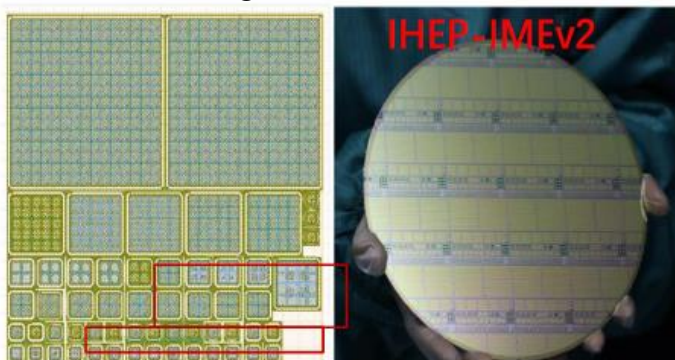
- 芯片仿真
- 版图设计
- 工艺参数设定
- 低噪声2级测试板设计



AC-LGAD探测器研究

➤ AC-LGAD器件流片

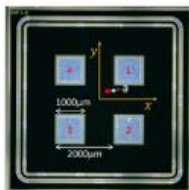
2022



AC-LGAD R&Dv1:

Pixeled AC-LGAD

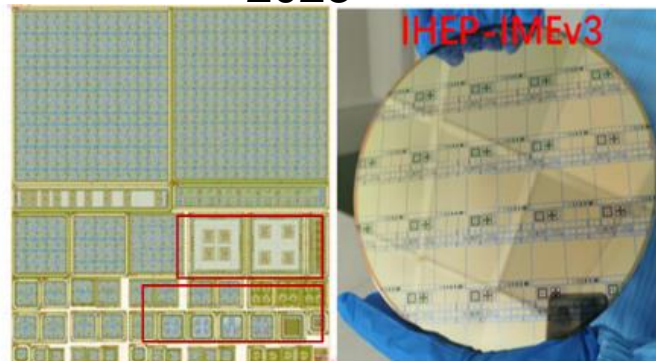
- With different pad-pitch size
 - 1000-2000um
 - 100-500um
 - 100-200um
 - 50-100um
- wafers: with different n+ dose: 10P to 0.2P



Process parameters be studied.

The performance of large-pitch AC-LGAD with different N+ dose, Trans. Nucl. Sci., 2023.6

2023



AC-LGAD R&Dv2:

Pixeled and strip AC-LGAD

- With different pad-pitch size
 - 1000-2000um pixel
 - 100-250um strip
 - 100-150um strip
 - 50-100um strip
- wafers: with different n+ dose: 0.2P to 0.01P



The performance of AC-coupled Strip LGAD developed by IHEP, NIMA, Volume 1062, May 2024, 169203

