



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

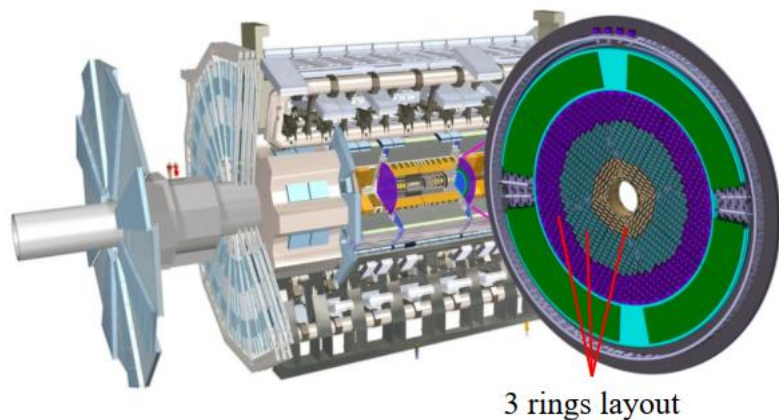
2025年4月

目录

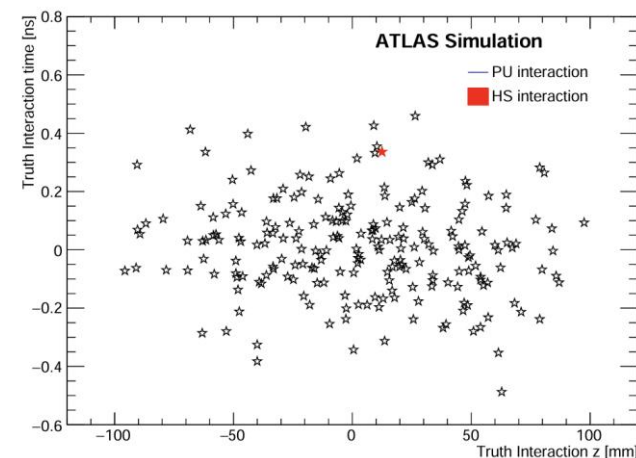
- 研究简介
 - ATLAS 高粒度时间探测器 (HGTD)
 - USTC-IME LGAD 的预量产
- USTC-IME 预量产 LGAD 的表征与性能研究
 - 质量监控总体安排和测试原理
 - 主要传感器 (main sensor) 的测试
 - 质量检测结构 (QC-TS) 的测试
 - 辐照测试
- 总结与展望

ATLAS 高粒度时间探测器 (HGTD)

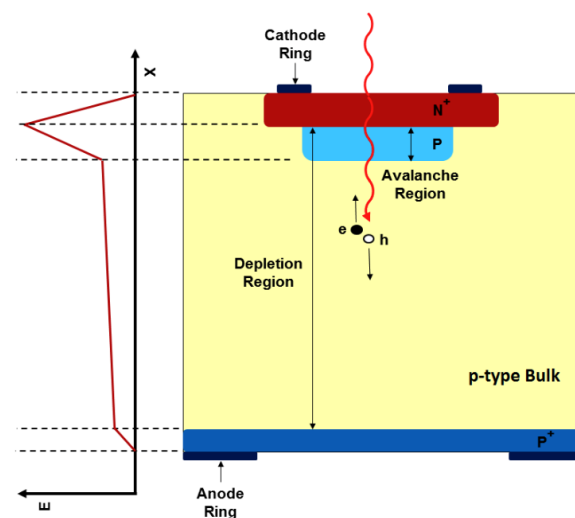
- 欧洲核子中心 (CERN) 的大型强子对撞机 (LHC) 即将进行高亮度升级 (HL-LHC)，这会带来更多的事例堆积 ($\langle\mu\rangle: 30 \rightarrow 200$), 让重建物理目标更加困难。
- 为此, ATLAS探测器也要进行二期升级。策略是使用高粒度时间探测器 (HGTD), 在前向区域提供带电粒子的高精度时间信息, 以此加强物理目标的重建。
- HGTD 的核心技术是低增益雪崩二极管 (LGAD), 它具有良好的时间分辨和抗辐照性能。



HGTD



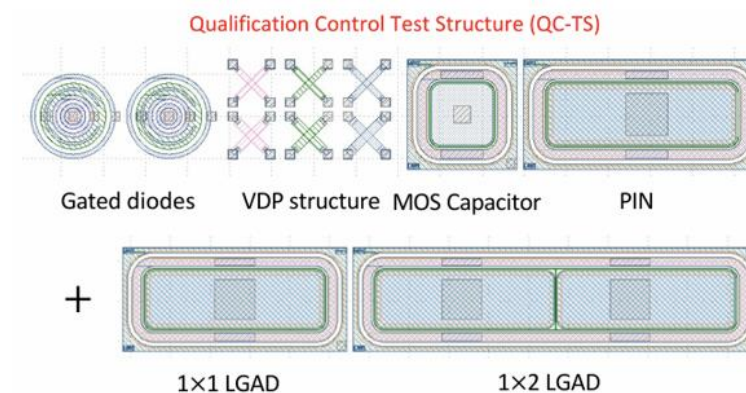
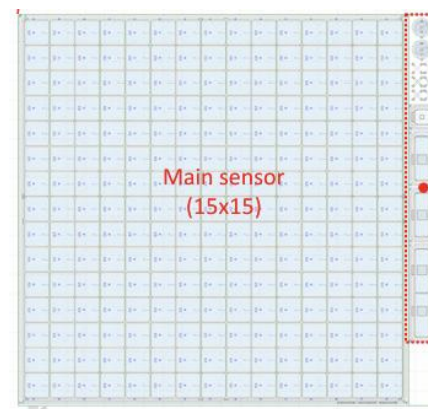
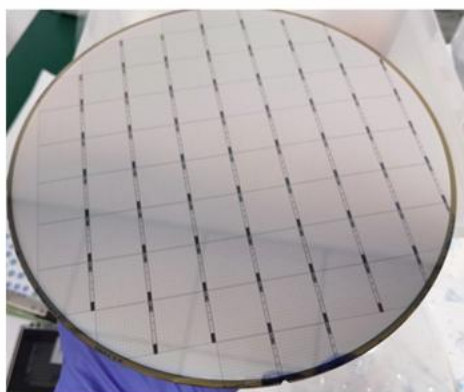
$\langle\mu\rangle = 200$ 时, z - t 平面上一个束流间隔内事例堆积的情况



