

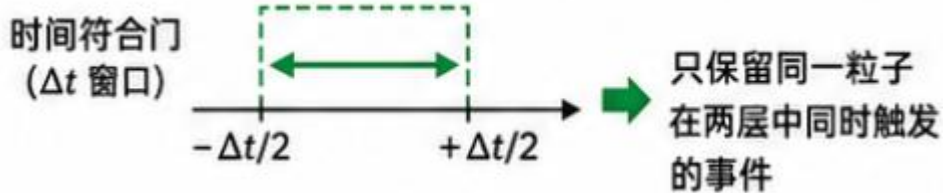
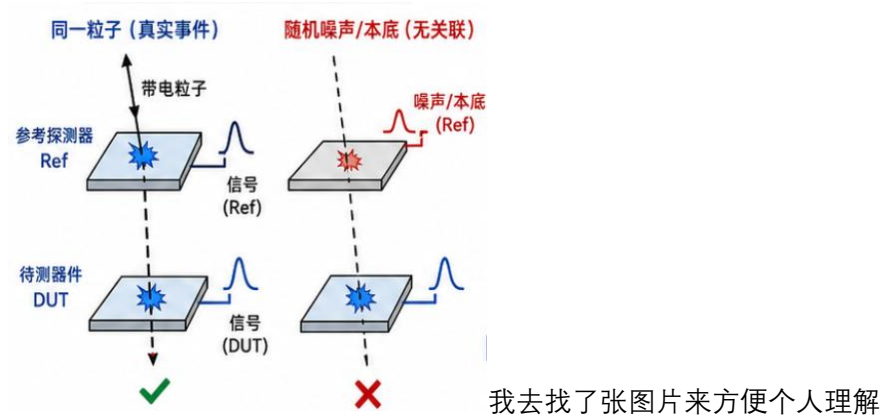
第五次作业——半导体传感器性能

赵强

1. 什么是“符合”测试？为什么要进行符合测试，为什么时间分辨率的测量要用符合信号来测量？

(1) 首先先来回答什么是“符合”测试呢？

“符合”测试,核物理与粒子探测实验中的一种基本信号筛选技术,指的是当同一个粒子同时在两层或多层探测器上产生信号时,只统计那些时间上同时出现的信号事件。这种方法确保分析的信号确实来源于同一粒子,而不是其他噪声或背景粒子。



我们可以划定一个恰当的时间窗口,让探测器在极短的时间内判定同时落入符合窗口的信号来源是否是同一个物理事件,从而决定将它视为一次“符合”事件,因为如果是不同粒子或者是噪声信号落入特定窗口同时触发事件的概率很低。可以用来区分和减少干扰影响

我的理解,在我看来,说白了其实是个筛选嘛,想象在街头抓拍行人,如果相机同时从两个角度拍到同一人,我们就只分析这两个镜头都出现的同一个人,剔除路人背景,这就是“符合”概念的应用。归根结底是为了保证是同一粒子,同时也能减少噪声和本底的影响

比如老师课上讲的 β 望远镜测试中,放射源发出的 β 粒子穿过参考探测器和待测 LGAD 样品 DUT。如果上下两层探测器都几乎同时探测到信号,就说明很可能是同一个粒子穿过了这两层探测器。这种“两个探测器同时响应”的事件,就叫符合事件;用这些事件做统计,就是符合测试。

(2) 为什么要进行符合测试?

a.筛选真正的粒子事件,排除噪声和偶然信号。

因为传感器和电子学系统中会有噪声,比如热噪声、电子学抖动、暗信号等。如果只看单个探测器的信号,很难判断它到底是真粒子造成的,还是噪声误触发。但如果上下两个探测器在同一个很短的时间窗口内都有信号,那么它是随机噪声的概率就大大降低。

b.确定同一个粒子的飞行路径和时间关系。

单层探测器只能告诉我们“这里有信号”,但不能完全确认粒子是不是按预期穿过了待测器件。那咋办?所以我们采用符合测试,通过上下多层探测器,可以建立一个简单的“粒子轨迹选择条件”:只有穿过参考探测器和 DUT 的粒子才被记录。这对测试 DUT 的真实性能很重要。

c.提高测量精度

通过仅统计同时出现在多层探测器的事件,可以减少偶然误差,筛选特定的径迹,从而获得更准确的时间分辨率和位置分辨率。

(3) 为什么时间分辨率的测量要用符合信号?

