



ATLAS HGTD 项目中 USTC-IME 预量产传感器的表征与性能研究

王天傲

代表中国科大 ATLAS HGTD 研究组

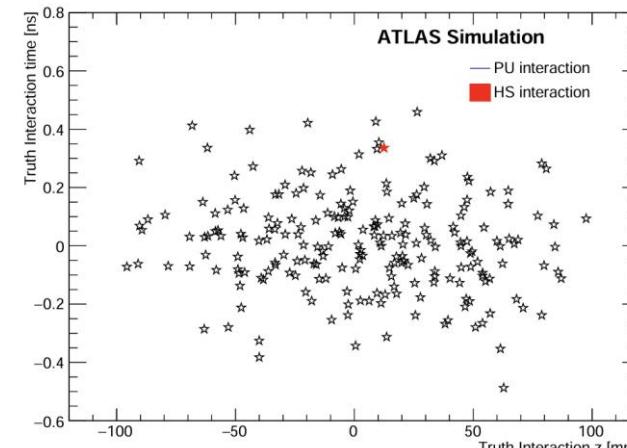
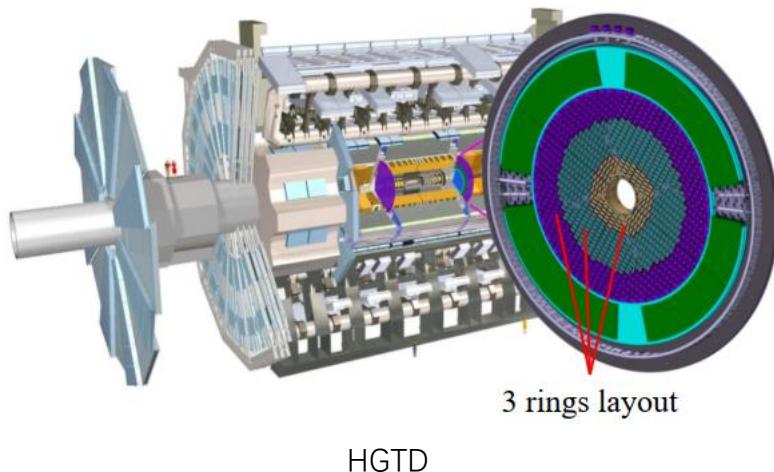
2025年4月

目录

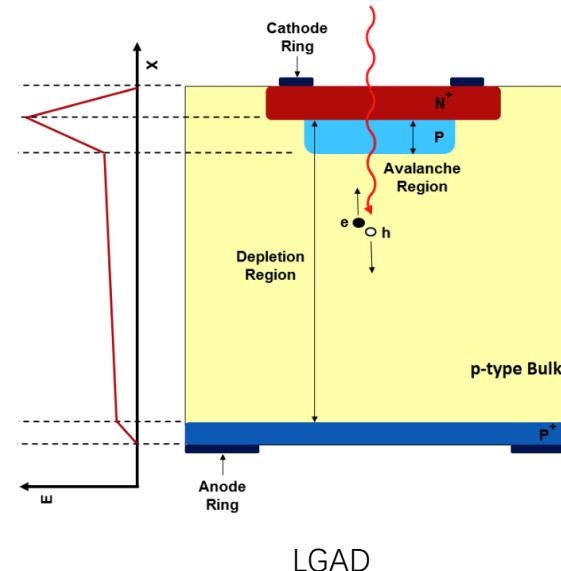
- 研究简介
 - ATLAS 高粒度时间探测器 (HGTD)
 - USTC-IME LGAD 的预量产
- USTC-IME 预量产 LGAD 的表征与性能研究
 - 质量监控总体安排和测试原理
 - 主要传感器 (main sensor) 的测试
 - 质量检测结构 (QC-TS) 的测试
 - 辐照测试
- 总结与展望

ATLAS 高粒度时间探测器 (HGTD)

- 欧洲核子中心 (CERN) 的大型强子对撞机 (LHC) 即将进行高亮度升级 (HL-LHC), 这会带来更多的事例堆积 ($\langle\mu\rangle$: 30→200), 让重建物理目标更加困难。
- 为此, ATLAS探测器也要进行二期升级。策略是使用高粒度时间探测器 (HGTD), 在前向区域提供带电粒子的高精度时间信息, 以此加强物理目标的重建。
- HGTD 的核心技术是低增益雪崩二极管 (LGAD), 它具有良好的时间分辨和抗辐照性能。

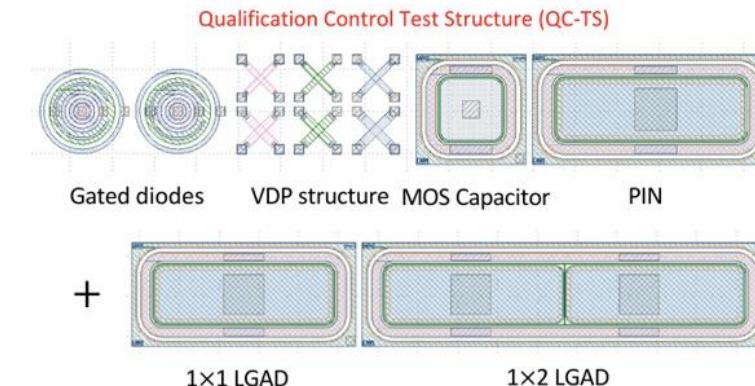
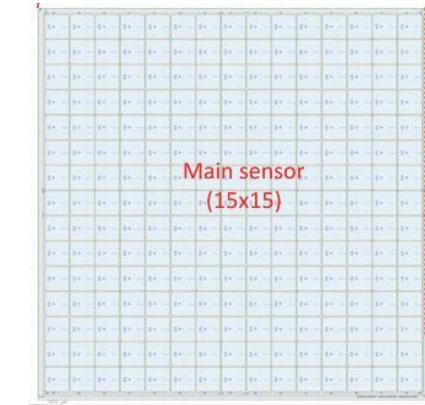
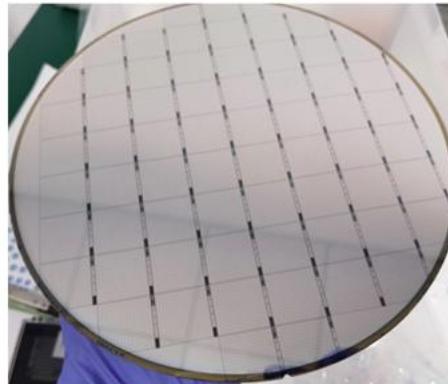