LGAD

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](#))。



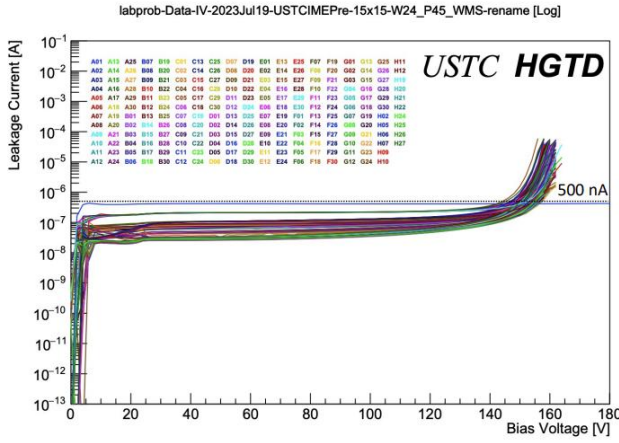
- Main sensor 的性能测试由中国科大负责。
- QC-TS的性能测试主要由圣保罗大学 (USP) 和 CERN 负责。
- 抗辐照性测试由约瑟夫·斯特凡研究所 (JSI) 负责。

质量监控总体安排和测试原理

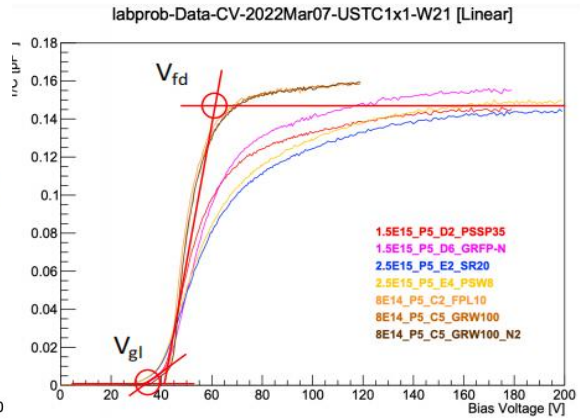
HGTD 对 USTC-IME 预量产 LGAD 质量监控的总体安排

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})。



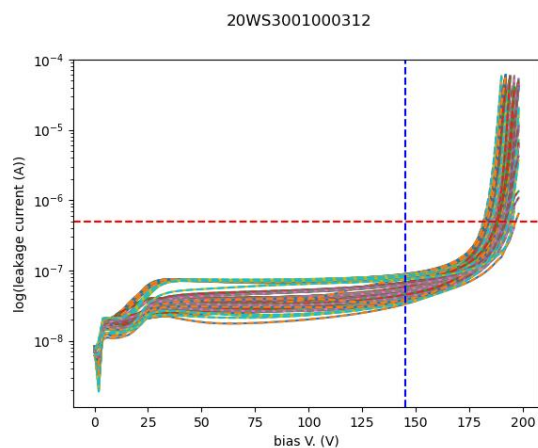
15x15 LGAD 的 IV 曲线



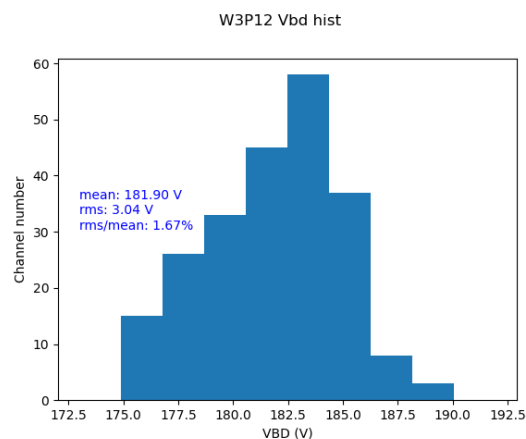
从 $\frac{1}{C^2} - V$ 曲线拟合得到 V_{gl} 和 V_{fd}

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 Vbd 应在165 V到195 V之间；
 - Vbd RMS < 5%;
 - 0.8倍最小 Vbd 对应的漏电流 (ILeak) 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 Vbd)