时间分辨率衡量的是探测器测量粒子到达时间的精确度。以老师在 ppt 说跑步

$t=6.90\pm 0.01s$ 的例子，就是说同一个粒子到达不同探测器的时候我们测的时间的一个所谓的“波动范围”。若统计的信号中混入了不同粒子的随机事件，就会产生误差，导致测量结果偏差增大。

使用符合信号，相当于“锁定”同一个粒子在多层探测器上的轨迹，减少随机干扰，从而真实反映探测器的时间分辨能力（例如目标时间分辨率小于 50 ps）。

问题 2: 由于朗道效应, 真实的粒子在器件中的能量沉积不均匀, 对于同一个粒子在两层上下排列的两层探测器产生的信号, 在进行符合信号来统计时间分辨率时, 应该怎样消除能量沉积不均匀的因素?

(1) 什么是朗道效应?

朗道分布是复合泊松分布在特点单次损失下的极限情形。

带电粒子穿过薄层介质时, 与电子发生少数几次随机碰撞, 每次碰撞传递的能量大小差异极大。这种效应导致粒子在薄探测器 (如硅传感器、薄闪烁体) 中沉积的能量 (输出信号幅度) 呈现出极大的涨落

在老师的 pdf 里看到这个式子, 他是说 DUT 的时间分辨率不是单一因素决定的, 是由多个贡献叠加成的

$$\sigma_{DUT}^2 = \sigma_{timewalk}^2 + \sigma_{TDC}^2 + \sigma_{jitter}^2 + \sigma_{Landau}^2 + \sigma_{Distortion}^2$$