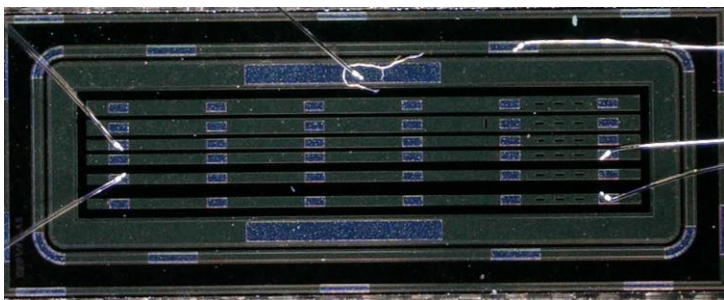
工艺与设计、测试负责人：赵梅

参与人员：李梦朝（博后），孙维益（学生），梁志均
张晓旭（南大学生），张雷（南大）

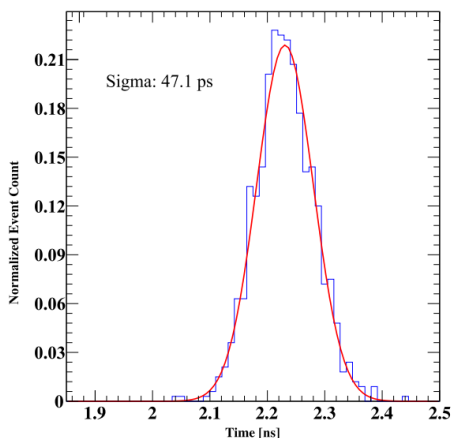


AC-LGAD四维探测器研究

➤ AC-LGAD器件R&D v2测试

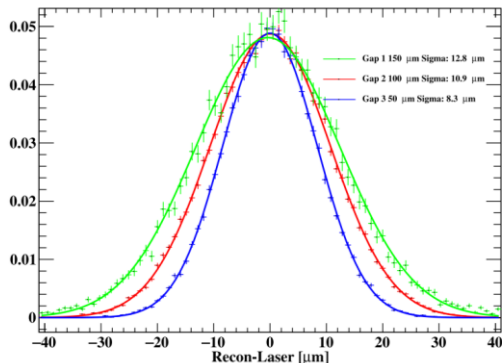


5.6mm长条AC-LGAD器件

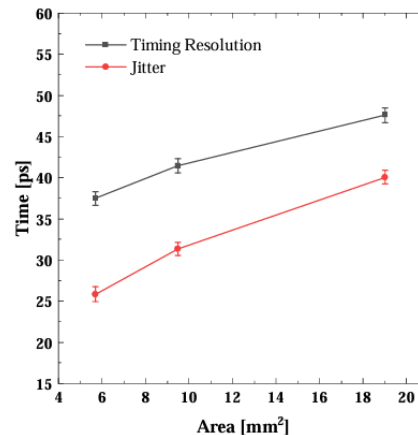
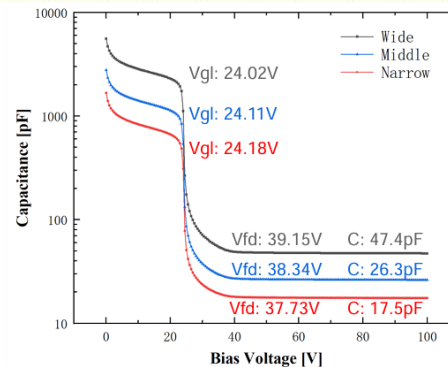
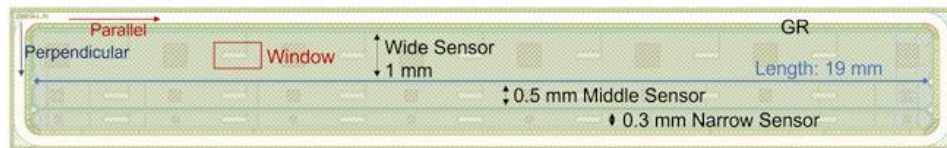


时间37.5ps (Beta测试)

位置8.3um (激光测试)



19mm长条DC-LGAD器件



长条形器件的电容和时间分辨

其他参与人员: 李梦朝 (博后), 孙维益 (学生), 梁志均 张晓旭 (南大学生), 张雷 (南大)

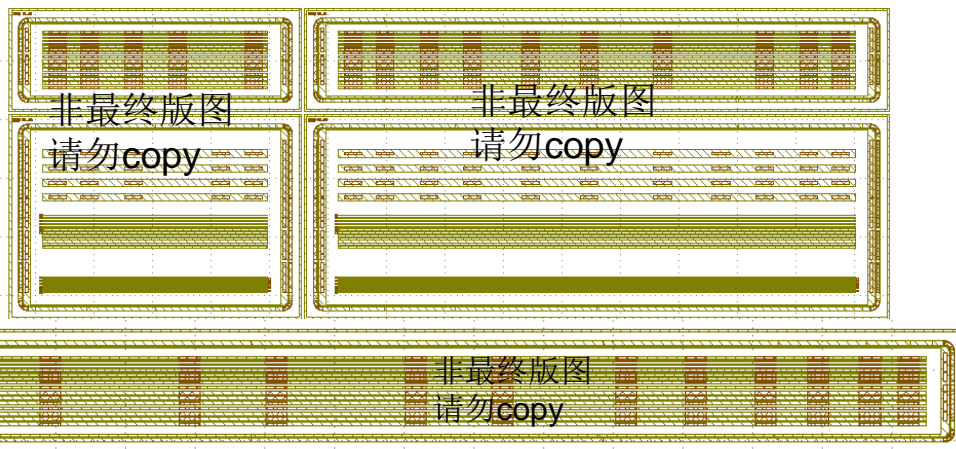
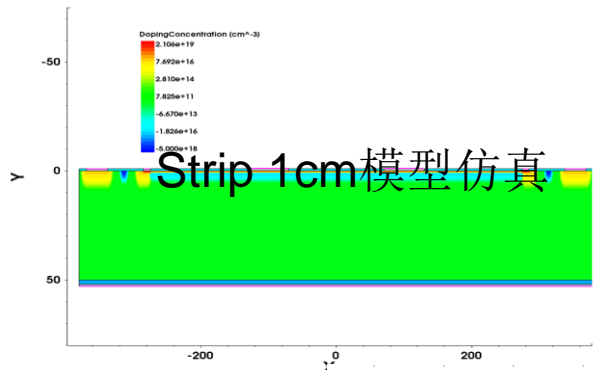