$\langle\mu\rangle = 200$ 时, z - t 平面上一个束流间隔内事例堆积的情况



USTC-IME LGAD 的预量产

- 预量产以 USTC-IME-V2.1-W17 样品作为基准 ([CLHCP2022](#))。
- 每片晶圆包含 52 个 15x15 LGAD 阵列 (main sensor)，和 52 个质量检测结构 ([QC-TS](#))。



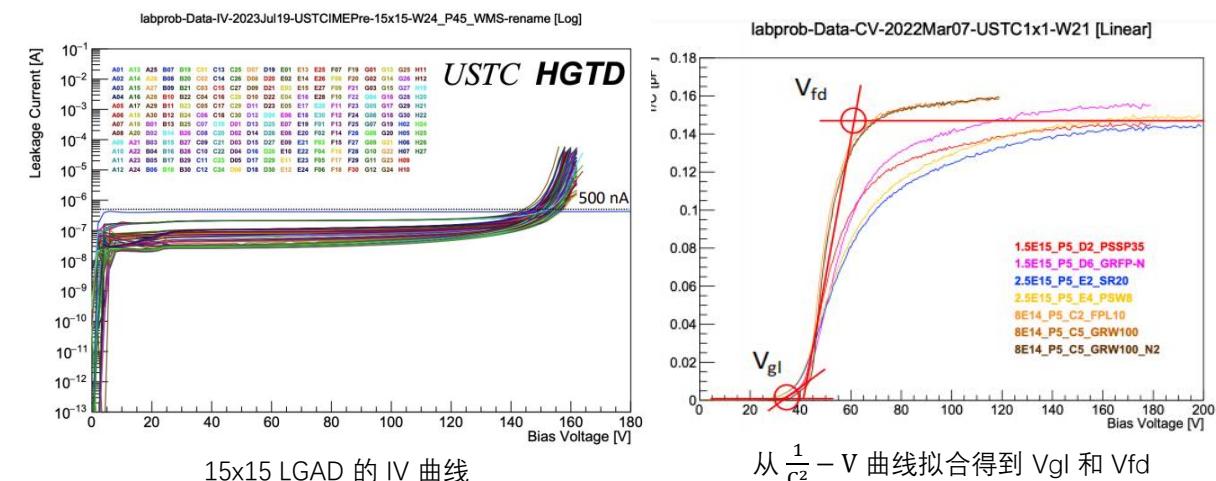
- Main sensor 的性能测试由中国科大负责。
- QC-TS 的性能测试主要由圣保罗大学 (USP) 和 CERN 负责。
- 抗辐照性测试由约瑟夫·斯特凡研究所 (JSI) 负责。

质量监控总体安排和测试原理

HGTD 对 USTC-IME 预量产 LGAD 质量监控的总体安排

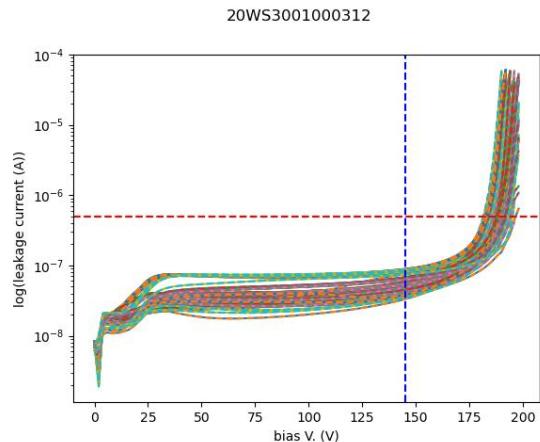
测试名称	测试对象	测试方法	目的	主要单位
CQC (Company Quality Check)	晶圆上的所有 main sensor	漏电流-电压 (IV)	Sensor 验收	USTC
SQC (Sensor Quality Check)	划片后10%的 main sensor	IV	Sensor 验收, 交叉检查	USTC, CERN
PQC (Process Quality Check)	每个晶圆上至少10个 QC-TS	电容-电压 (CV) 和 IV	发现显著差异并解决	USP, CERN
IT (Irradiation Tests)	每个晶圆上2-3个 QC-TS	TCT, ^{90}Sr , CV 和 IV	监控增益层, 晶圆验收	JSI

- IV 测试：在 sensor 上加反向偏压，用皮安表记录漏电流随偏压的变化。取漏电流达到 500 nA 时对应的偏压为击穿电压 (V_{bd})。
- CV 测试：在 sensor 上加反向偏压，用 LCR 表记录 sensor 电容随偏压的变化。 $\frac{1}{C^2} - V$ 曲线的两个拐点分别对应增益层耗尽电压 (V_{gl}) 和全耗尽电压 (V_{fd})。

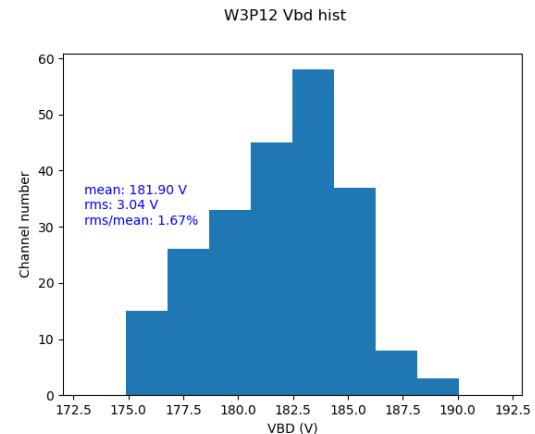


Main sensor 的测试：漏电流-电压 (IV)

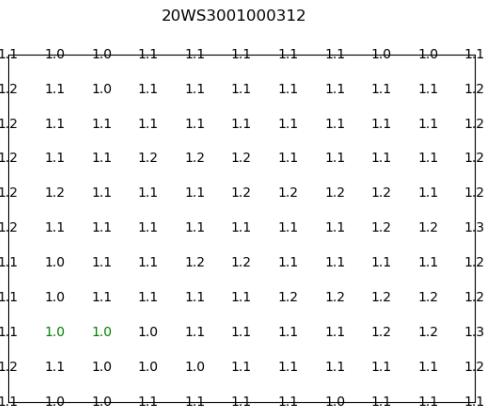
- 用半自动探针台在室温下测试每个晶圆上52个 main sensor 的225个通道的 IV 曲线。
- CQC 对 USTC-IME 预量产 LGAD 的验收标准：
 - 最小 V_{bd} 应在165 V到195 V之间；
 - V_{bd} RMS < 5%；
 - 0.8倍最小 V_{bd} 对应的漏电流 (I_{Leak}) 的峰值比 ≤ 3 。



