

硅基转接板研发进展

-- 一种新的极低本底光探测器解决方案

杨海博^a, 王启东^a, 曹国富^b

(a) 中科院微电子研究所

(b) 中科院高能物理研究所

中国物理学会高能物理分会第十一届全国会员代表大会暨学术年会

2022.08.11. 辽宁师范大学 (大连)

- ❄️ **寻找无中微子双贝塔衰变和暗物质等稀有事件是国际上的研究前沿和热点。**
- ❄️ **惰性气体/液体时间投影室探测器(TPC)是主要探测手段之一，具有很强的国际竞争力。**
- ❄️ **发展极低放射性本底的光探测器系统是该领域内的重要研究课题。**
 - **下一代吨级 $0\nu\beta\beta$ 实验：~0.1ct/(yr×ton×ROI)**
 - **吨级探测器 → 几平方米或更大面积**
- ❄️ **该项工作源于nEXO实验的需求，同时可以应用于其它相关实验。**

❄️ 光电倍增管 (PMT)

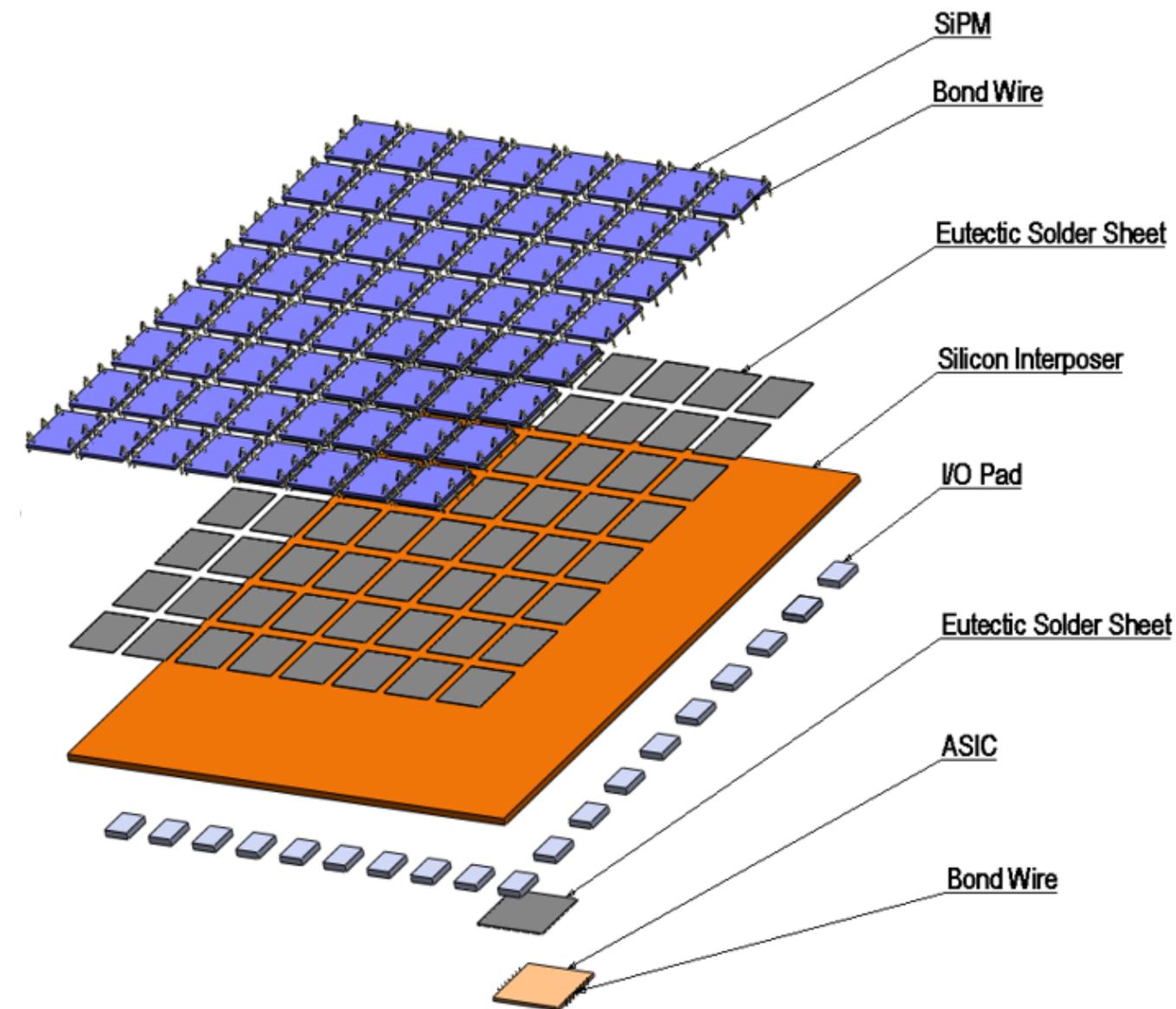
- 单光子探测、增益高
- 需要额外的努力制作低本底PMT, \sim sub-mBq/PMT

