

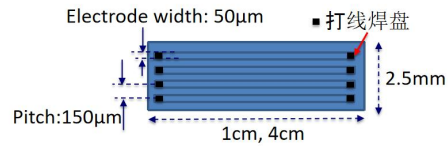
Q2: β 放射源时间分辨测试的 PCB 设计

你拿到了一批新型传感器:

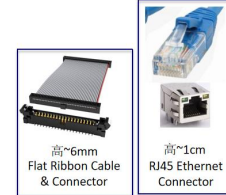
- $1.5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 的一通道方形 DC-LGAD 器件, 用于符合和提供时间参考。
- $1\text{ cm} \times 2.5\text{ mm}$ 和 $4\text{ cm} \times 2.5\text{ mm}$ (pitch= $150\text{ }\mu\text{m}$, electrode width= $50\text{ }\mu\text{m}$) 的微条型四通道 AC-LGAD 待测器件

你需要设计一块通用的 PCB 测试板(厚 0.7 mm), 用于 β 放射源(如 Sr-90) 评估微条型四通道 AC-LGAD 器件的时间分辨率。考虑具体放大电路设计的前提下, 为了保证获取到真实的物理极限时间分辨率, 你的 PCB 在版图和机械结构设计上必须遵守哪些关键原则? 重点论述 4-5 项原则, 并简要说明每项原则如何影响时间分辨率。

- b) 右边在几种常见数据接口和数据线类型中, 你会选择哪一种用于本测试板? 说明原因。
- c) 画出 PCB 的俯视图和剖面示意图, 并予以适当标注: 传感器位置, 焊盘位置, 打线路径, 数据接口(可用方形轮廓表示)等等。剖面图需包括 β 测试时的 PCB 布局, 双板设计需粗略估计传感器之间的距离。



1.5x1.5 mm



(a)

1、 $50\text{ }\Omega$ 特性阻抗控制的微带/共面波导传输线

影响: AC-LGAD 信号上升沿极快 (~数百 ps), 阻抗不匹配会导致反射和多次反射, 在波形上产生“振铃”, 使时间游走效应增大, 直接恶化时间分辨。必须根据板厚 (0.7 mm) 和介质介电常数 (FR4 约 4.3) 计算线宽, 确保从焊盘到放大器的射频走线严格 $50\text{ }\Omega$ 。

2、差分对等长且紧耦合布线 (若放大器为差分输入)

影响: AC-LGAD 通常输出差分信号 (AC 耦合)。差分走线长度失配会造成共模噪声转差模, 且时间偏移 (skew) 直接转化为时间测量误差。等长约束需控制在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 以内 (对应约 3ps 失配)。

3、高速放大器紧靠传感器焊盘放置, 并采用最短打线路径

影响: 打线 (bond wire) 引入额外电感和串联电阻, 会降低信号带宽, 使上升沿变缓, 增加时间抖动。将前置放大器 (如分立式 SiGe 或高速运放) 尽可能靠近传感器 ($< 5\text{ mm}$), 并使用多根并行金线 (如 2-3 根) 降低总电感至 $< 1\text{ nH}$ 。

4、完整的接地层与电源去耦, 避免地弹噪声

影响: β 粒子事件是随机单次触发, 瞬时电流可达数十 mA。接地层不连续会导致地电位反弹, 在参考电平上叠加噪声, 使甄别器触发时刻波动。采用多层板 (至少 4 层), 顶层为信号+地填充, 第二层为完整地平面, 底层为电源层, 并在放大器附近布置 $100\text{ pF} + 10\text{ nF} + 1\text{ }\mu\text{F}$ 三端去耦电容。

5、机械刚性与传感器间距控制 (双板堆叠设计)

影响: 时间参考 ($1.5 \times 1.5\text{ mm}$ DC-LGAD) 与待测 (AC-LGAD) 必须保持极近且固定的距离 (~几毫米), 以减小 β 粒子飞行时间差异带来的系统误差 (Sr-90 的 β 速度 $\sim 0.9c$, 1 mm 距离差引入 $\sim 3.7\text{ ps}$ 误差)。设计上下两层板对插或平行叠放, 通过精密定位销固定, 确保两传感器表面平行且间距可重复 (推荐间距 $2\sim 3\text{ mm}$, 通过垫片控制)。

(b)

MMCX (侧卧型, 高~1.5mm)

原因:

1.带宽足够: MMCX 支持 DC~6GHz, 远高于 AC-LGAD 信号带宽(~1-2GHz), 而 RJ45(<1GHz) 和扁平排线(严重串扰)无法满足。

2.阻抗匹配: MMCX 为 50Ω标准射频接口, 可直接连接示波器或高速采样芯片。

3.低高度: 侧卧型仅 1.5mm 高, 利于双板叠放时保持极近间距(<5mm), SMA(7.5mm) 会显著增大间距, 引入额外飞行时间误差。

4.抗振动: 锁紧结构优于普通插头, 适合放射源测试中的重复插拔。