AC-LGAD探测器研究

➤ CEPC应用的AC-LGAD设计

➤ 版图方面：仿真与设计进行中

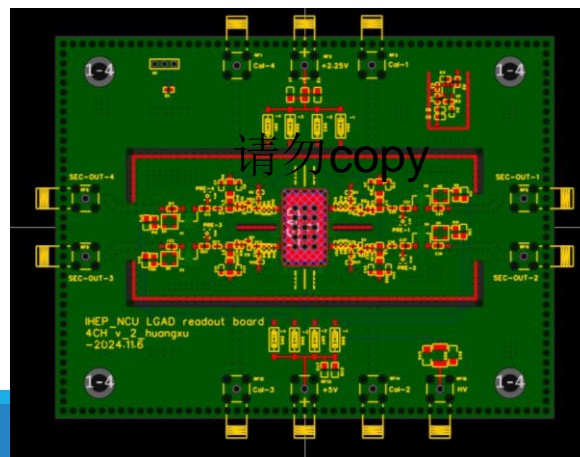
针对CEPC TOF应用，设计大面积的 strip型器件 4cm, 2cm, 1cm长，Pitch尺寸，50um-500um



➤ 结构和工艺方面进行调整，以优化电容、信号收集、位置分辨等性能

➤ PCB测试板优化设计（束流测试）
4通道快时间信号测试板优化设计（2级放大，低噪声）

参与人员：李梦朝(博后，东莞入职)，吴天涯(南昌大学)





AC-LGAD探测器研究

➤ CEPC Ref-TDR工作

- 参与物理、软件、探测器、电子学、机械讨论
- 进行探测器性能评估与结构优化设计
- 流片厂家联系与沟通
- 文字撰写（AC-LGAD R&D 设计和性能）

➤ DRD3 AC-LGADs for electron colliders项目

- 组织并召集国内外单位讨论AC-LGAD性能研究

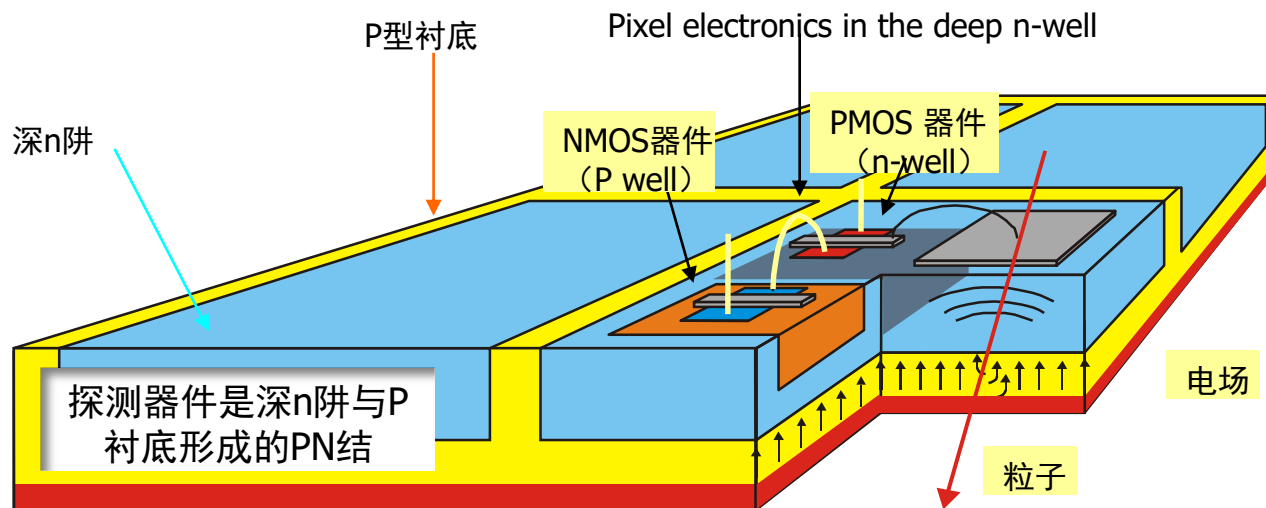
IHEP, JSI, Montenegro team, 山大, 南开, 郑大, 上交, 1个国外单位待定