这里的 σ_{Landau}^2 就是朗道效应带来的时间展宽了

同一个粒子事件看起来路径相似, 但微观电离过程不同, 导致信号幅度、上升沿、

达到阈值的时间都可能不一样。

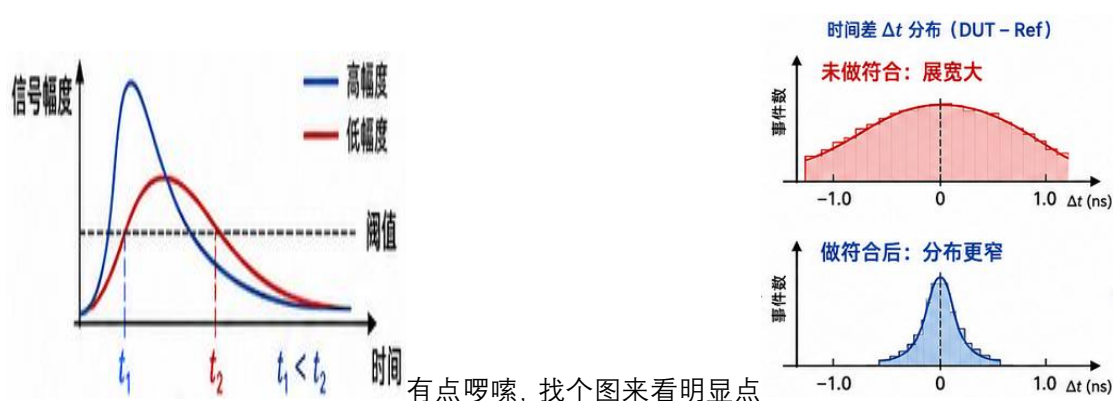
其实之前的课程也有让学过朗道效应这个事情。用我的想法聊一聊：

当高能带电粒子穿过物质时，它在材料中的能量沉积不是均匀的，而是呈现长尾分布：大部分粒子沉积能量接近平均值，但偶尔会有极大能量沉积事件（ δ 射线）。

不满足中心极限定理，有着大涨落，这样就形成我们图像里见到的那种长尾了。

就跟掷骰子一样，均值就在 3，绝大部分结果在平均值附近，但偶尔出现极端大值 6，这就是朗道分布的特点。

那怎么带来时间分辨率影响的呢？是因为朗道效应造成能量沉积不同，能量沉积不同又造成信号幅度不同，信号幅度不同进一步造成过阈时间不同。所以它会让时间差分布变宽，最终恶化时间分辨率。



右面的图，明显上面时间展宽大，那我们的时间分辨率也就很差了，因为时间分辨率其实就是时间差分布的宽度嘛~

(2)如何消除信号幅度不一致带来的误差？

时间测量受信号幅度影响，幅度大的信号可能触发得更快。通过记录每个信号的幅度，并进行校正，可以减小由能量沉积不均匀带来的时间误差。

如果两个信号形状相似但幅度不同，那么大信号会更早越过固定阈值，小信号会更晚越过固定阈值。这样，即使粒子真实到达时间相同，电子学读出的时间也会出现偏差。这就是 PPT 第 10 页提到的 time walk effect 了，它与信号幅值分布和放大器响应速度有关。

有什么能减小能量沉积不均匀导致的时间分辨率影响的办法呢？

A.进行 time-walk(时间行走效应)矫正

我们可以记录每个事件的信号幅度、电荷量以及过阈持续时间宽度 (ToT) 等信息, 然后研究“测得时间”和“信号幅度”之间的关系。如果发现大信号总是偏早、小信号总是偏晚, 就可以建立一个校正函数。通俗说, 就是给每个信号“按幅度补偿时间”。大信号提前了多少, 就往后修正多少; 小信号滞后了多少, 就往前修正多少。这样可以减少由幅度差异造成的时间展宽。

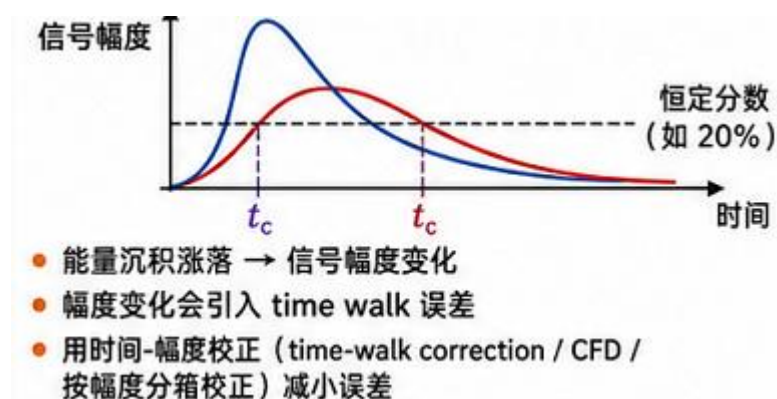
B.使用恒比定时 CFD, 而不是固定阈值定时

固定阈值定时的的问题是: 信号越大, 越早过阈; 信号越小, 越晚过阈。

恒比定时的思想是: 不看信号什么时候超过同一个固定电压, 而是看它什么时候达到自身幅度的一定比例, 比如 20%、30% 或 50%。

例如两个信号一个峰值是 100 mV, 一个峰值是 50 mV。如果用固定 20 mV 阈值, 大信号会更早过阈; 但如果用“达到各自峰值的 50%”作为时间点, 大信号取 50 mV, 小信号取 25 mV, 幅度差带来的时间偏移会小很多。