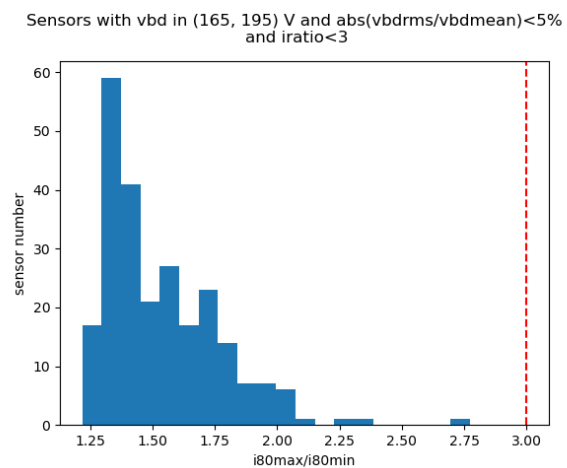
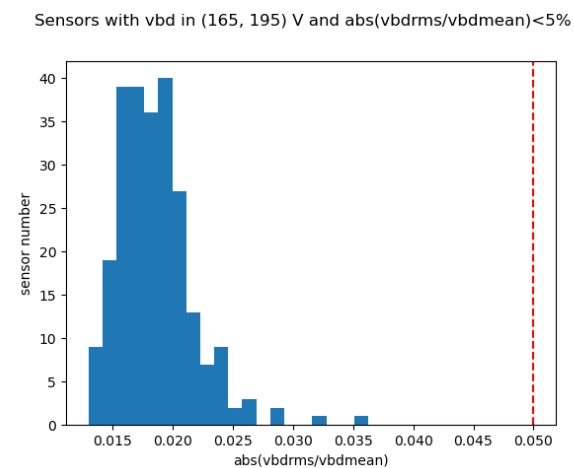
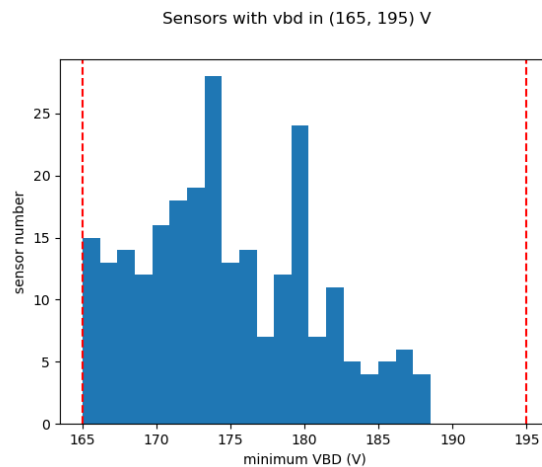
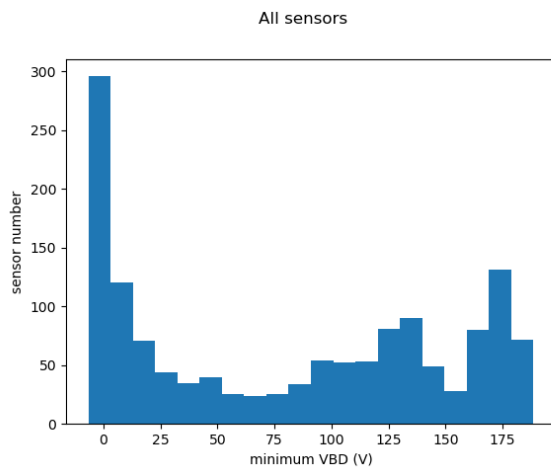


20WS3001000312

1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1
1.2	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2
1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2
1.2	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2
1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.2
1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3
1.1	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2
1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3
1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2
1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1

[I@0.8*minVbd/Imin](#)

晶圆 IV 测试结果汇总



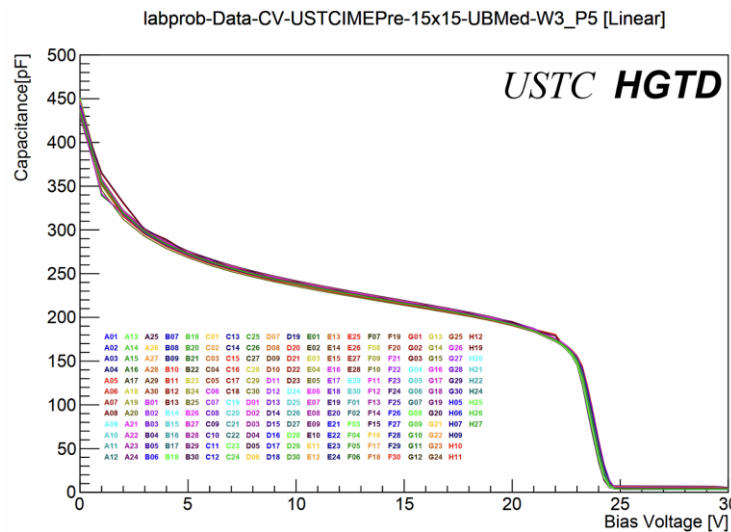
筛选结果

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

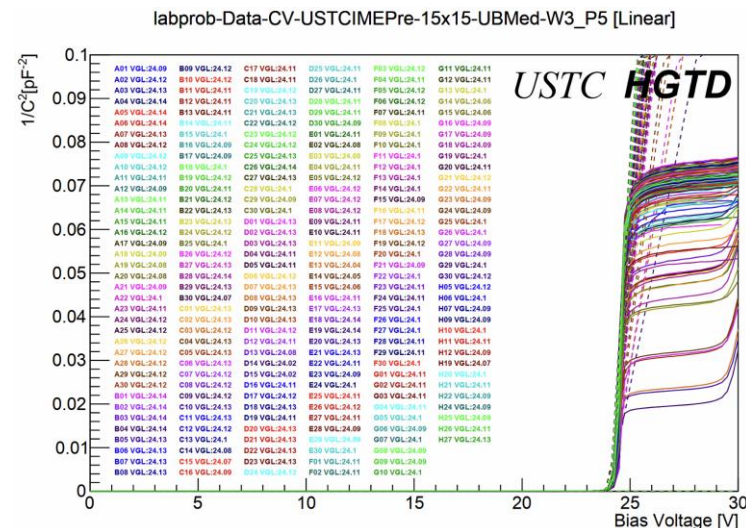
- 27片晶圆中有9片带有至少18个满足要求的 main sensor，已被 ATLAS 接收。