❄️ APD

- 增益低
- 极低放射性本底水平 – sub-ppt

❄️ 硅光电倍增管 (SiPM)

- 单光子探测、增益高
- 极低放射性本底水平 – sub-ppt
- 高暗计数率 → 低温工作环境



❄ SiPM作为光电探测器

- 高覆盖率
- 极低本底

❄ ASIC读出电子学

- 高集成度
- 极低本底

❄ 硅基转接板

- 支撑SiPM → 机械强度 → 够厚
- SiPM和ASIC电学连接 → 多层RDL → TSV
- 低温环境 → CTE匹配

❄ 以nEXO定义的初步要求为例：

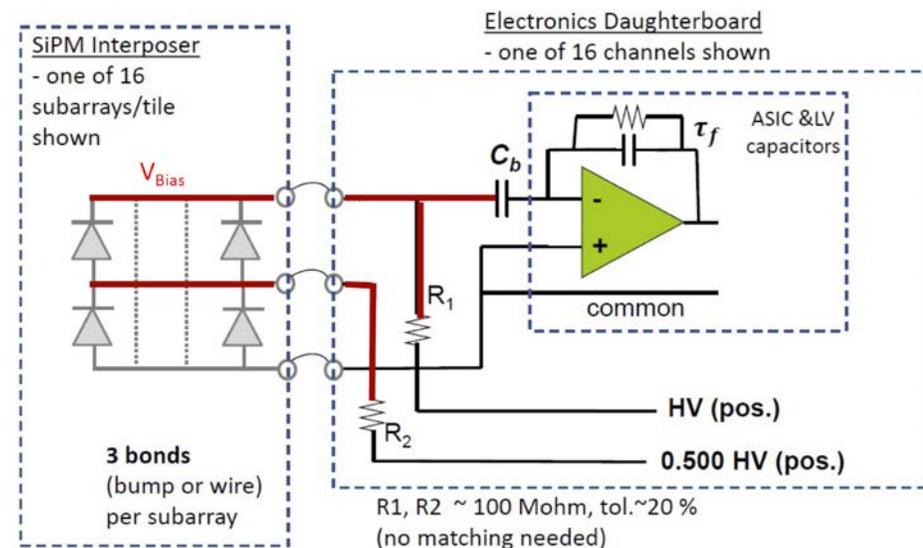
- 传输线 + TSV + vias电阻 $< 2 \Omega$ → 降低电子学输入阻抗
- 绝缘性能好于 $1 \text{ T}\Omega$ → 保障良好单光电子分辨
- 厚度 $> 300 \mu\text{m}$ → 足够的机械强度
- 面积： $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ → 降低物质质量
- RDL数目 ≥ 3 → 提供良好的屏蔽

❄ 在大面积、超厚硅晶圆上制作TSV极具挑战！

- 2017年，IME/IHEP启动这一研发任务
- 2018年制作第一批转接板原型(Run-I)，性能较差
- 2020年制作第二批(Run-II)，性能显著提高
- 2022年制作第三批(Run-III)，进行中