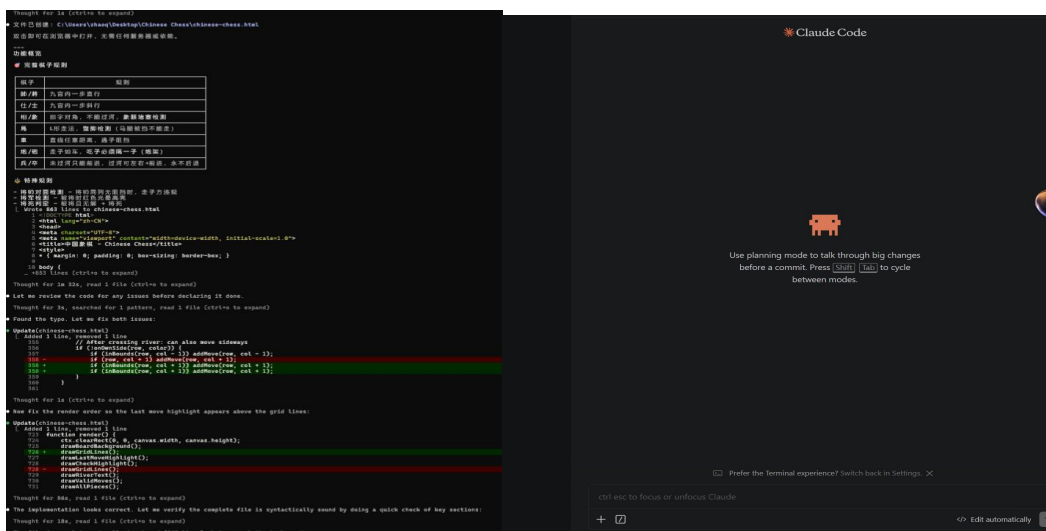
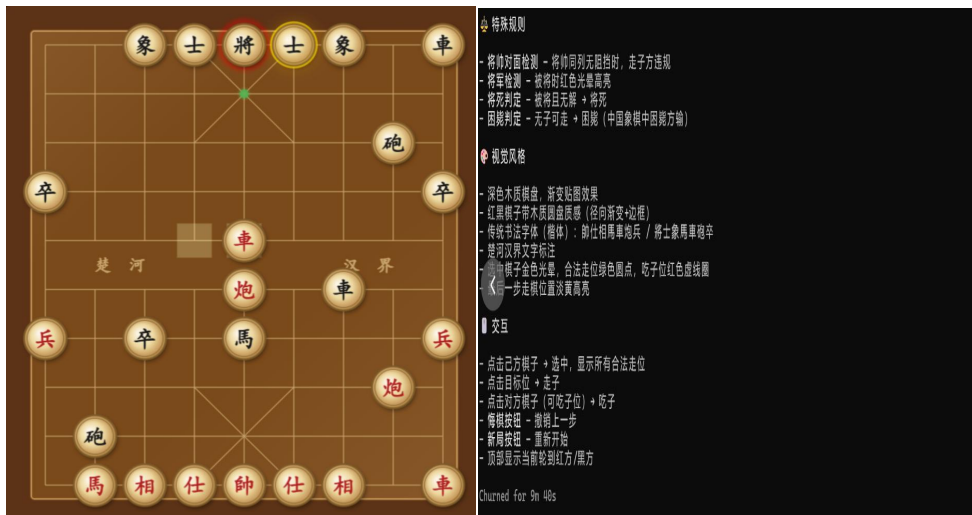
这相当于不再用同一条“绝对高度线”比较不同信号, 而是用“相对高度”比较。这样可以显著减小信号幅度不一致带来的 time walk。



考虑两台秒表读数接近的事件, 并对秒表的灵敏度差异进行修正, 这样就类似于消除朗道效应引入的幅度差异。经过矫正之后才能更准确评估 LGAD 的本征时间分辨率。

3.安装 claude code 接入 deepseek api

这个就很简单好用的了, 之前我安装过了, 做个中国象棋跟 AI 玩一玩



补充：关于消除信号幅度不一致带来的误差，老师说到我少了方式，没有提到过阀时间法，那就说明这个方法还是很常用且有效的所以我觉得有必要去了解一下所以我去学习一下然后把它补充在这里，其实在 A 处 time-walk 矫正说到了矫正函数的问题，但是确实讲的不是很清楚，我又去了解了一下之后总结一下