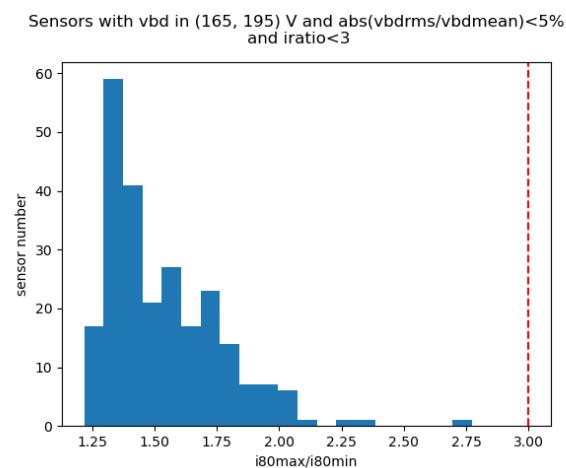
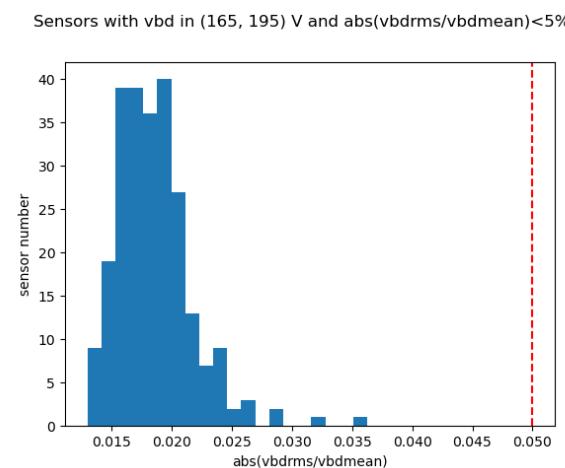
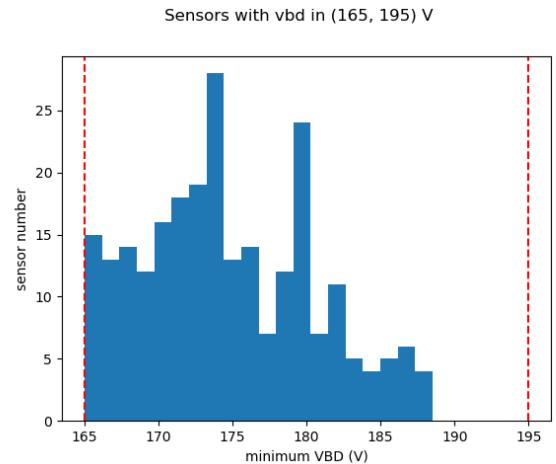
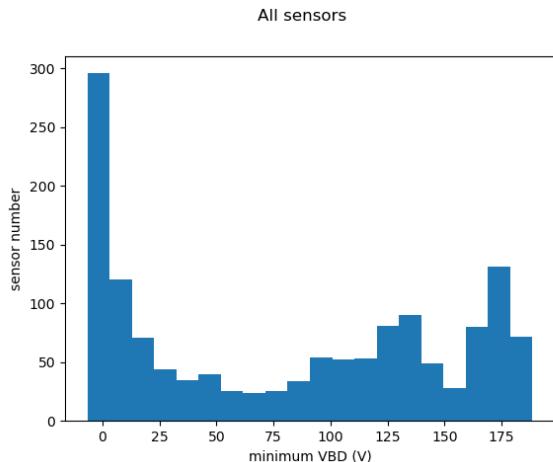
IV 曲线 (红色虚线对应500 nA, 蓝色虚线对应0.8倍最小 V_{bd})



$I @ 0.8 * \min V_{bd} / I_{min}$



晶圆 IV 测试结果汇总



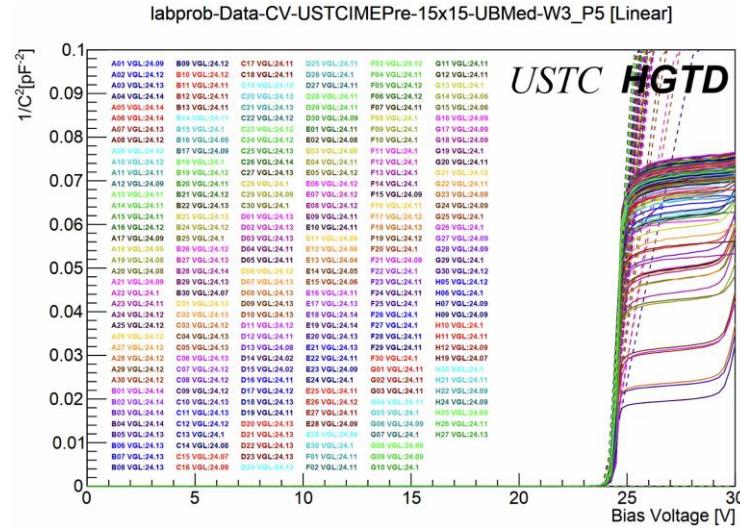
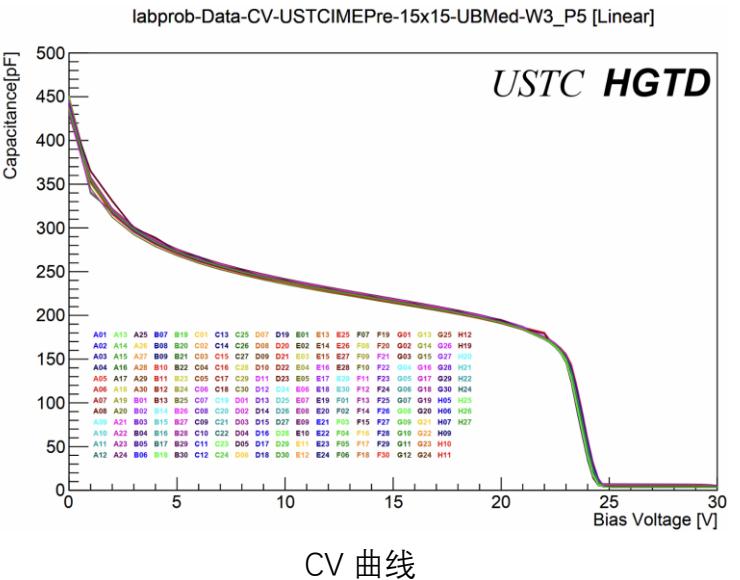
筛选结果