高压CMOS硅像素探测器研究

► 高压CMOS硅像素探测器

深n阱与衬底间形成耗尽层，作为探测灵敏区
在深n阱内可放置其他MOS器件



应用前景：CEPC ITK，LHCb升级等

本年度工作：

► 基于55nm工艺第二版传感器仿真与sensor测试

合作人员：李一鸣，陆卫国，周扬，徐子骏，项治宇等



高压CMOS硅像素探测器研究

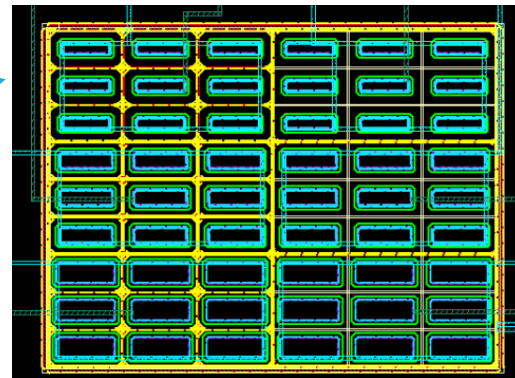
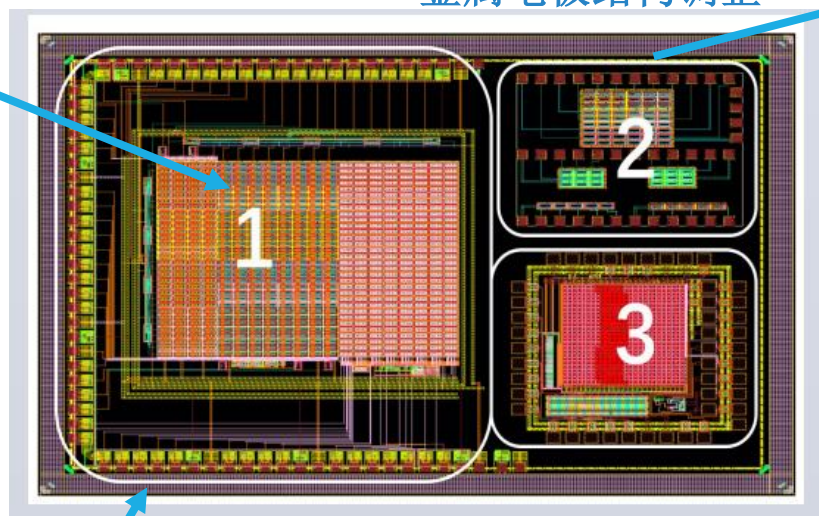
➤ 基于55nm高压工艺-HVCMOS设计 (COFFEE2)

像素尺寸40um*80um，像素阵列：32x20

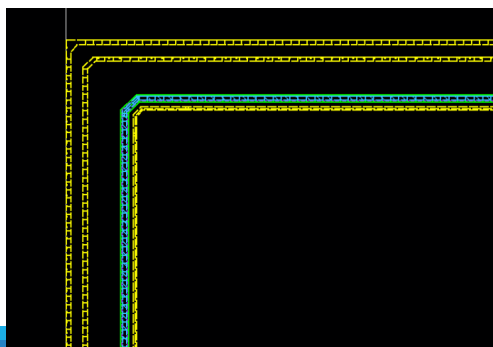
测试单元：深n阱与
金属电极结构调整

仅列出自己的工作

阵列内部像素
传感器设计



芯片整体外围保
护环结构设计



D: Distance between two pixels
 Type 1: D:10um, with Pstop
 Type 2: D:15um, with Pstop
 Type 3: D:20um, with Pstop
 Type 4: D:10um, without Pstop
 Type 5: D:15um, without Pstop
 Type 6: D:20um, without Pstop