时间过阀法 (ToT) :

它不检测信号的绝对幅度值，而是记录信号到达其自身某个固定比例点 (例如峰值的一半) 的时刻。当信号超过某个固定阈值时，不仅记下这个时刻，还顺便测一下这个信号在阈值上面停留了多久。停留时间越长，说明信号幅度越大；幅度越大，用普通阈值法测得的时间就会偏早得越多。

对于大多数探测器脉冲信号 (尤其是经过成形放大后)，脉冲的宽度或下降沿拖尾长度与脉冲幅度之间存在单调的正相关关系——幅度越大，信号在固定阈值以上停留的时间就越长。

那我们怎么去应用上？

在读出电路中只需设置一个简单的电压比较器和一个时间数字转换器（TDC），就能同时记录两个信息：信号首次跨过阈值的时刻（作为原始触发时间），以及从跨过阈值到再次降回阈值之间的时间宽度（即我们说的 ToT 值啦）。首先通过标定实验建立 ToT 值与信号幅度（或直接与时间偏移量）之间的映射曲线；离线分析时，根据每个事例测得的 ToT 值查表或计算得到对应的幅度，进而推测出该幅度下前沿定时所引入的时间偏移量，最后从原始触发时间中减去这一偏移量，即可恢复真实的时间信息。

我的理解：找出“停留时间”和“时间偏早量”的关系。每来一个信号，根据它保持在阈值以上的时间长短，反过来修正那个原始的时间读数——幅度大的减多一点，幅度小的减少一点。这样最后的时间就准了。

那我有点好奇它相比我之前了解到的 CFD 有什么优劣？

主要好处是：

避免了恒比定时（CFD）所需的复杂模拟比例电路，非常适合大规模像素化探测器芯片（如 Timepix 系列），也易于在 FPGA 或 ASIC 中实现全数字化处理。虽然 ToT 在实时消除幅度影响方面不如 CFD 直接，但它原理简单、资源消耗低，并且可以在数据处理阶段灵活修正，常作为 CFD 的补充手段，用于进一步提高符合测量的时间分辨率。

此外，我通过学习参考了下优秀同学的作业我还了解到了一个新方法，它叫做**最佳滤波法**，我也去了解了下，说一说理解。

最佳滤波法：

这个方法解决的不是幅度变化的问题，而是噪声带来的“时间抖动”。

就像今天讲作业提到的那个图，一个信号边缘本来应该是陡峭的直线，但噪声把它弄得弯弯曲曲，导致每次跨过门槛的时刻都随机晃动。这样我们设置的判断过阈的“门槛”也有误差的，那怎么把测量误差降低些？

最佳滤波法的思路就是给信号加一个“整形电路”，让信号的前沿变得更陡、更干净，同时把噪声尽量压下去。前沿越陡，噪声造成的晃动就越小。这个方法本身不关心信号幅度是高是低，它只管把时间测量的随机误差降到最低。所以它经常和恒比定时（CFD）或者时间过阈法配合着用——先通过最佳滤波把信号整利索了，再用 CFD 或 ToT 去对付幅度不一致的问题，这样两方面都照顾到了。

总结下：有了新见解！以前本来以为 CFD 和 ToT 几种方法都有各自的优劣，在应用时候选一个合适且有效降低误差的方式就好了，后来其实才发现比如 ToT 灵活修正和最佳滤波法让噪声清净，其实完全可以配合 CFD 一起运作起来，这样通过多层次的修正策略能有效提高时间分辨率的准确性和可靠性。几种方法相辅相成才是王道！