要求	Main sensor 数目
无	1404
$165 \text{ V} < \text{min Vbd} < 195 \text{ V}$	247
$\& \text{Vbd RMS/Mean} < 5\%$	247
$\& i_{ratio} < 3$	243

- 27片晶圆中有9片带有至少18个满足要求的 main sensor, 已被 ATLAS 接收。

Main sensor 的测试：电容-电压 (CV)

- 使用15x15探针卡在20°C下测试划片后的 main sensor。





划片后 main sensor 测试结果汇总

USTC-IME ID	ATLAS HGTD ID	$\langle V_{bd,pad} \rangle$ [V]	$RMS(V_{bd,pad}) / \langle V_{bd,pad} \rangle$	Max/Min(I@0.8 minimum V _{bd})	$\langle V_{gl,pad} \rangle$ [V]	$RMS(V_{gl,pad}) / \langle V_{gl,pad} \rangle$	$\langle V_{fd,pad} \rangle$ [V]
W3_P5	20WS3001000305	176.07	0.0164	1.6	24.11	0.0008	25.05
W3_P9	20WS3001000309	172.8	0.0169	1.7	24.15	0.0008	25.06
W4_P3	20WS3001000403	166.8	0.0122	1.7	24.3	0.0003	25.24
W4_P6	20WS3001000406	170.34	0.0173	1.7	24.16	0.0008	25.08
W5_P5	20WS3001000505	180.7	0.0138	1.8	24.1	0.0009	/
W5_P8	20WS3001000508	170.65	0.0162	1.9	24.17	0.0007	/
W6_P5	20WS3001000605	171.12	0.0129	2.1	24.14	0.0011	25.15
W6_P8	20WS3001000608	170.42	0.0189	1.7	24.19	0.0006	25.21
W7_P6	20WS3001000706	166.53	0.0126	2.5	24.34	0.0010	25.36
W7_P9	20WS3001000709	161.43	0.0127	1.8	24.37	0.0007	25.16

< 0.05

< 0.005

参数	要求	测量值	统计量
不同 main sensor 之间 V _{fd} 的差别	与均值相差 $\pm 10\%$ 以内	$\pm 0.8\%$	8
不同 main sensor 之间 V _{gl} 的差别	与均值相差 $\pm 1\%$ 以内	$\pm 0.7\%$	10
不同 main sensor 之间 V _{bd} 的差别	与均值相差 $\pm 8\%$ 以内	$\pm 5.9\%$	10

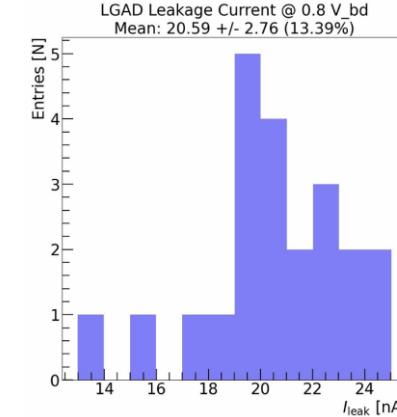
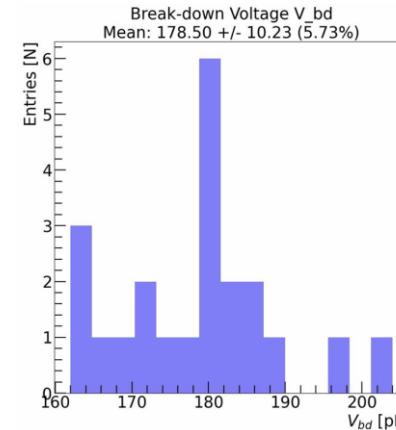
- 不论是在同一 main sensor 之内还是在不同 main sensor 之间, V_{gl}、V_{fd} 和 V_{bd} 的一致性都符合要求。



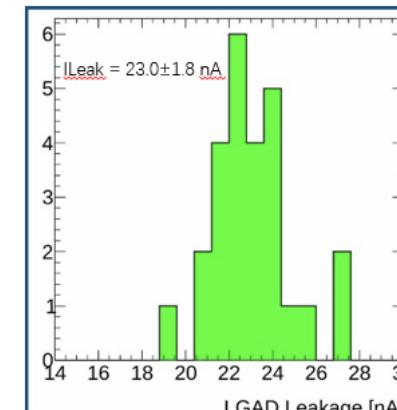
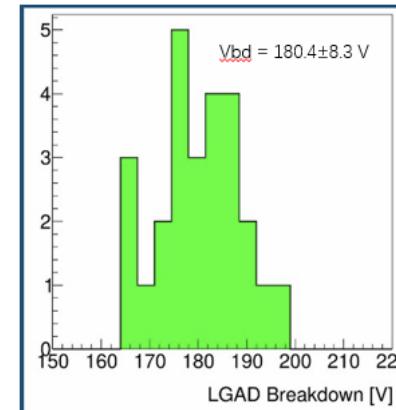
QC-TS 的测试：漏电流-电压 (IV)