合作人员：李一鸣，陆卫国，周扬，徐子骏，项治宇等

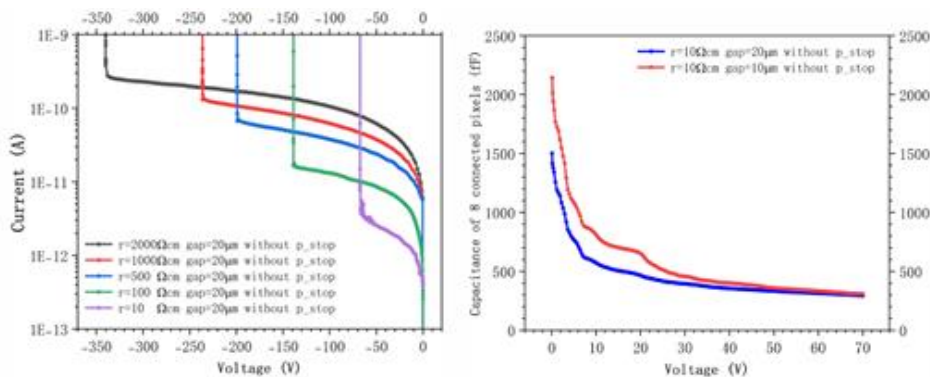
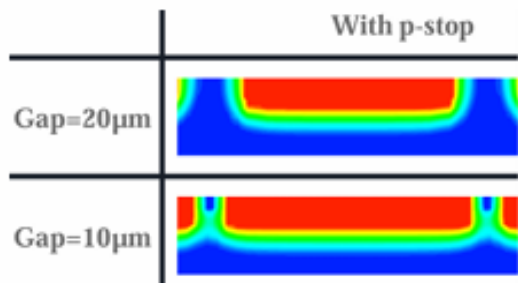


高压CMOS硅像素探测器研究

► 仿真工作

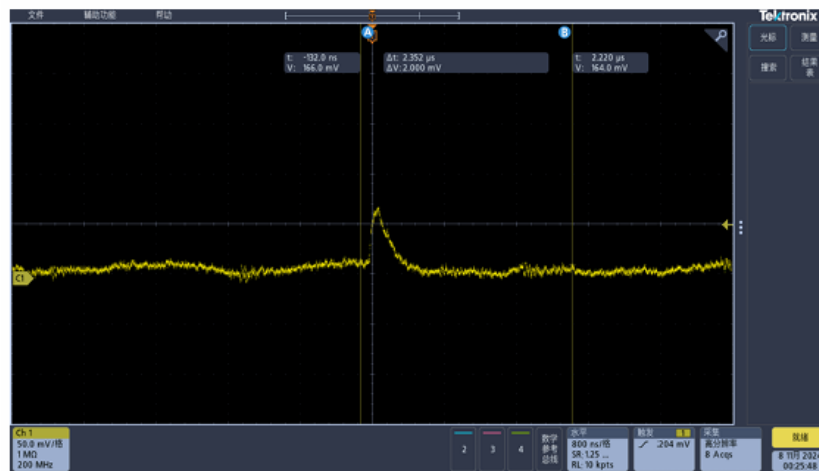
(项治宇, 邓建鹏(浙大学生))

仿真结果与测试结果吻合IV, CV



► 测试结果 (项治宇, 徐子骏等)

Beta与Fe55均有信号响应



合作人员: 李一鸣, 陆卫国, 周扬, 徐子骏, 项治宇等



抗辐照SiPM器件研究

➤ 抗辐照SiPM器件

➤ 工作倍增区的雪崩倍增二极管

(与LGAD不同的是倍增区工艺)

➤ 应用广泛：HERD, LACT, CMS, CEPC量能器等

➤ 天体、高能物理应用需要抗辐照性能

➤ 目前器件抗辐照性能：

辐照后，增益下降，暗噪声增多，能量分辨下降

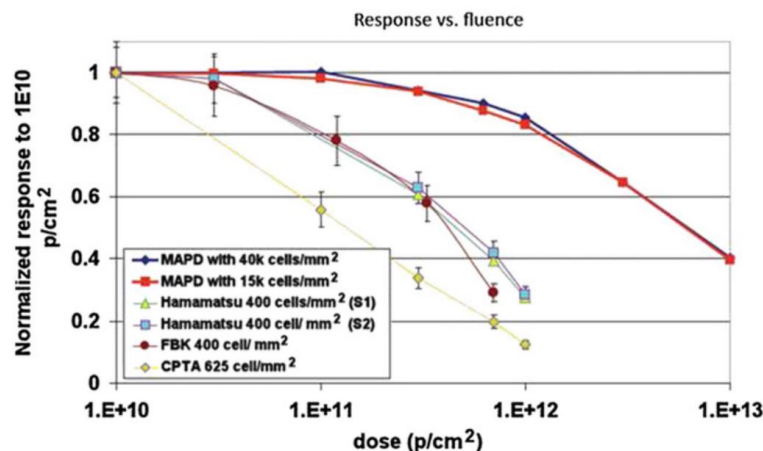
一般辐照情况：1krad or 10^9 n_{eq}/cm²

➤ 本年度工作：

- 第一版SiPM器件

工艺与结构仿真，版图绘制，晶圆购置，提交流片

	Long term Satellite or Space station application	CEPC requirement
TID does	100 krad	>100 krad
Fluence	$\sim 10^{10}$ n _{eq} /cm ²	$>10^{13}$ n _{eq} /cm ²



