

微观世界的皮秒与微米：半导体传感器 性能表征

从物理原理到实验室测试

赵展鸿

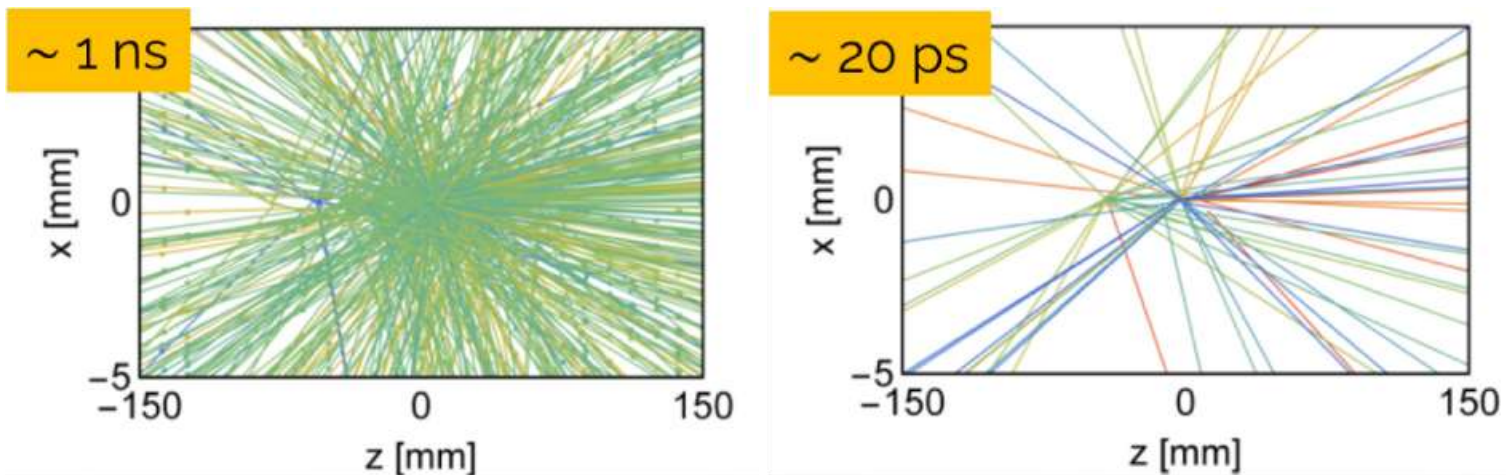
2026年6月8日

- 赵展鸿，中山大学2022级本科生，物理学，推免至中科院高能所，目前大四
- 编程语言：cpp,matlab,python
- 在2026年1月~4月在高能所参与LGAD性能测试工作，作为本科毕业设计
- 工作内容：基于激光TCT测试法和 β 源望远镜法，对不同类型的LGAD器件在不同的实验参数下（偏压、阈值、电荷量）进行标定，检验流片器件是否符合设计预期指标
 - 参与实验平台搭建工作
 - 完成实验室自动化测试的编程工作
 - 负责不同型号的LGAD器件时间分辨率、位置分辨率测量工作

核心问题 key question

- Q1:粒子探测器的物理目标是什么?
- Q2:传感器是怎么探测带电粒子的?
- Q3:怎样测试传感器的测量性能?

Q1:粒子探测器的物理目标



通俗来说：对撞机是一台探测粒子的“照相机”，我们希望重建每一次粒子对撞的完整物理过程（测量粒子的动量、能量、寿命、种类等），探测器是对撞机的“镜头”

高亮度环境下引入时间维度对径迹堆积的显著抑制效果示意图。大量次级顶点与主顶点在空间上重叠，径迹密度较高，导致重建困难；引入 20 ps 的时间窗切割后，无关的本底事例被有效滤除