❄ Sherbrooke + IZM working on silicon from 2018

❄ BNL working on quartz

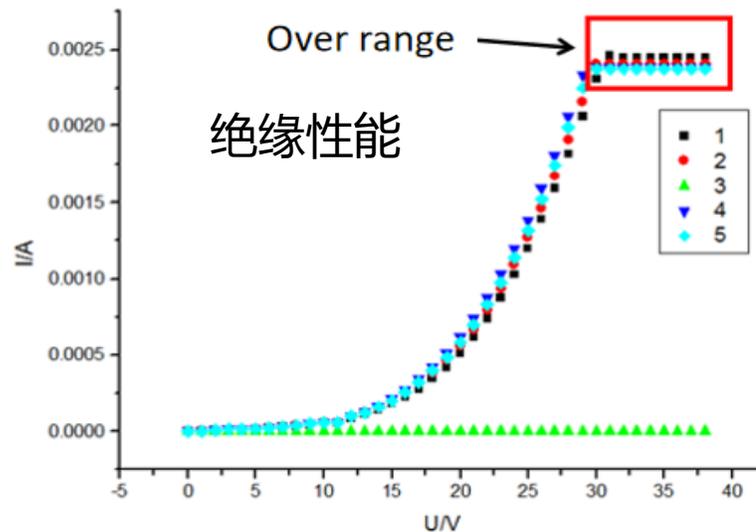
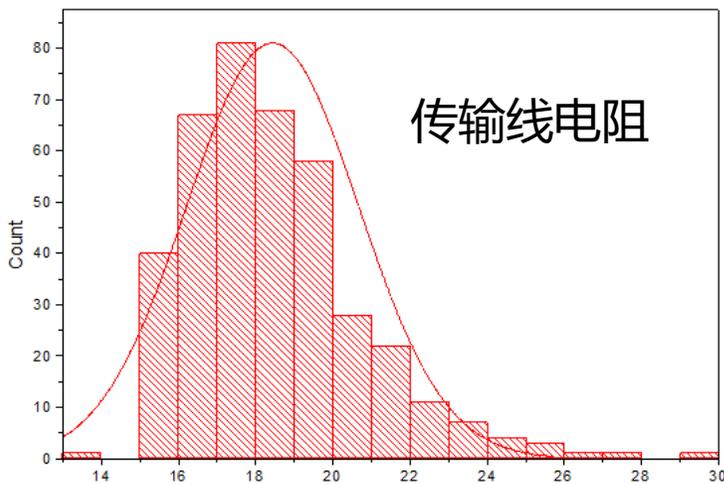
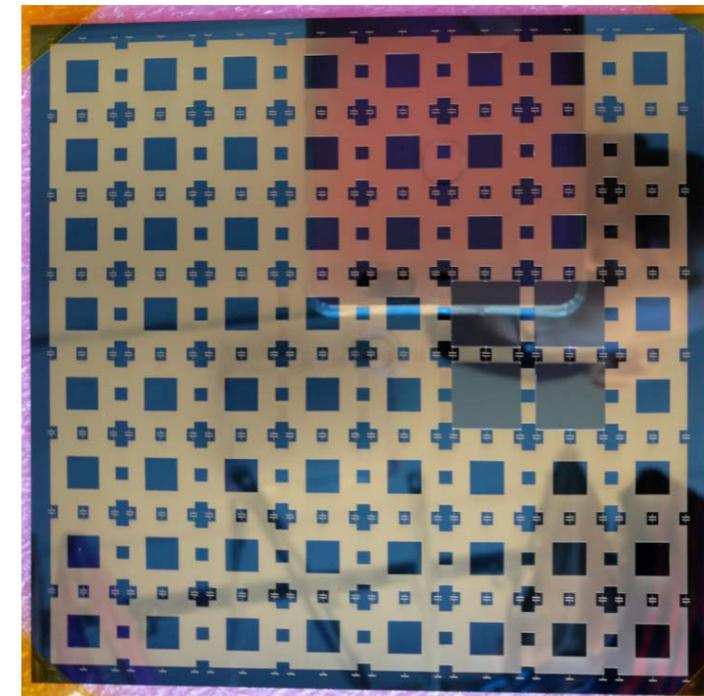
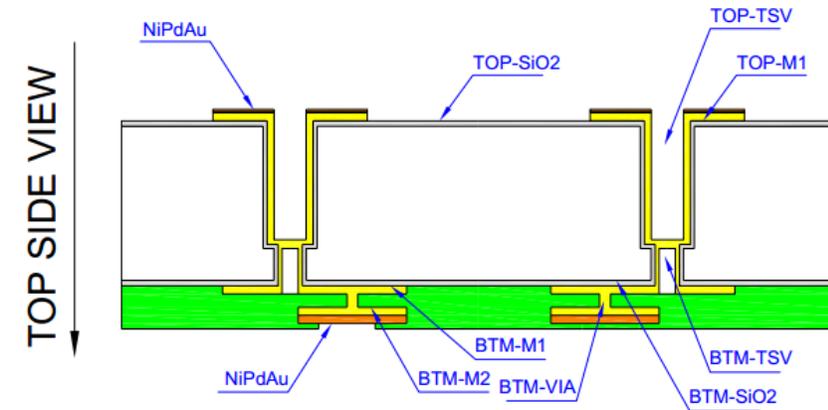


❄ 基于正背面大小TSV互连技术

- 厚度: ~320 μm
- 传输线平均长度: 95 mm
- 线宽: 50 μm , 线高: 3.5 μm
- 3层RDL, 正面1层, 背面2层, 由PI隔离

❄ 传输线电阻: 14 Ω – 30 Ω

❄ 绝缘性能: 几十M Ω



- ❄️ **更新布局设计，同样基于正背面大小TSV互连技术**
 - **厚度：~320 um**
 - **传输线平均长度：95 mm → 50 mm**
 - **线宽：50 um → 400 um，线高：3.5 um**
 - **3层RDL，正面1层，背面2层，由PI隔离**
- ❄️ **正面绝缘层：热氧 → PECVD**
- ❄️ **改进工艺参数**
- ❄️ **共生产8块转接板，其中3块用于本底测量**