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。

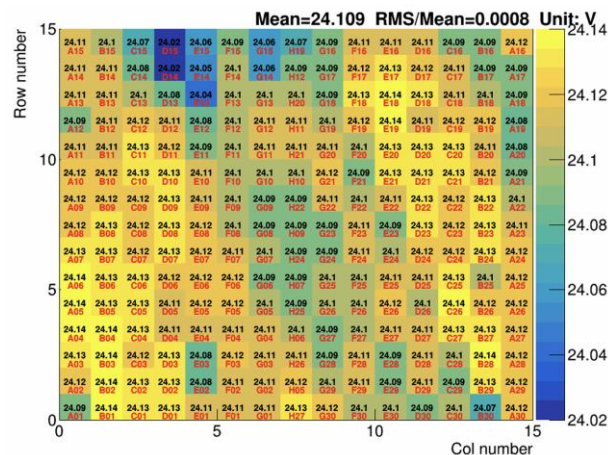


CV 曲线

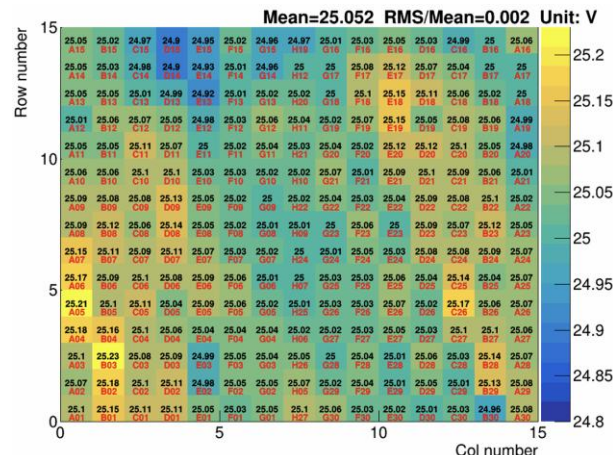


从 $\frac{1}{C^2} - V$ 曲线拟合得到 V_{gl} 和 V_{fd}

- V_{gl} 的 RMS/Mean 为0.0008, 满足小于0.005的要求。
- V_{fd} 的 RMS/Mean 为0.002, 也说明一致性较好。



V_{gl} 分布图



V_{fd} 分布图

划片后 main sensor 测试结果汇总

USTC-IME ID	ATLAS HGTD ID	$\langle V_{bd,pad} \rangle$ [V]	$\frac{RMS(V_{bd,pad})}{\langle V_{bd,pad} \rangle}$	Max/Min(I@0.8 minimum V_{bd})	$\langle V_{gl,pad} \rangle$ [V]	$\frac{RMS(V_{gl,pad})}{\langle V_{gl,pad} \rangle}$	$\langle V_{fd,pad} \rangle$ [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 Vfd 的差别	与均值相差±10%以内	±0.8%	8
不同 main sensor之间 Vgl 的差别	与均值相差±1%以内	±0.7%	10
不同 main sensor之间 Vbd 的差别	与均值相差±8%以内	±5.9%	10

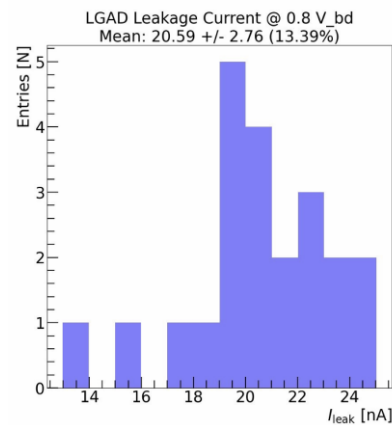
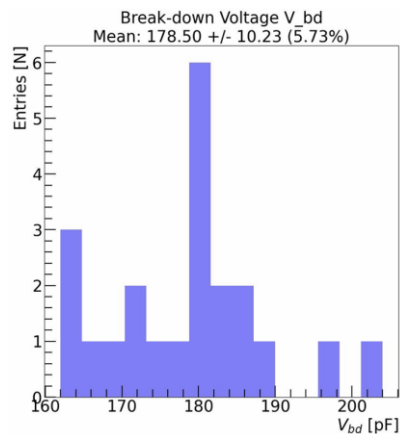
- 不论是在同一 main sensor 之内还是在不同 main sensor 之间，Vgl、Vfd 和 Vbd 的一致性都符合要求。



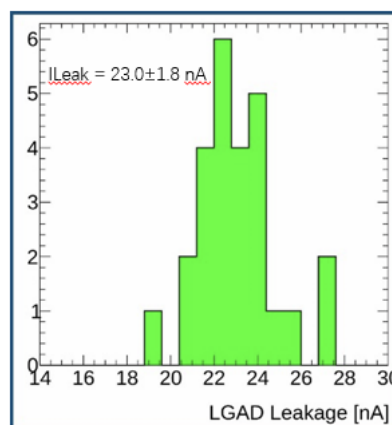
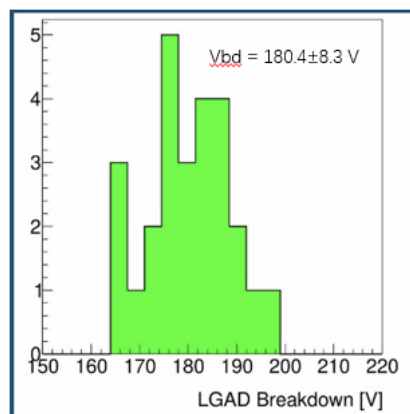
QC-TS 的测试：漏电流-电压 (IV)