参与人员：李梦朝(博士后)，孙维益(学生)，张田园(学生)，梁志均

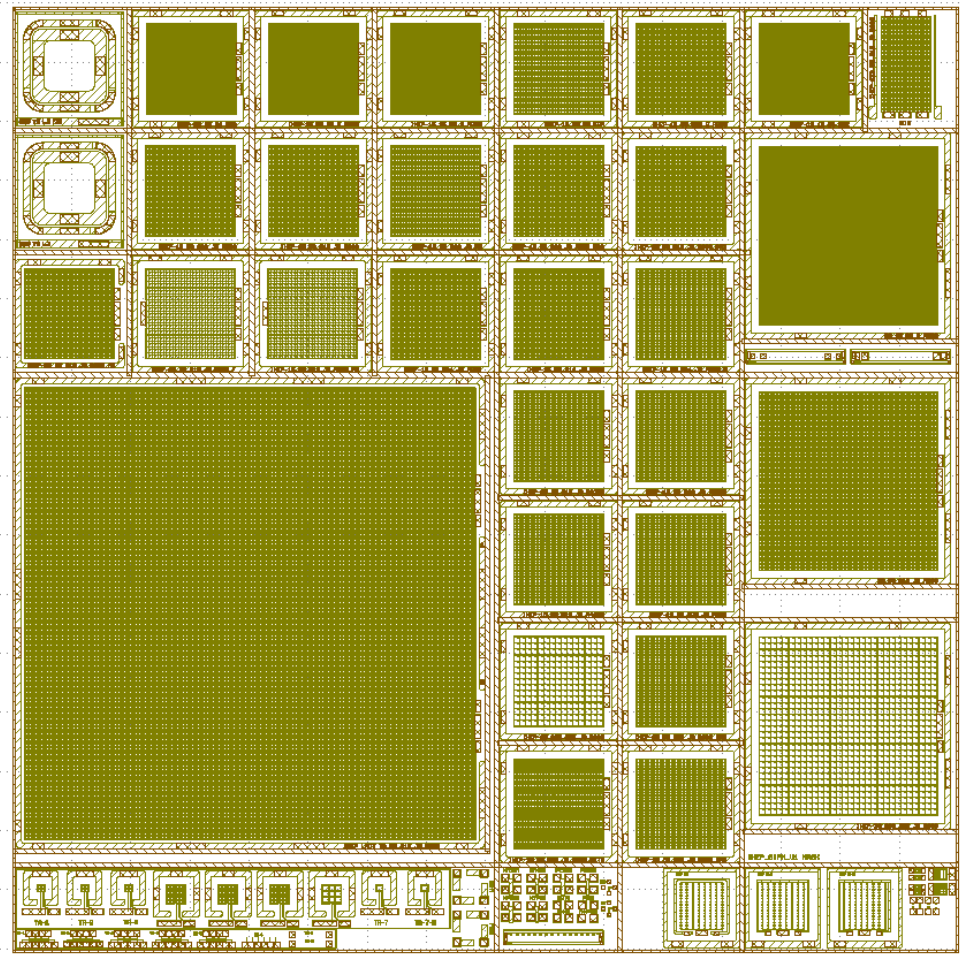


抗辐照SiPM器件研究

➤ SiPM第一版版图与流片

- 根据应用需求，初步设计了具有不同像素大小，阵列规模的SiPM器件（SiPM size: 1.5x1.5mm, 3x3mm, 7.6x7.6mm, Pixel size: 10um, 20um, 50um, 100um）
- 衬底晶圆购置完成
- 工艺步骤中所需要所有的工艺参数设计仿真完成
- 2024年6月提交流片