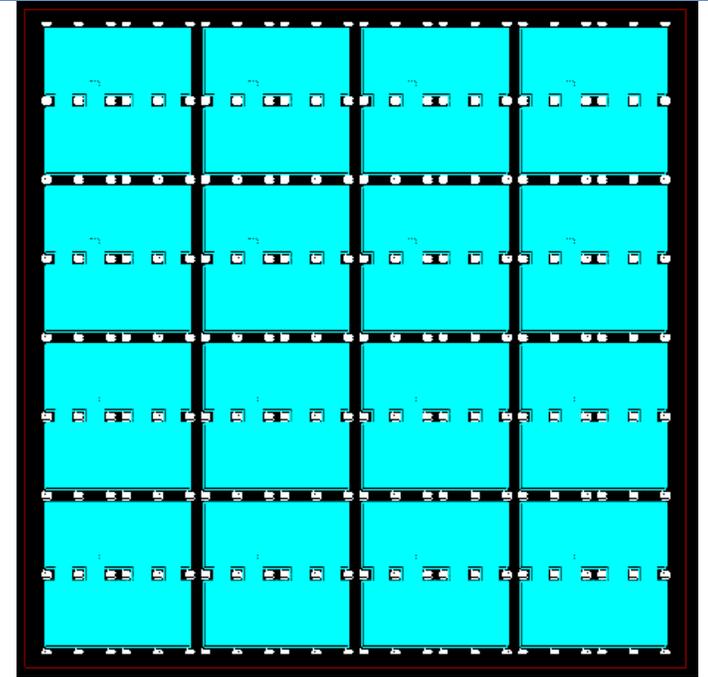
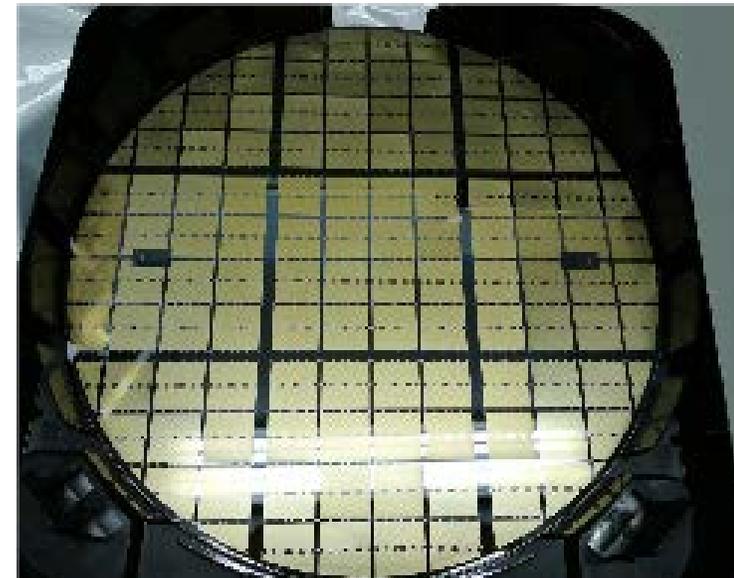


TABLE I
MATERIAL COMPOSITION OF THE SILICON INTERPOSER PROTOTYPE

Materials	Total mass (mg)	Mass fraction (%)
Silicon	7448.2	90.45
Copper	471.6	5.73
Nickel	177.6	2.16
Polyamide	177.6	0.84
Silicon dioxide	25.4	0.31
Palladium	24	0.29
Titanium	15	0.18
Gold	3.9	0.05