- 使用全自动探针台和 QC-TS 探针卡，JSI 提供开关矩阵和解耦盒，USP 提供电缆适配器和数据采集软件。

CERN 测试结果



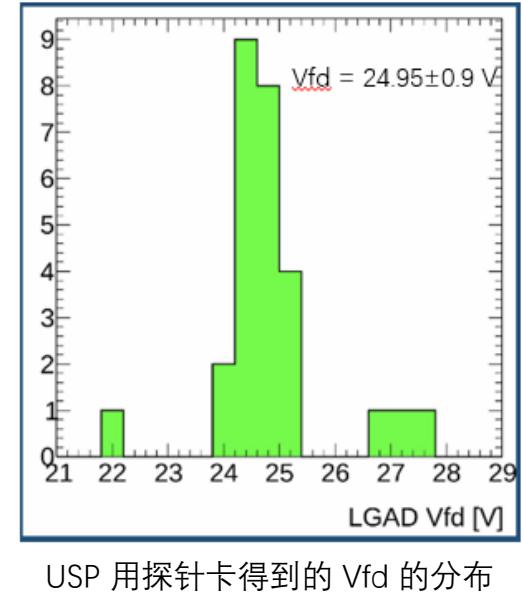
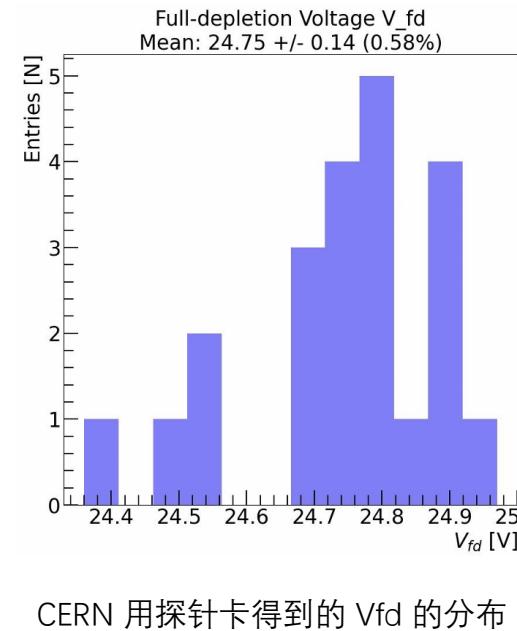
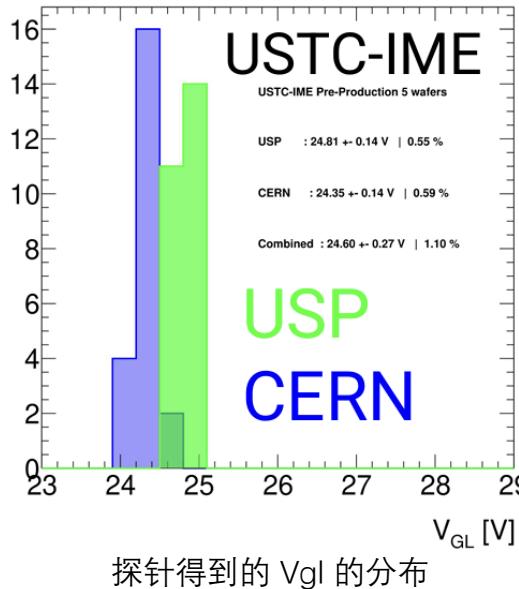
USP 测试结果



- 不同 sensor 间 V_{bd} 的变化在8%以内，符合要求。
- I_{leak} 的峰值比小于3，符合要求。

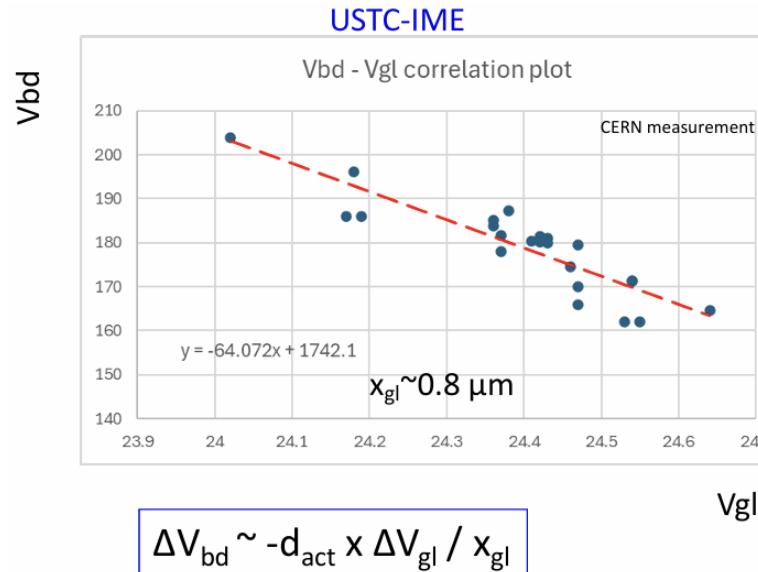


QC-TS 的测试：电容-电压 (CV)

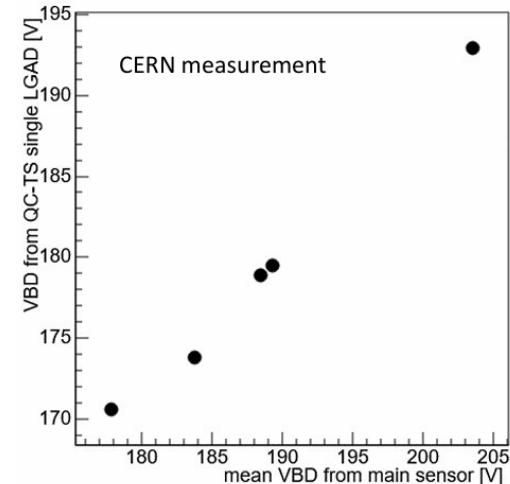


- 不同 sensor 间 V_{gl} 的变化在 1% 以内，符合要求。
- 不同 sensor 间 V_{fd} 的变化在 4% 以内，符合要求 (10%)。

QC-TS 的测试结果的关联性



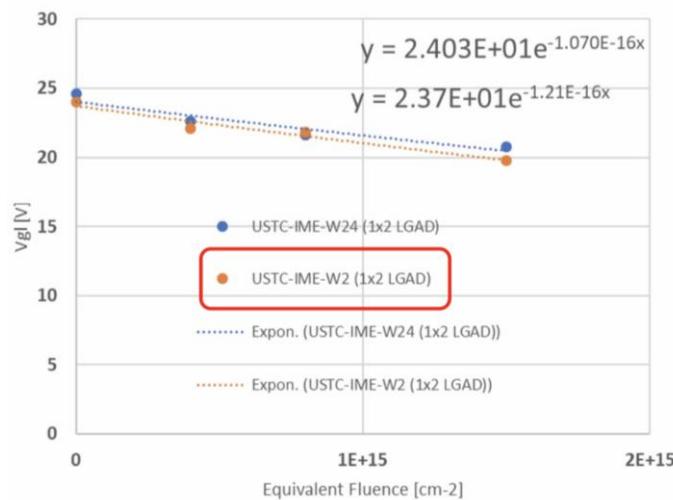
Example for USTC-IME correlation
Wafer: 20WS30010006 vbd_mains-vbd_qcts