● 赵梅，李梦朝(博后)，梁志均





其他工作：LGAD探测器研究与应用拓展

➤ LGAD探测器研究与应用拓展

X射线探测

- Fe55初步测试（多学科、天体）
- 后续进行时间、能量分辨测试
- 针对X射线探测应用进行LGAD优化设计

项目申请: 2025年国家重点研发计划项目-大装置前沿研究专项

合作人员: 徐伟（多学科），李秋菊（多学科），USP（巴西）

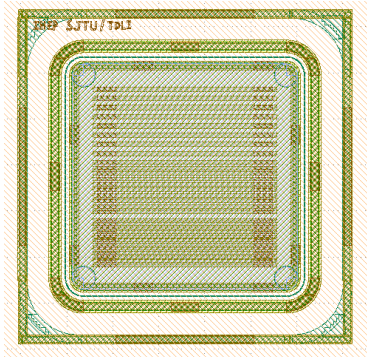
Lumical

- ATLAS BMA(LUCID):
提供器件应用于luminosity测试，根据需求新设计器件
- CEPC Lumical:
LGAD方案讨论与完善
新型LGAD性能仿真

合作人员: 杨轩（博后），樊云云
石漪巧，张雷(南大)，侯书云

Darkshine

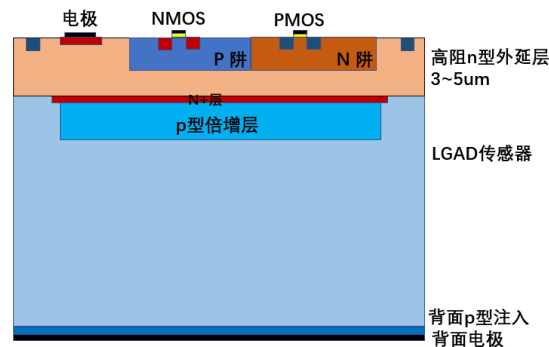
针对这一应用设计芯片流片完成了时间、位置分辨测试（上交）
发表论文一篇（NST）



合作人员: 李梦朝（博后），梁志均，刘坤(上交-李所)

Monolithic LGAD

初步开始仿真和电路设计工作



核电子学重点实验室项目

合作人员: 孙维益（学生），黄文豪（学生），叶竞波



项目

本年度申请项目：

- 1、核电子学重点实验室项目：LGAD探测器与读出电路集成化研究，20万，2024.6-2025.3，负责人，获批
- 2、科技部国家重点研发(MOST4)，高能量粒子加速器相关粒子探测关键技术研发和验证，2000万，2025年-2029年，骨干成员，负责飞行时间探测器
- 3、2025年国家重点研发计划项目-大装置前沿研究专项-“基于X射线-原子核系统的量子调控研究(基础研究)”课题三--原子核共振散射探测谱仪及算法研发, 骨干成员，负责LGAD探测器(100ps)

项目情况：

项目名称	项目类别	项目经费	本人工作	起止时间
ATLAS实验Phase 2探测器升级	科技部国家重点研发	2200万	HGTD LGAD传感器负责人 Timing pixel 探测器	2024年-2028年
LGAD探测器与读出电路集成化研究	核电子学重点实验室项目	20万	项目负责人	2024.6 - 2025.3
抗辐照的SiPM器件研究	所创新	130万	SiPM器件设计与测试	2023年-2025年
用于粒子探测的高时空分辨率硅雪崩探测器关键技术研究	国家自然科学基金面上项目	63万	AC-LGAD设计与测试总体负责人	2022.1-2025.12
ATLAS实验探测器Phase 2升级	国家自然科学基金，国际合作	3350万	负责HGTD LGAD传感器	2020.1-2024.12



文章会议报告

➤ 已发表: 4篇

- 1、 Weiyi Sun, Mengzhao Li, Zhijun Liang, [Mei Zhao](#), ..., The performance of AC-coupled Strip LGAD developed by IHEP, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Volume 1062, 2024(通讯作者)
- 2、 Kang Liu, Meng-Zhao Li, Jun-Hua Zhang, Wei-Yi Sun, Yun-Yun Fan, Zhi-Jun Liang, Yu-Feng Wang, [Mei Zhao](#), Kun Liu, Performance of AC-LGAD strip sensors designed for the DarkSHINE experiment, **Nuclear Science and Techniques**, Volume 35, 2024 (通讯作者)
- 3、 Jiaying Zhou, Mengzhao Li, Yuekun Heng, Weimin Song, Weiyi Sun, Tianyuan Zhang, [Mei Zhao](#), Zhijun Liang, The properties of LGAD with different sensitive areas, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, 170074, 2024.
- 4、 Zhuojun Chen, Ruoshi Dong, Leyi Li, Yiming Li, Weiguo Lu, Yunpeng Lu, Ivan Peric, Jianchun Wang, Zhiyu Xiang, Kunyu Xie, Zijun Xu, Hui Zhang, [Mei Zhao](#), Yang Zhou, Hongbo Zhu, Xiaoyu Zhu, Feasibility study of CMOS sensors in 55 nm process for tracking, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Volume 1069, 2024.