**< 1-2 ppt (both ^{238}U
and ^{232}Th)**
**Measured by our
PNNL collaborators.**



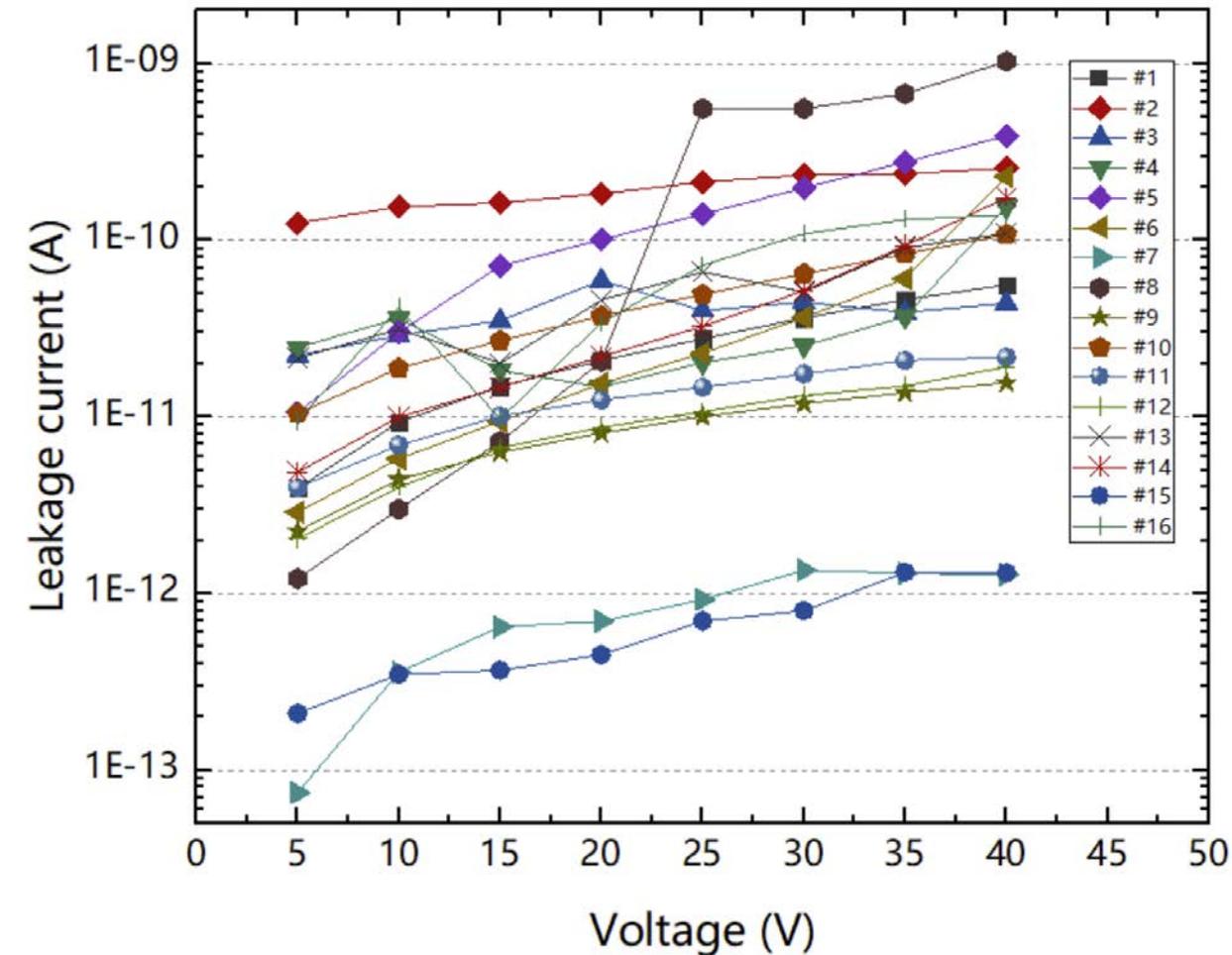


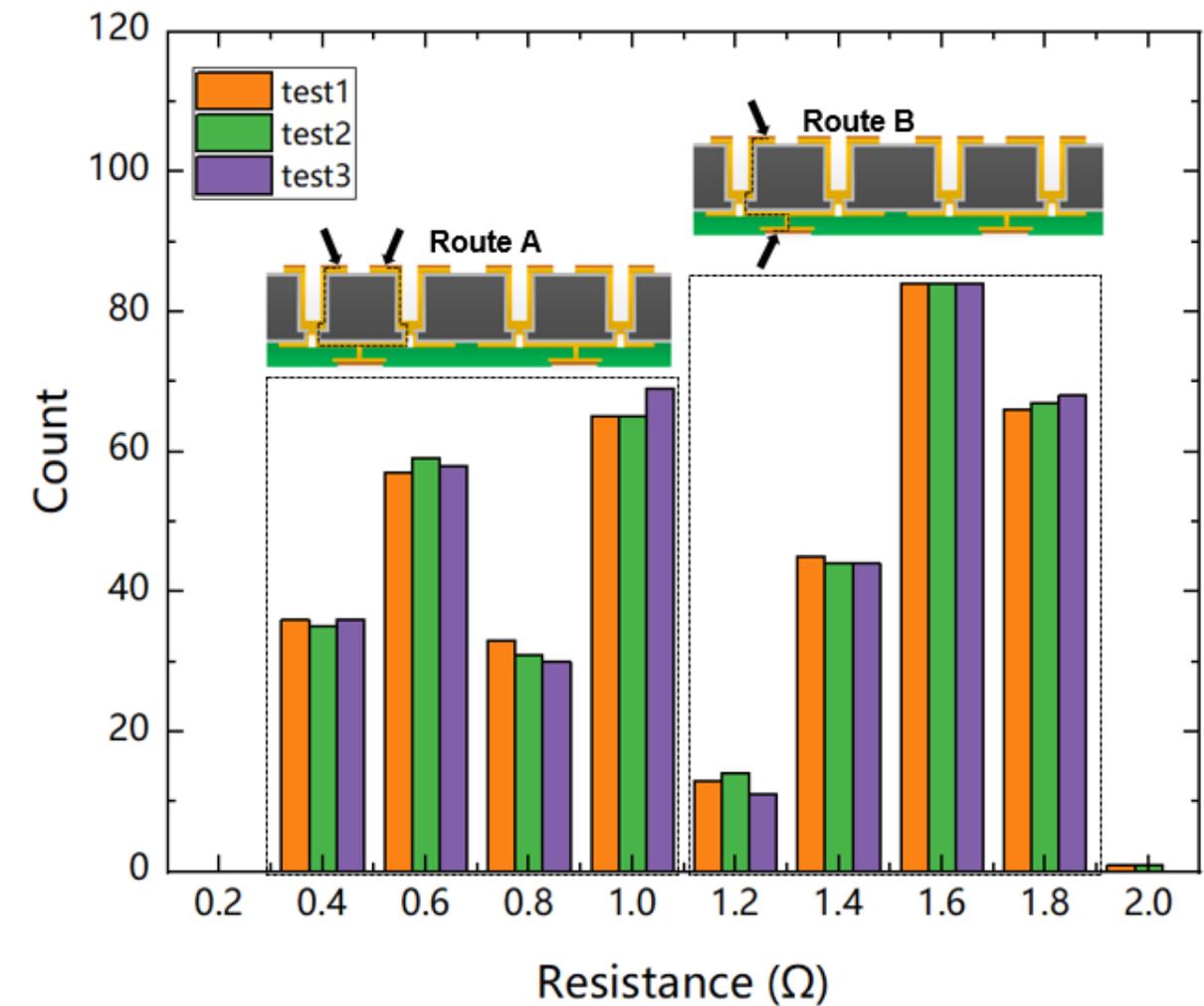
TABLE II
INSULATION RESISTANCES OF DIFFERENT BLOCKS ON THE INTERPOSER.