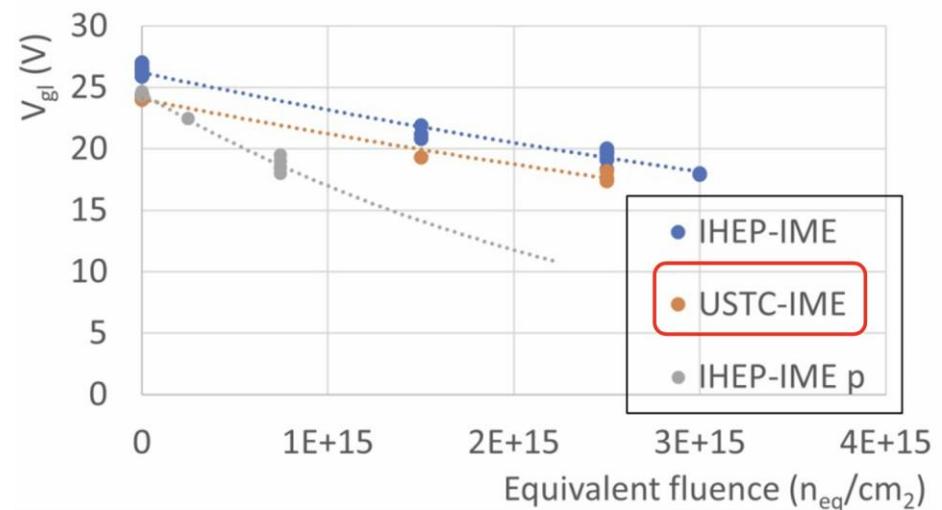
- 预期 USTC-IME LGAD 的 V_{bd} 和 V_{gl} 线性相关，实验结果符合预期，得到增益层厚度约为 0.8 μm。
- QC-TS 和 main sensor 的 V_{bd} 也有很好的关联性。

抗辐照性测试

- 在 TRIGA 反应堆 (Ljubljana, Slovenia) 上对 QC-TS 做了不同强度的中子辐照。
- 从 V_{gl} 得到表征抗辐照性的受主移除参数 (c-factor) : $\frac{V_{gl}(\varphi_{eq})}{V_{gl}(0)} = e^{-c \times \varphi_{eq}}$ 。



未做UBM和减薄 ([JSI@2023](#))

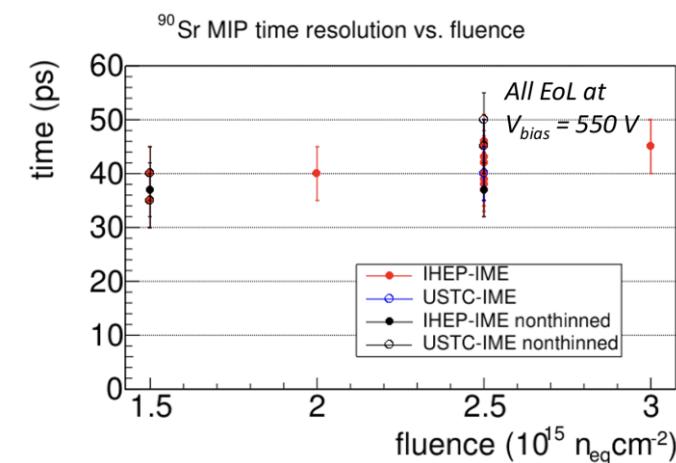
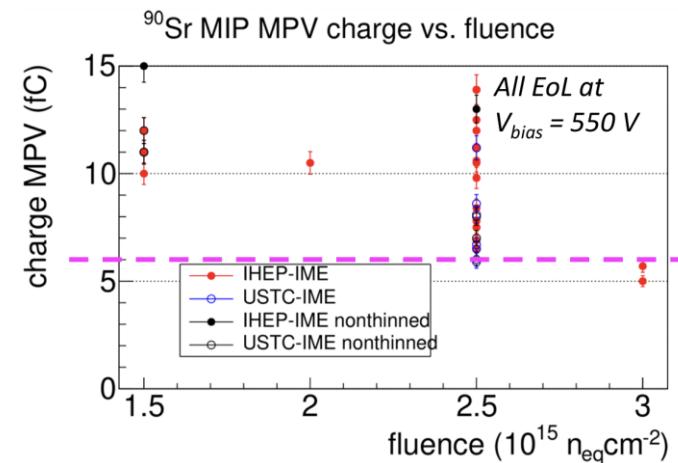
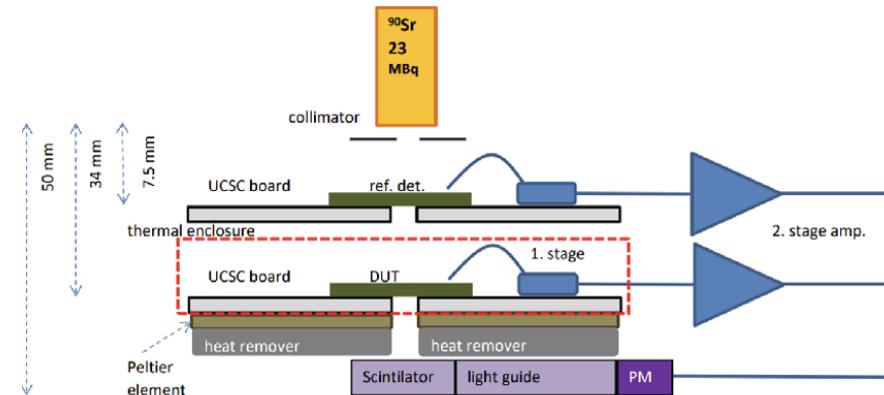


做了UBM和减薄 ([JSI@2024](#))

- UBM 和减薄前后的 QC-TS 的 c-factor 分别为 $1.21 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 和 $1.2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ ，与基准值 $1.23 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 很接近，说明增益层有较好的抗辐照性。

辐照后的收集电荷和时间分辨测试

- 使用⁹⁰Sr放射源，用 LGAD 和 PMT 作为外部触发，DUT 在-30 °C环境下。
- 由于测得的电荷比预期的多，对于 MIP 提出的 4 fC 的要求此时应提高为6 fC。