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

CERN 测试结果



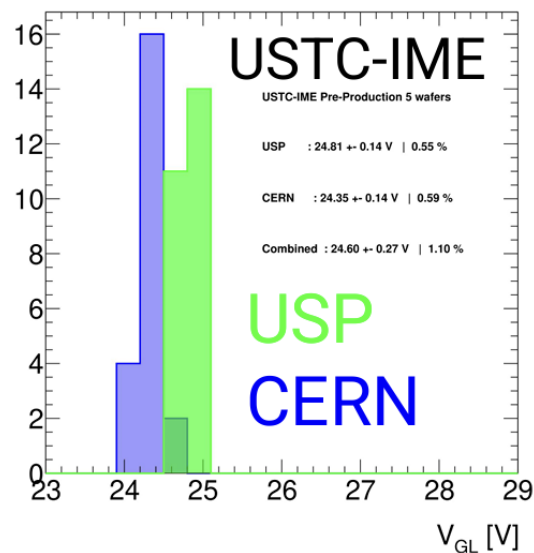
USP 测试结果



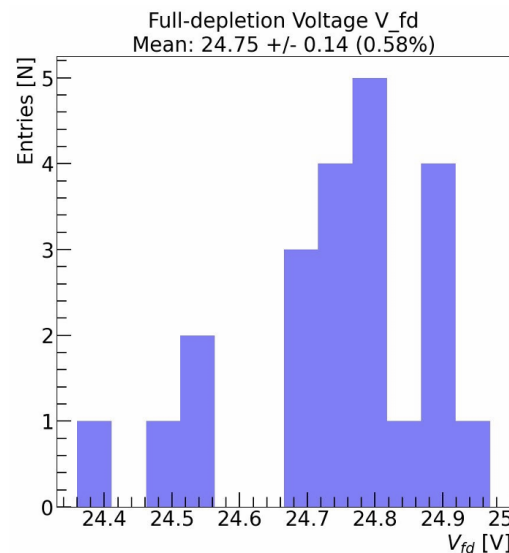
- 不同 sensor 间 V_{bd} 的变化在8%以内，符合要求。
- I_{leak} 的峰值比小于3，符合要求。



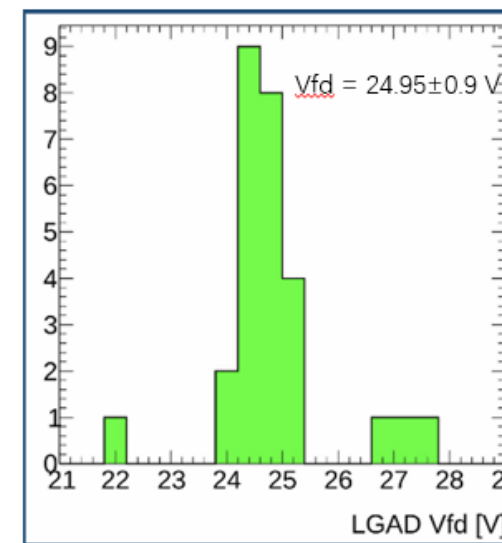
QC-TS 的测试： 电容-电压 (CV)