Block ID	R (GΩ)	Block ID	R (GΩ)
1	861	9	2500
2	125	10	475
3	644	11	1670
4	965	12	2260
5	161	13	482
6	924	14	647
7	26500	15	35900
8	537	16	548

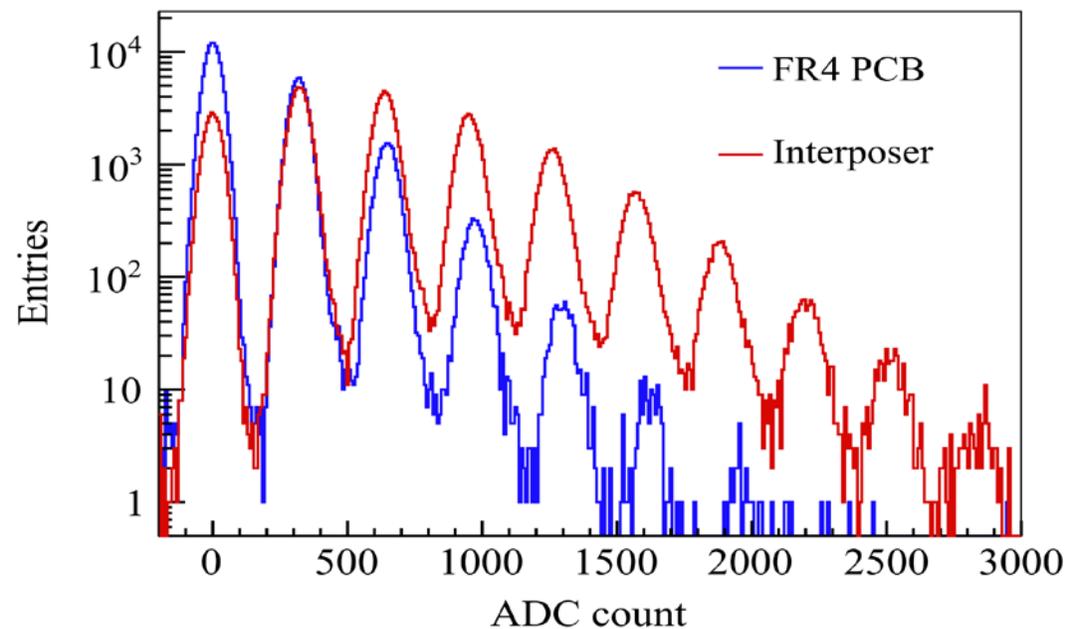
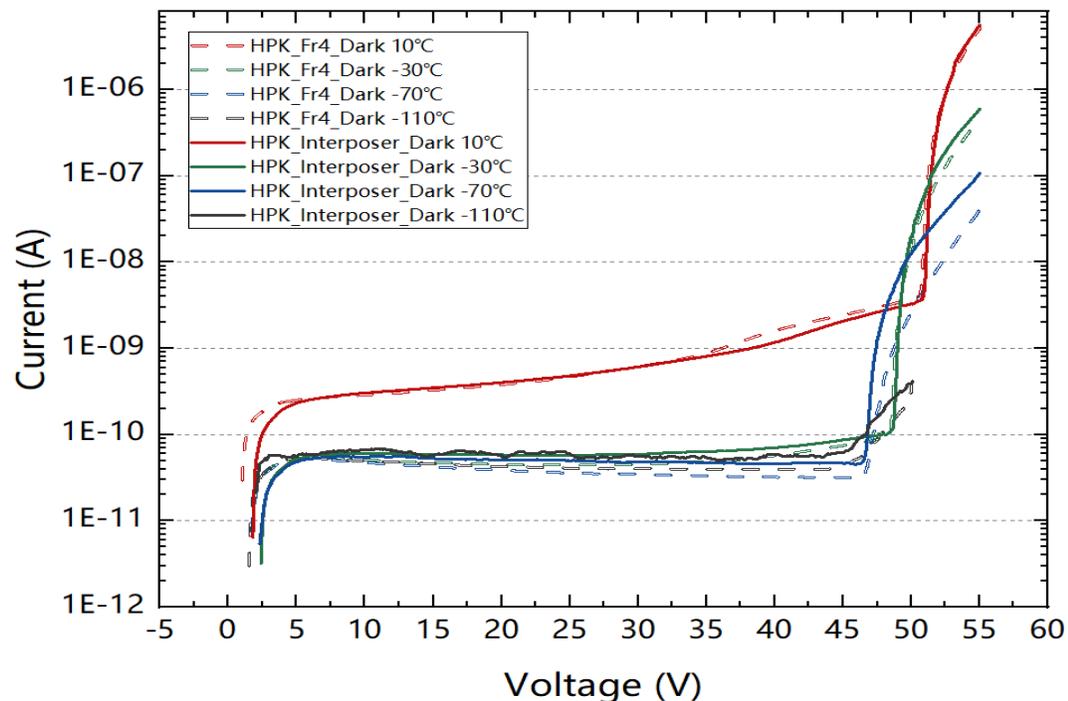
❄ 绝缘性能好于几十MΩ → 100 GΩ，绝大多数网络好于200 GΩ