- 辐照后 USTC-IME sensor 的收集电荷 (> 6 fC) 和时间分辨 (< 50 ps) 仍满足要求。

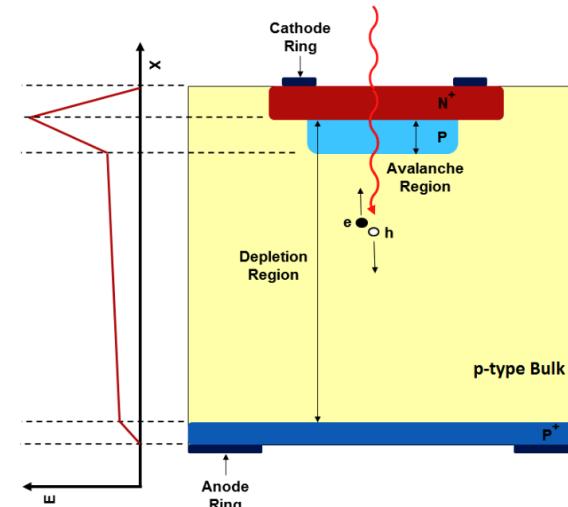
总结和展望

- 通过多家合作单位的一系列测试，研究了 USTC-IME 预量产 LGAD 的性能：
 - 辐照前的性能满足要求，且表现出了非常好的一致性；
 - 具有较好的抗辐照性；
 - 辐照后收集电荷和时间分辨仍能达到 HGTD 的要求。
- USTC-IME 预量产 LGAD 通过了 ATLAS 的验收，9片晶圆已经被接收。
- USTC 和 IME 正积极为量产阶段做准备。

Backup

低增益雪崩二极管 (LGAD)

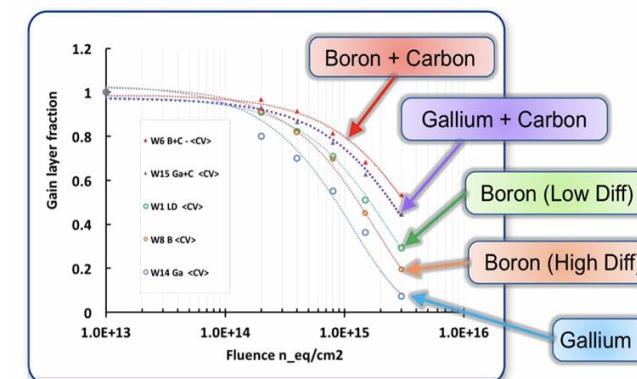
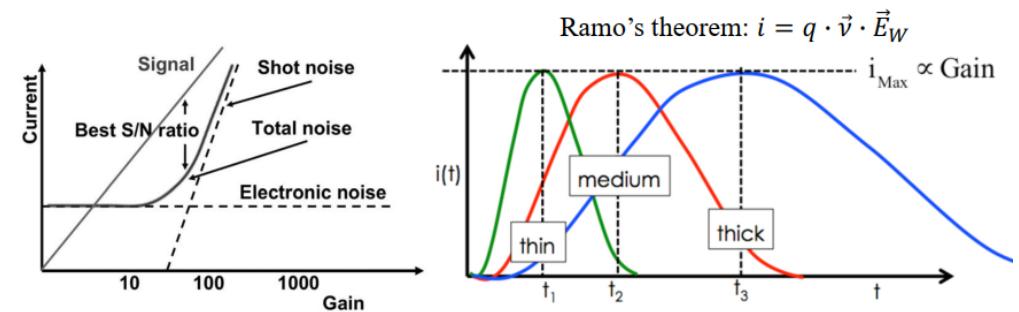
- LGAD 具有 $N^+ - P - P^- - P^+$ 的结构，其中的 P 是有特定掺杂浓度的增益层，通过耗尽增益层，可以在局部产生强电场，以实现雪崩电离。



- 时间分辨: $\sigma_t^2 = \sigma_{\text{Jitter}}^2 + \sigma_{\text{Time Walk}}^2 + \sigma_{\text{Landau}}^2 + \sigma_{\text{Distortion}}^2 + \sigma_{\text{TDC}}^2$

$$\sigma_{\text{Jitter}}^2 \sim \frac{t_{\text{Rise}}}{S/N}, \quad \sigma_{\text{Jitter}}^2 \sim \left[\frac{V_{\text{th}}}{S/t_{\text{Rise}}} \right]_{\text{RMS}}$$

- 由于受主移除效应，辐照后的LGAD增益层的有效掺杂浓度会减少，导致增益下降。
- 通过向基体掺碳，使 $C_i + O_i \rightarrow C_i O_i$ 与 $B_i + O_i \rightarrow B_i O_i$ 竞争，得到最大的辐照后增益。



