

关于“符合”测试相关问题

什么是“符合”测试：

符合测试是粒子探测、半导体传感器测试领域中基于时间关联性的信号筛选技术，常搭配符合电路、时间数字转换器（TDC）使用。实验中会布置两个及以上探测器（如 LGAD 器件、参考探测器），人为设定一个皮秒 / 纳秒级的极短时间窗口（符合门）；只有多个探测器的信号在该时间窗口内同步或时差在允许范围内出现时，才判定为同一物理事件产生的有效符合事件并记录；若信号不同步、仅单个探测器输出信号，则判定为环境噪声、宇宙本底、随机干扰等无效事件并剔除。

结合本次 LGAD 测试场景：典型应用为 β 源望远镜测试，将参考探测器与待测 LGAD 器件上下排布，仅统计同一带电粒子先后穿过两层探测器、且信号落入符合时间窗的事件。

开展符合测试的原因：

1. 压制本底噪声，提升信噪比：单台探测器会持续受到环境放射性、杂散宇宙射线、电子学噪声等随机本底干扰，这类噪声信号在时间上相互独立。两个独立本底信号恰好同时落入窄时间窗口的概率极低，通过符合筛选可大量剔除假信号，保证采集到的信号源自真实带电粒子事例。
2. 锁定关联物理事件：高能粒子对撞、放射源衰变等物理过程会产生存在时序关联的粒子（如 β 粒子、 γ 光子），符合测试可精

准筛选出属于同一粒子 / 同一次物理过程的信号，区分有效事例与无关堆积事例，契合 HL-LHC 等高亮度对撞机抗径迹堆积的测试需求。

3. 标准化对比测试条件：在 LGAD 等传感器性能标定中，以符合事件作为统计样本，能保证所有被测器件的测试样本来源一致，避免随机样本差异影响分辨率、增益等指标的标定结果。

时间分辨率测量必须使用符合信号的原因：

1. 消除初始时刻的不确定误差：单独测量单探测器的时间响应时，粒子产生 / 发射的初始时刻无法精确定标，会引入巨大系统误差。而符合测试中，同一粒子同时触发两层探测器，粒子的原始发射时刻对两个探测器是完全同步的，测量两个探测器信号的时间差，可直接剥离源端时间不确定性，只反映探测器自身的时间响应特性。
2. 匹配时间分辨率的计算模型：本次实验采用公式 $\sigma_{system}^2 = \sigma_{Ref}^2 + \sigma_{DUT}^2$ 计算待测器件（DUT）本征时间分辨率，该公式基于双探测器符合计时建立。利用已知性能的参考探测器（Ref）作为时间基准，通过系统总分辨反推待测 LGAD 的固有时间分辨率，这一计算逻辑必须依托符合信号实现。
3. 剔除偶然事件对定时统计的干扰：时间分辨率由大量事例的时间差统计分布拟合得到（高斯拟合误差 σ 即为分辨率）。符合筛选能保证所有统计事例均为真实粒子信号，避免随机噪声破坏时间分布的统计规律，保障拟合结果真实反映器件性能。

朗道效应：

定义：朗道效应（Landau 效应）是高能带电粒子穿过薄层介质（如本次实验中的硅基 LGAD 传感器）时出现的能量沉积统计涨落现象。

具体原理：最小电离粒子（MIP）穿过硅传感器时，会通过电离作用损失能量并产生电子 - 空穴对。由于碰撞的随机性，粒子在薄硅层内的能量沉积量并非固定值，而是服从朗道分布（非对称分布，存在明显长尾）。表现为：同一类型的入射粒子，在相同器件中沉积的能量忽大忽小，最终导致传感器输出的信号幅值出现显著差异。

结合文档公式：

$$\sigma_{DUT}^2 = \sigma_{timework}^2 + \sigma_{TDC}^2 + \sigma_{jitter}^2 + \sigma_{Landau}^2 + \sigma_{Disortion}^2$$

可知朗道效应是 LGAD 时间分辨率的固有误差来源之一，能量沉积不均会直接造成信号幅度不一致，进而引入定时误差。

消除能量沉积不均匀（信号幅度不一致）带来误差的方法：

针对两层探测器符合测试中，朗道效应引发的信号幅度差异、定时偏差问题，结合 LGAD 测试场景，分为硬件电路优化、数字算法处理、实验数据筛选三类方案，具体如下：

1. 恒比定时甄别：这是解决时间游走效应（Time walk）（信号幅度不同导致定时点偏移）、抵消朗道效应带来幅度差异的最常用手段。传统固定阈值甄别方式下：大幅值信号会提前触发电平阈

值，小幅值信号延后触发，幅度差异直接转化为时间误差。恒比定时原理：不设置固定电压阈值，而是始终提取信号峰值的固定比例位置作为定时点。将信号分为衰减路与延迟反相路，两路信号叠加后的过零点对应原始信号的固定幅值比例，该定时位置与信号总幅度无关。无论朗道效应造成信号幅值偏大还是偏小，定时时刻保持稳定，从硬件层面消除幅度不一致带来的定时误差。

2. 电子学与前端电路优化：选用高增益、高带宽放大器，优化信号上升沿 t_{rise} ，由抖动公式 $\sigma_{jitter} \propto \frac{t_{rise}}{S/N}$ 可知更快的信号上升沿可弱化幅度涨落对定时的影响，同时提升信噪比，抑制朗道涨落的相对占比。统一两层探测器的前端读出电路参数（增益、偏压、阻抗），保证不同幅度信号的放大、传输特性一致，避免电路放大差异叠加朗道涨落。

3. 数据预处理与离线算法修正：幅度关联校正：采集每一个符合事件的信号幅值与时间差，建立幅值 - 时间偏移的关联曲线。利用该曲线对所有事例做离线校正，补偿因能量沉积不均产生的时间偏差。

幅度关联校正：采集每一个符合事件的信号幅值与时间差，建立幅值 - 时间偏移的关联曲线。利用该曲线对所有事例做离线校正，补偿因能量沉积不均产生的时间偏差。

多事例叠加统计：对大量符合事例做高斯拟合统计。朗道涨落属于随机误差，样本量越大，随机涨落的相互抵消效果越强，最终拟合得到的时间分辨率会更贴近器件真实性能。

4. 实验工况优化：稳定探测器工作偏压：LGAD 为雪崩增益器件，偏压会直接影响增益与输出幅度。严格固定两层器件的反向偏压，避免工作点漂移放大能量沉积的幅度差异。
- 选用厚度均匀的传感器：朗道效应在薄介质中涨落更明显，在器件选型时保证两层 LGAD 耗尽层厚度（约 50 μm ）均匀一致，减小固有能量沉积差异。

安装 Claude，写一个小游戏：