❄ 同一转接板内的均匀性需进一步改进

❄ 工艺稳定性需要进一步提高，以提高良率



❄ 传输线 + TSV + VIAS电阻 < ~~14 Ω~~
~~30 Ω~~ → 2 Ω

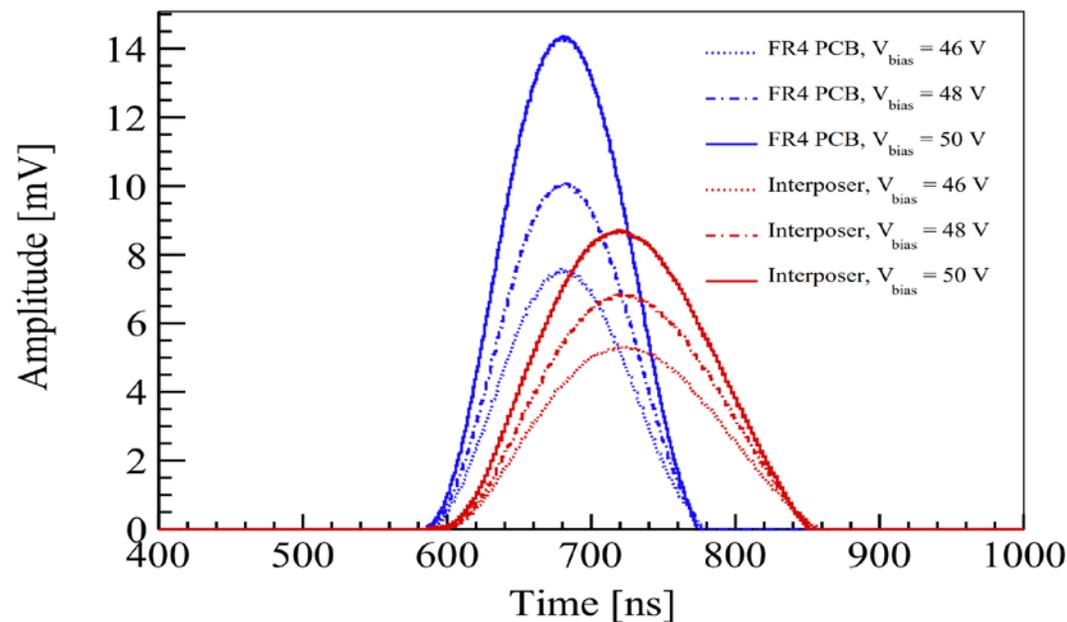


❄️ 集成了1个滨松VUV4 SiPM (1.2 cm x 1.2 cm)