预量产晶圆的接受情况

- 晶圆上至少要有18个满足要求的15x15 LGAD 才会被 ATLAS 接收

Sensor	Vbd	Average	Vbd	Min	Vbd	Rms	Vbd	Rms	ov.	Vbd	Average	Vbd	Status	I	Average	I	Max	I	Min	I	Ratio	Final	Status	
1	177.3769469	6.087625	27.81027		0.156786261	Fail	1.60E-08	1.79E-08	1.63E-08	1.093815		Fail												
2	185.2363438	177.7686	2.623927		0.014165293	Pass	4.27E-08	4.85E-08	3.91E-08	1.238565		Pass												
3	185.6298084	179.3713	2.894823		0.015594603	Pass	4.56E-08	5.83E-08	3.99E-08	1.461916		Pass												
4	186.4674221	58.02879	14.04126		0.075301419	Fail	2.56E-08	2.94E-08	2.34E-08	1.259771		Fail												
5	190.9789815	180.9313	3.361461		0.01760121	Pass	4.36E-08	5.98E-08	3.82E-08	1.566889		Pass												
6	190.1049337	180.5428	3.776989		0.019858513	Pass	4.58E-08	6.59E-08	3.72E-08	1.773339		Pass												
7	171.642726	0.89293	48.7143		0.283912212	Fail	0.85E-09	4.01E-07	5.72E-09	70.18587		Fail												
8	189.5308174	180.5091	2.963655		0.0156368	Pass	4.38E-08	5.24E-08	3.94E-08	1.328387		Pass												
9	187.5674914	179.695	2.90269		0.015475444	Pass	4.32E-08	4.06E-08	3.85E-08	1.287624		Pass												
10	185.226617	79.82267	10.62085		0.05733074	Fail	2.71E-08	4.24E-08	2.52E-08	1.678059		Fail												
11	187.0675168	176.6218	3.786644		0.020145203	Pass	4.21E-08	5.58E-08	3.76E-08	1.483765		Pass												
12	188.4950666	181.5795	3.040725		0.016131591	Pass	4.51E-08	5.23E-08	4.05E-08	1.291298		Pass												
13	191.6849960	182.1057	3.451373		0.018005443	Pass	4.27E-08	5.07E-08	3.74E-08	1.356060		Pass												
14	193.3288702	46.01026	16.25837		0.084096953	Fail	2.58E-08	2.99E-08	2.34E-08	1.274528		Fail												
15	191.4607894	16.88197	13.91532		0.072670725	Fail	1.78E-08	2.40E-08	1.54E-08	1.562353		Fail												
16	163.6745519	7.210043	63.2917		0.386692345	Fail	1.84E-08	2.10E-08	1.71E-08	1.230478		Fail												
17	191.9340312	86.02905	10.65016		0.055488626	Fail	2.78E-08	3.64E-08	1.50E-08	2.286106		Fail												
18	186.4116606	14.018	27.1299		0.145537552	Fail	1.68E-08	2.09E-08	1.52E-08	1.37219		Fail												
19	195.3508804	188.3103	3.328863		0.0170404032	Pass	4.38E-08	6.33E-08	3.71E-08	1.706134		Pass												
20	193.247174	166.7703	4.496804		0.023269702	Pass	4.00E-08	6.20E-08	3.42E-08	1.81582		Pass												
21	158.4485796	5.675063	68.91073		0.434900088	Fail	1.68E-08	2.00E-08	1.39E-08	1.439641		Fail												
22	154.8875852	5.116031	70.16999		0.453038205	Fail	1.67E-08	1.94E-08	1.41E-08	1.377668		Fail												
23	194.3166154	188.7194	2.527098		0.013005052	Pass	4.50E-08	5.98E-08	3.85E-08	1.526266		Pass												
24	195.1702820	148.0169	4.802964		0.024600094	Fail	3.23E-08	3.83E-08	2.99E-08	1.287874		Fail												
25	187.393854	51.11396	15.42028		0.0822388054	Fail	2.62E-08	3.35E-08	2.40E-08	1.394852		Fail												
26	187.4482973	180.4784	2.778224		0.014921281	Pass	4.39E-08	5.14E-08	3.89E-08	1.322281		Pass												
27	188.6367634	180.0144	3.142792		0.01666055	Pass	4.40E-08	5.19E-08	3.72E-08	1.393874		Pass												
28	192.0742114	178.7912	3.614254		0.018816966	Pass	4.22E-08	4.90E-08	3.79E-08	1.295294		Pass												
29	197.3775549	188.7417	3.275363		0.016594406	Pass	4.27E-08	5.48E-08	3.76E-08	1.458735		Pass												
30	197.0653334	177.7406	3.761981		0.019003229	Pass	3.78E-08	4.73E-08	3.37E-08	1.401029		Pass												
31	176.5543517	33.40315	51.33984		0.290786602	Fail	2.47E-08	3.06E-08	2.10E-08	1.452041		Fail												
32	167.5247514	10.36255	61.21459		0.365406267	Fail	1.80E-08	2.25E-08	1.67E-08	1.346466		Fail												
33	195.1289915	181.8063	4.065799		0.02083647	Pass	4.34E-08	7.36E-08	3.68E-08	1.999246		Pass												
34	200.5697055	187.9693	3.983743		0.019862137	Pass	3.96E-08	5.57E-08	3.27E-08	1.703397		Pass												
35	202.2098076	163.8006	4.172516		0.0206254509	Fail	3.23E-08	4.55E-08	2.86E-08	1.590045		Fail												
36	200.6042964	188.2523	4.390927		0.02180371	Pass	4.32E-08	7.06E-08	3.47E-08	2.036408		Pass												
37	162.319224	5.844156	68.66053		0.422985113	Fail	1.82E-08	1.98E-08	1.64E-08	1.206762		Fail												
38	195.7133098	165.6491	8.576631		0.04382242	Pass	3.84E-08	6.21E-08	3.15E-08	1.97504		Pass												
39	179.7704912	20.01122	35.61917		0.198136923	Fail	1.86E-08	2.51E-08	1.58E-08	1.588527		Fail												
40	197.6162540	102.1345	9.623224		0.048696521	Fail	2.85E-08	3.52E-08	2.59E-08	1.358711		Fail												
41	193.326838	186.1695	2.748843		0.014218631	Pass	4.55E-08	5.83E-08	4.00E-08	1.458512		Pass												
42	190.154712	181.0069	3.350446		0.017619579	Pass	4.72E-08	7.32E-08	3.84E-08	1.907981		Pass												
43	193.0055638	176.1893	4.084063		0.025923415	Pass	4.23E-08	7.04E-08	3.46E-08	2.03361		Pass												
44	192.4057227	104.2358	8.788954		0.045679273	Fail	2.96E-08	4.38E-08	2.56E-08	1.709356		Fail												
45	197.4542926	186.6497	3.905754		0.020236284	Pass	4.26E-08	5.68E-08	3.74E-08	1.520084		Pass												
46	172.4468049	13.62	59.19672		0.343275261	Fail	1.85E-08	2.39E-08	1.61E-08	1.478776		Fail												
47	183.000888	37.20635	52.54843		0.287137334	Fail	2.48E-08	3.12E-08	2.12E-08	1.474978		Fail												
48	203.8431049	192.7792	3.830274		0.018790303	Pass	4.10E-08	5.97E-08	3.52E-08	1.604798		Pass												
49	194.0284811	54.01654	25.62222		0.132053689	Fail	2.43E-08	3.19E-08	5.82E-10	54.7294		Fail												
50	195.88679754	124.0034	17.07931		0.087198091	Fail	0	0	0	100		Fail												
51	197.1568753	78.36036	12.97194		0.065795007	Fail	0	0	0	100		Fail												
52	196.3087844	187.6585	3.278472		0.016700587	Pass	0	0	0	100		Fail												

W3上52个 LGAD 的特征指标

Production version	Wafer No.	Implantation	LGADs	VBD mean	Labelled	Thinned	Backside (Al)	UBMed	Diced	Yield	Quality
USTC-IME Pre-production	W1	B+1C	15x15	~182.8 V	Done					17/52 ~ 33 %	
	W2	B+1C	15x15	~186.5 V	Done	Done	Done			2/52 ~ 4 %	
	W3	B+1C	15x15	~193.7 V	Done	Done	Done	Ready		26/52 ~ 50 %	Good
	W4	B+1C	15x15	~190.8 V	Done	Done</					