探针得到的 V_{GL} 的分布



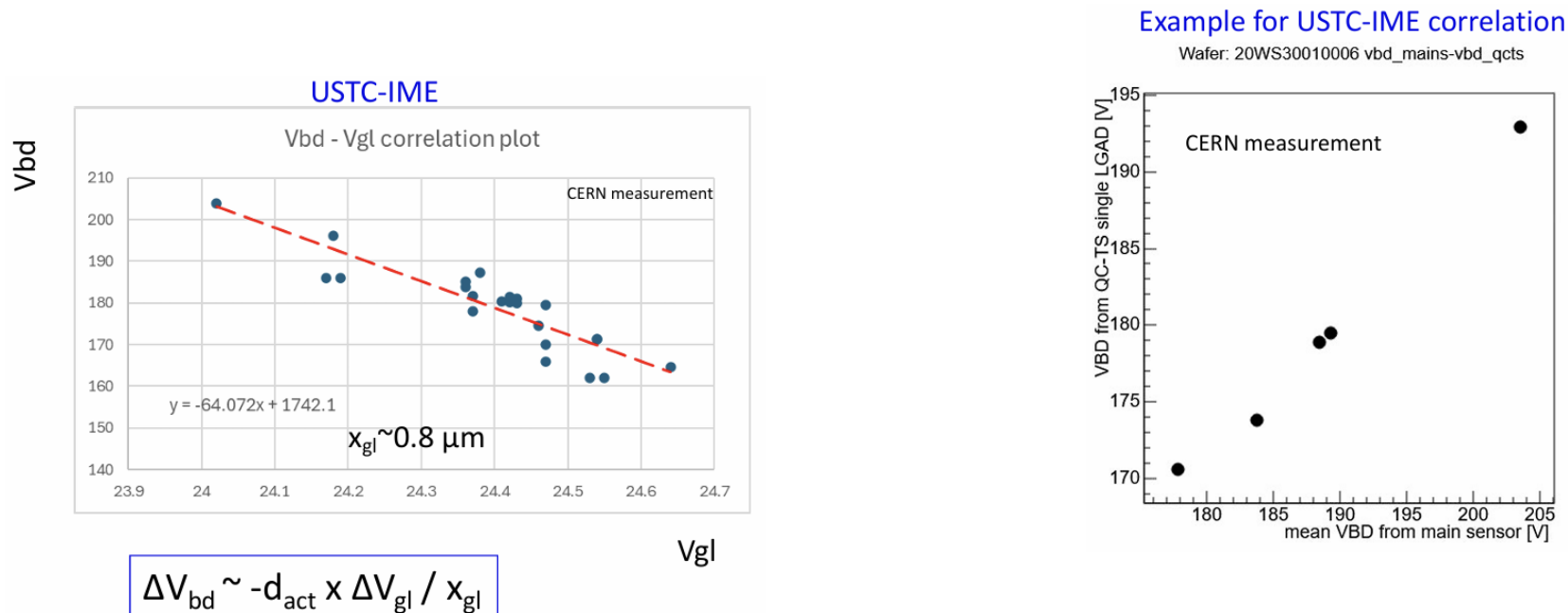
CERN 用探针卡得到的 V_{fd} 的分布



USP 用探针卡得到的 V_{fd} 的分布

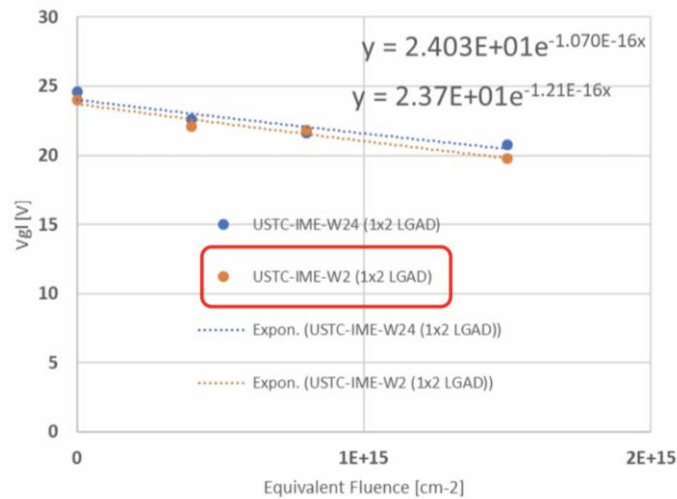
- 不同 sensor 间 V_{GL} 的变化在1%以内，符合要求。
- 不同 sensor 间 V_{fd} 的变化在4%以内，符合要求 (10%)。

QC-TS 的测试结果的关联性

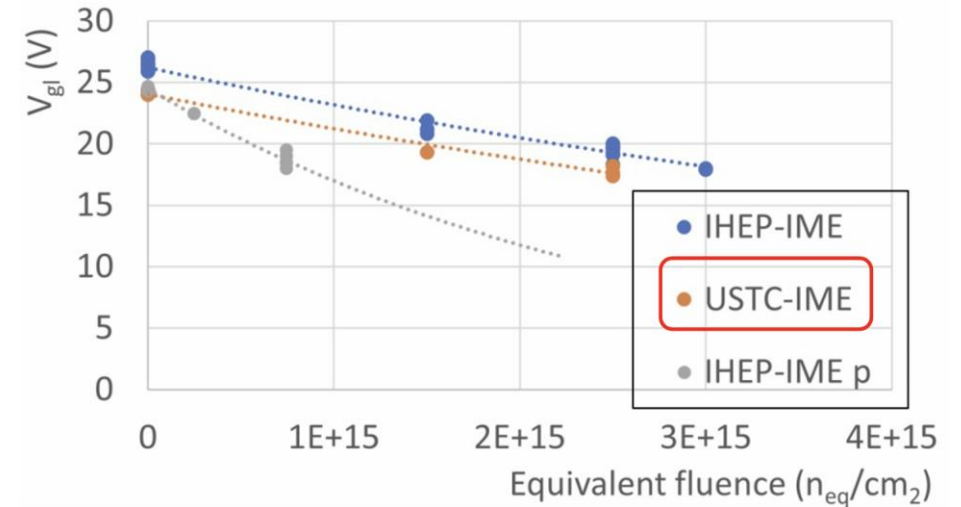


- 预期 USTC-IME LGAD 的 Vbd 和 Vgl 线性相关，实验结果符合预期，得到增益层厚度约为0.8 um。
- QC-TS 和 main sensor 的 Vbd 也有很好的关联性。

- 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](#))