➤ 待发表: 1篇

- 5、 Weiyi Sun, Mengzhao Li, Tianyuan Zhang, [Mei Zhao](#), ..., Development of high-precision time detector based on strip LGAD for collider experiments. 投稿NST, 最终版修改阶段, 2024 (通讯作者)

➤ 专利: 雪崩二极管器件与电子学电路集成, 撰写中



文章会议报告

会议报告：国内4次，国际7次

赵梅	HGTD (long) week (Monday-Friday)	2024/2/5	2024/2/9	CERN	国际会议	是	Status of sensor pre-production	口头报告
赵梅	The 2024 European Edition of the International Workshop on the Circular Electron-Positron Collider (CEPC)	2024/4/8	2024/4/11	Marseille, France	国际会议	是	LGAD based 4D outer tracker and time of flight	分组报告
赵梅	HGTD (mini) week (Monday-Thursday) during ATLAS upgrade week	2024/4/5	2024/4/18	CERN	国际会议	是	Status of preproduction/UBM	口头报告
赵梅	第四届半导体辐射探测器研讨会	2024/5/23	2024/5/26	山东青岛	国内会议	是	The effects of irradiation on LGAD developed by IHEP	分组报告
赵梅	HGTD Week in Beijing, China	2024/7/8	2024/7/13	北京	国际会议	是	Main sensor QC status	口头报告
赵梅	第二十二届全国核电子学与核探测技术学术年会暨第十二届全国先进气体探测器研讨会 (NED&CAGD2024)	2024/7/15	2024/7/17	山东青岛	国内会议	是	Researches of irradiation-resistant LGAD detector for ATLAS HGTD	分组报告
赵梅	2024全国光电科学与工程学术会议	2024/7/26	2024/7/28	四川成都	国内会议	是	快时间探测器及其应用	分组报告
赵梅	中国物理学会高能物理分会第十四届全国粒子物理学术会议	2024/8/12	2024/8/17	山东青岛	国内会议	是	Development of LGAD for ATLAS HGTD and CEPC TOF out-tracker	分组报告
赵梅	The 2024 international workshop on the high energy Circular Electron Positron Collider (CEPC)	2024/10/22	2024/10/27	浙江杭州	国际会议	是	LGAD sensor development (From ATLAS high granularity timing detector to future timing detector)	分组报告
赵梅	HGTD (mini) week (Monday-Thursday) during ATLAS upgrade week	2024/11/11	2024/11/13	CERN	国际会议	是	Sensor acceptance - discussion about the document	口头报告
赵梅	第十届中国LHC物理会议 (CLHCP2024 青岛)	2024/11/13	2024/11/17	山东青岛	国内会议	是	ATLAS upgrade	口头报告

参与指导学生：5名

孙维益：高能所，QT local supervisor，副导师，IHEP-IME LGAD器件测试与分析

任浩泉，科大，QT Technical supervisor，HGTD项目USTC-IME LGAD器件测试

Iskra Velkovska, JSI，QT Technical supervisor，LGAD器件辐照性能测试

邓建鹏，浙江大学，HVC MOS器件TCAD仿真

张晓旭，南京大学，AC-LGAD仿真与测试



下年度工作计划

- **LGAD探测器研究**（人员？）
 - **ATLAS HGTD**: 正式生产流片与芯片测试；质量监控，联调测试，束流测试等
 - LGAD探测器性能研究
 - 应用拓展(X射线与Lumical)
 - Monolithic LGAD (人员?)
- **AC-LGAD 探测器研究**（人员？）
 - **CEPC Ref-TDR**工作
 - **AC-LGAD**器件流片与测试(两次)（人员？）
 - **MOST4 TOF**系统样机初步搭建
 - 时间与位置分辨能力测试(含束流测试)
 - 位置重建算法优化（人员？）
- **高压CMOS硅像素探测器器件研究**
 - 第三、四版基于55nm工艺HVCMOS器件设计、流片（sensor部分）；
 - sensor辐照性能研究；
- **抗辐照SiPM芯片研制**
 - 芯片测试与辐照性能研究（人员？）
- **领导交予的其他工作**

欢迎所里各组更多人员参与LGAD、SiPM方面工作
随时联系我！

赵梅: zhaomei@ihep.ac.cn, 主楼B224