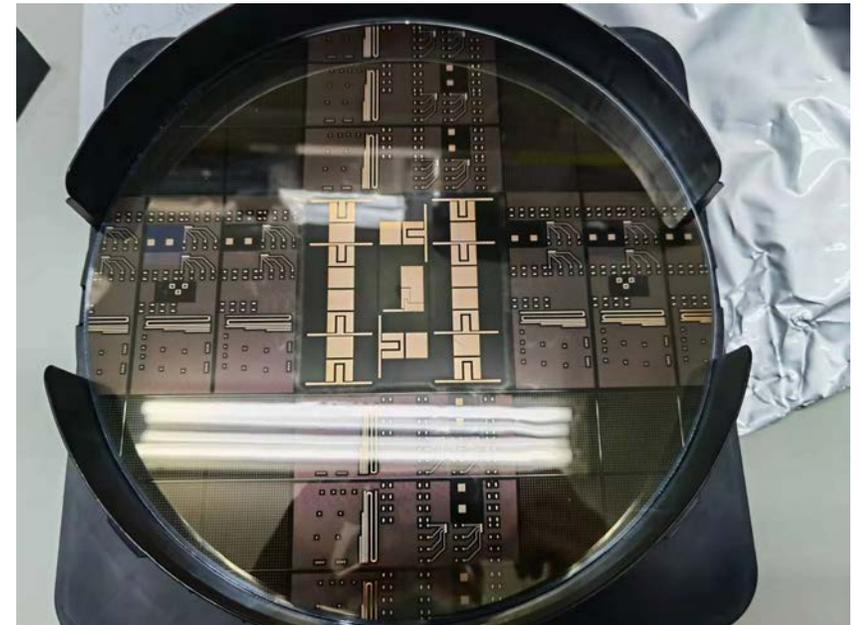
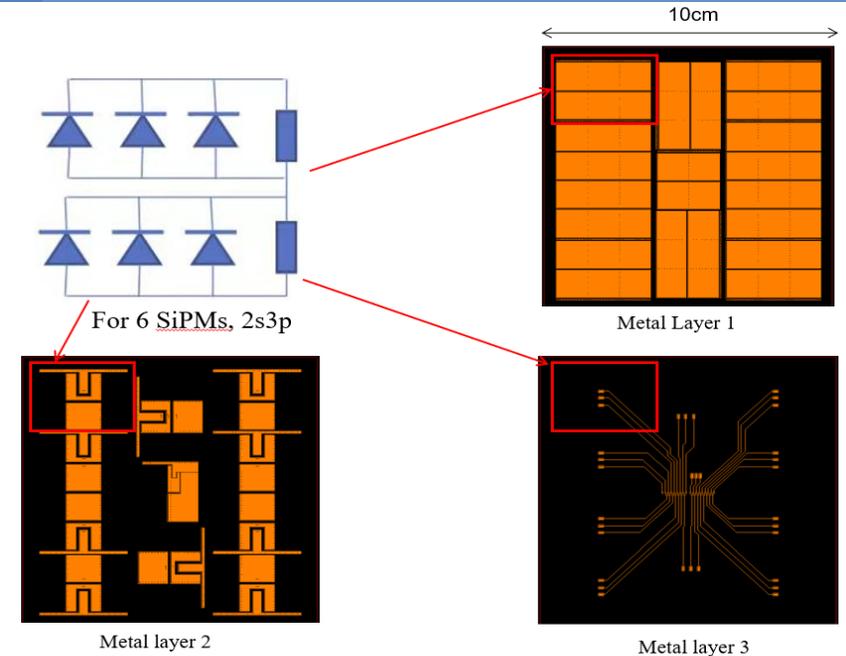
❄️ 工作温度: 10°C 至 -110°C

❄️ 正常的I-V曲线, 清晰的单光子信号

❄️ 与FR4 PCB性能可比



- ❄ 进一步提高绝缘性
- ❄ 进一步提高均匀性和稳定性
- ❄ 集成完整的探测器模块
- ❄ 预期今年年底完成制作



- ❄ **极低本底光探测器是寻找稀有事件中的重要研究课题**
- ❄ **首次在大尺寸硅基转接板上观测到清晰的SiPM单光子信号，有望为实现极低本底光探测器提供一种新的解决方案**
- ❄ **将进一步提高硅基转接板性能，为批量生产做准备**
- ❄ **更多细节请参考我们的文章：<https://arxiv.org/pdf/2207.09174.pdf>**
 - **已投稿到TNS**
- ❄ **欢迎交流、讨论 (caogf@ihep.ac.cn)**

谢谢