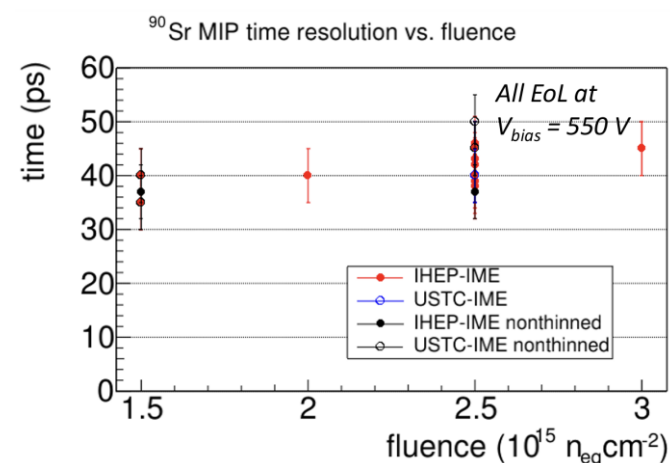
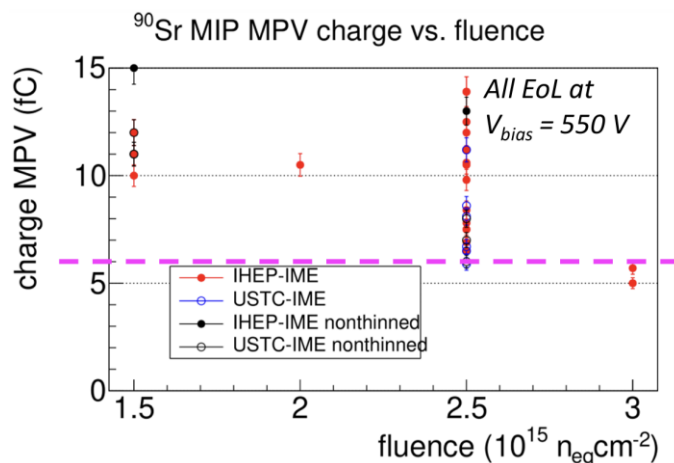
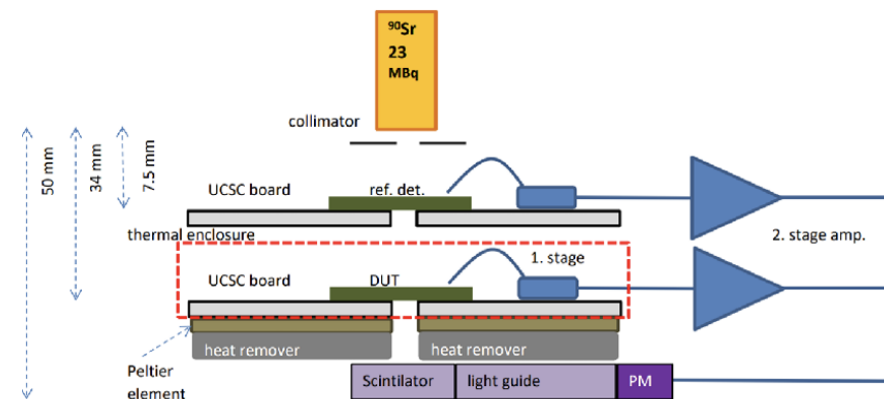


做了UBM和减薄 ([JSI@2024](#))

- 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 ^{90}Sr 放射源，用 LGAD 和 PMT 作为外部触发，DUT 在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 ($> 6\text{ fC}$) 和时间分辨 ($< 50\text{ ps}$) 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

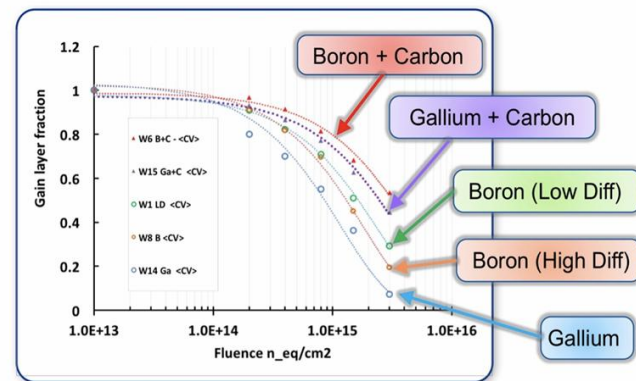
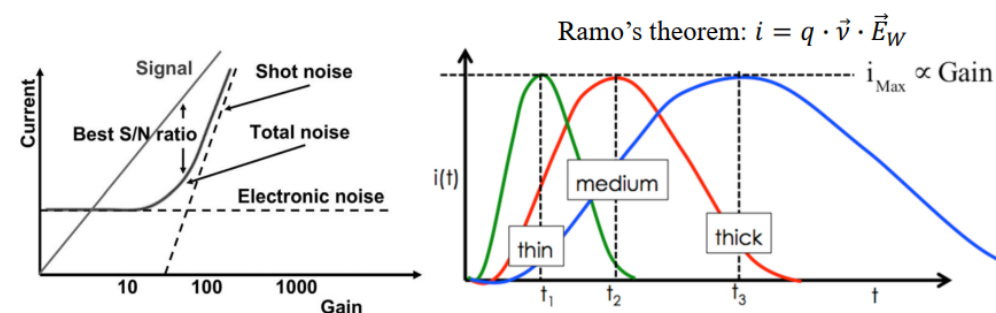
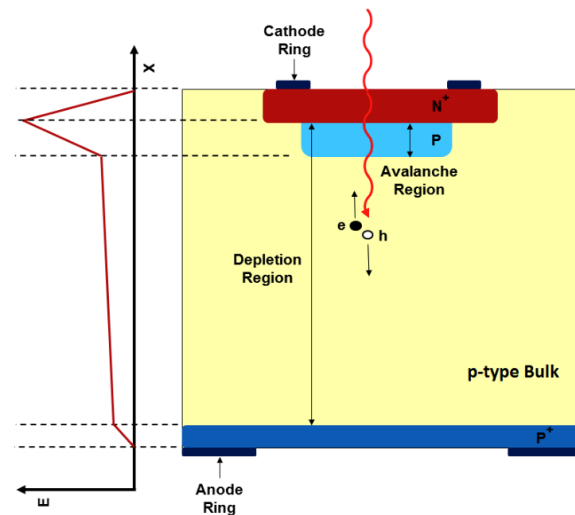
低增益雪崩二极管 (LGAD)

- 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 $C_i + O_i \rightarrow C_iO_i$ 与 $B_i + O_i \rightarrow B_iO_i$ 竞争，得到最大的辐照后增益。



预量产品圆的接受情况

- 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	1.69E-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	190.1949337	180.5428	3.776989		0.019858513	Pass	4.58E-08	6.50E-08	3.72E-08	1.773339	Pass
7	171.642726	0.89293	48.7143		0.283812212	Fail	9.85E-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	4.96E-08	3.85E-08	1.287624	Pass
10	185.226617	79.82267	10.62085		0.05733974	Fail	2.71E-08	4.24E-08	2.52E-08	1.678059	Fail
11	187.9675168	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		0.016131501	Pass	4.51E-08	5.23E-08	4.05E-08	1.291298	Pass
13	191.6849969	182.1057	3.451373		0.018005443	Pass	4.27E-08	5.07E-08	3.74E-08	1.356069	Pass
14	193.3288702	46.01026	16.25937		0.084096953	Fail	2.58E-08	2.99E-08	2.34E-08	1.274528	Fail
15	191.4607894	16.89197	13.91532		0.072679725	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	1.59E-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		0.017040432	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		0.434909088	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	5.88E-08	3.85E-08	1.526266	Pass
24	195.1702829	148.0169	4.802964		0.024609094	Fail	3.23E-08	3.83E-08	2.98E-08	1.287874	Fail
25	187.393854	51.11396	15.42028		0.082288054	Fail	2.62E-08	3.35E-08	2.40E-08	1.394852	Fail
26	187.4482973	180.4784	2.778224		0.014821281	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	197.9653334	177.7406	3.761981		0.019003229	Pass	3.78E-08	4.73E-08	3.37E-08	1.401929	Pass
31	176.5543517	33.49315	51.33964		0.290786602	Fail	2.47E-08	3.06E-08	2.10E-08	1.452941	Fail
32	167.5247514	10.36255	61.21459		0.365406267	Fail	1.89E-08	2.25E-08	1.67E-08	1.348466	Fail
33	195.1289915	181.8063	4.065799		0.02083647	Pass	4.34E-08	7.36E-08	3.88E-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	202.2998076	163.8006	4.172516		0.020625409	Fail	3.23E-08	4.55E-08	2.86E-08	1.590045	Fail
36	200.6042964	188.2523	4.399327		0.021930371	Pass	4.32E-08	7.06E-08	3.47E-08	2.036498	Pass
37	162.3199224	5.844156	68.66053		0.422995113	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	197.6162549	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	4.984063		0.025823415	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	197.4549296	186.6497	3.995754		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	183.0080088	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	1.694798	Pass
49	194.0288411	54.01654	25.62222		0.132053689	Fail	2.43E-08	3.19E-08	5.82E-10	54.7294	Fail
50	195.8679754	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

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		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	Done	Ready		24/52 ~ 46 %	Good
	W5	B+1C	15x15	~ 191.7 V	Done	Done	Done	Ready		24/52 ~ 46 %	Good
	W6	B+1C	15x15	~ 188.5 V	Done	Done	Done	Ready		22/52 ~ 42 %	Good
	W7	B+1C	15x15	~ 184.9 V	Done	Done	Done	Ready		22/52 ~ 42 %	Good
	W8	B+1C	15x15	~ 186.2 V	Done	Done	Done	Ready		22/52 ~ 42 %	Good
	W9	B+1C	15x15	~ 195.6 V	Done					13/52 ~ 25 %	
	W10	B+1C	15x15	~ 193.6 V	Done					16/52 ~ 31 %	
	W11	B+1C	15x15	~ 192.3 V	Done	Done	Done	Ready		26/52 ~ 50 %	Good
	W12	B+1C	15x15	~ 193.1 V	Done	Done	Done		Done	13/52 ~ 25 %	
	W13	B+1C	15x15	~ 188.8 V	Done	Done	Done	Ready		21/52 ~ 40 %	Good
	W14	B+1C	15x15	~ 191.6 V	Done	Done	Done	Ready		18/52 ~ 35 %	Good
	W15	B+1C	15x15	~ 193.0 V	Done					12/52 ~ 23 %	
	W16	B+1C	15x15	~ 152.4 V	Done					23/52 ~ 44 %	
	W17	B+1C	15x15	~ 150.4 V	Done					27/52 ~ 52 %	
	W18	B+1C	15x15	~ 137.7 V	Done					25/52 ~ 48 %	
	W19	B+1C	15x15	~ 146.5 V	Done					26/52 ~ 50 %	
	W20	B+1C	15x15	~ 138.9 V	Done					20/52 ~ 36 %	
	W21	B+1C	15x15	~ 127.5 V	Done					18/52 ~ 35 %	
	W22	B+1C	15x15	~ 143.6 V	Done					21/52 ~ 40 %	
	W23	B+1C	15x15	~ 130.6 V	Done					15/52 ~ 29 %	
	W24	B+1C	15x15	~ 151.8 V	Done	Done	Done		Done	21/52 ~ 40 %	
	W25	B+1.3C	15x15	~ 116.9 V	Done	Done	Done		Done	10/52 ~ 19 %	
	W26	B+1.5C	15x15	~ 111.8 V	Done	Done	Done		Done	13/52 ~ 25 %	
	W27	B+0.7C	15x15	~ 158.1 V	Done	Done	Done		Done	25/52 ~ 48 %	

Vbd
过低

USTC-IME 预量产品圆的情况

W3上52个 LGAD 的特征指标