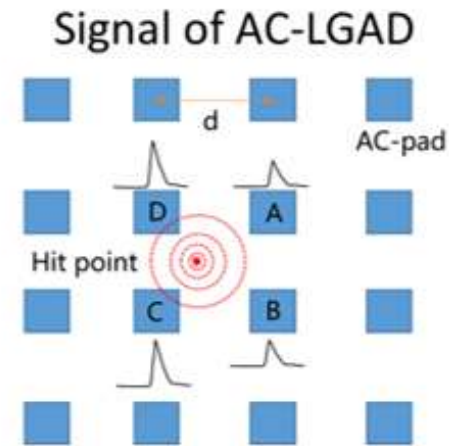
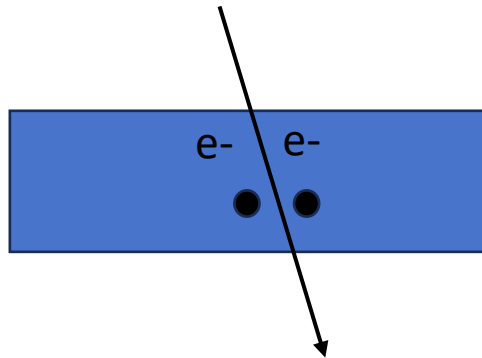
- 在地面高能物理实验中，以大型强子对撞机高亮度升级（HL-LHC）为例，单次束团对撞产生的本底堆积（Pile-up）事例数将增加至140–200个。面对密集的本底干扰，单纯依赖三维空间信息的传统径迹探测已逼近物理分辨极限。
- 如果我们的探测器不仅能看清“粒子在哪”（空间），还能记录“粒子何时到达”（时间，精度需达20-30皮秒），就能像切片一样分清重叠的事件。

Q2: 传感器是怎么探测带电粒子的?

- **电离过程**: 高能带电粒子 (MIP) 穿过硅传感器, 与硅晶格中的电子发生库仑相互作用, 电离出初始电子-空穴对 (在硅中产生一对平均消耗约3.6 eV)。
- **载流子漂移**: 在反向偏置电压形成的内部电场下, 电子和空穴分别朝相反方向漂移。
- **肖克莱-拉莫定理 (Shockley-Ramo Theorem)**: 电荷并非必须被电极“收集”才有信号。**电荷在电场中运动时, 就会在电极上产生感应电流。**

$$i(t) = q \overline{E}_v(t) \vec{v}(t)$$

- $E_v(t)$ 是对应电极的权重电场, q 是载流子电荷量, $v(t)$ 是带电载流子瞬时漂移速度。



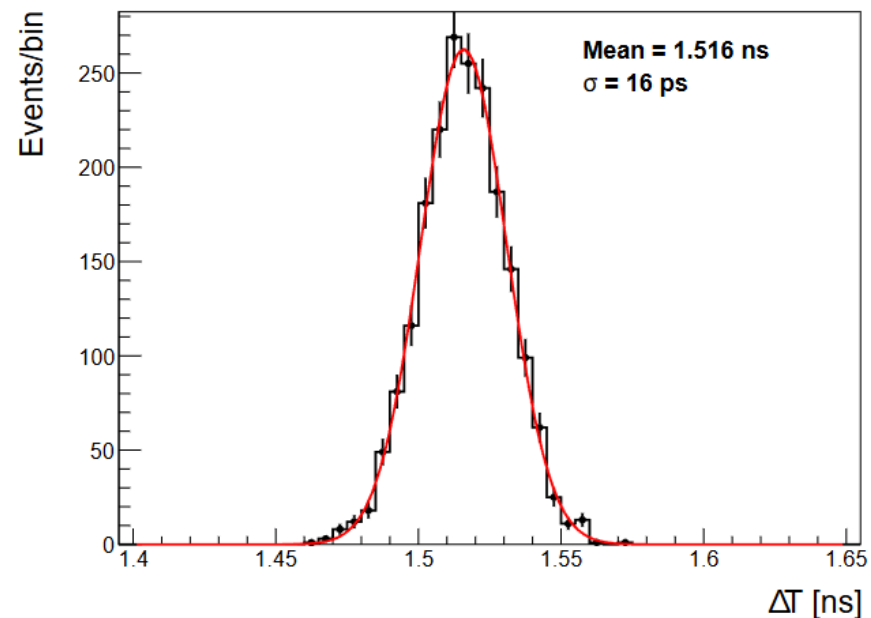
Q3:怎样测试传感器的测量性能?

➤ 误差与分辨率:

- 某人五十米短跑耗时 $6.9s$ ，听到发令枪响到按下秒表，以及看到跨越终点线到按下秒表，秒表的精度在 $0.01s$ 。因此，时间测量结果应写为： $t = 6.90 \pm 0.01s$ 。
- $0.01s$ 就是这次测量的测量误差，换句话说就是时间分辨率
- 使用的三角板的最小刻度是 $1mm$ ，测量时估读一位，那么测量精度就是 $0.1mm$
- $0.1mm$ 就是空间分辨率

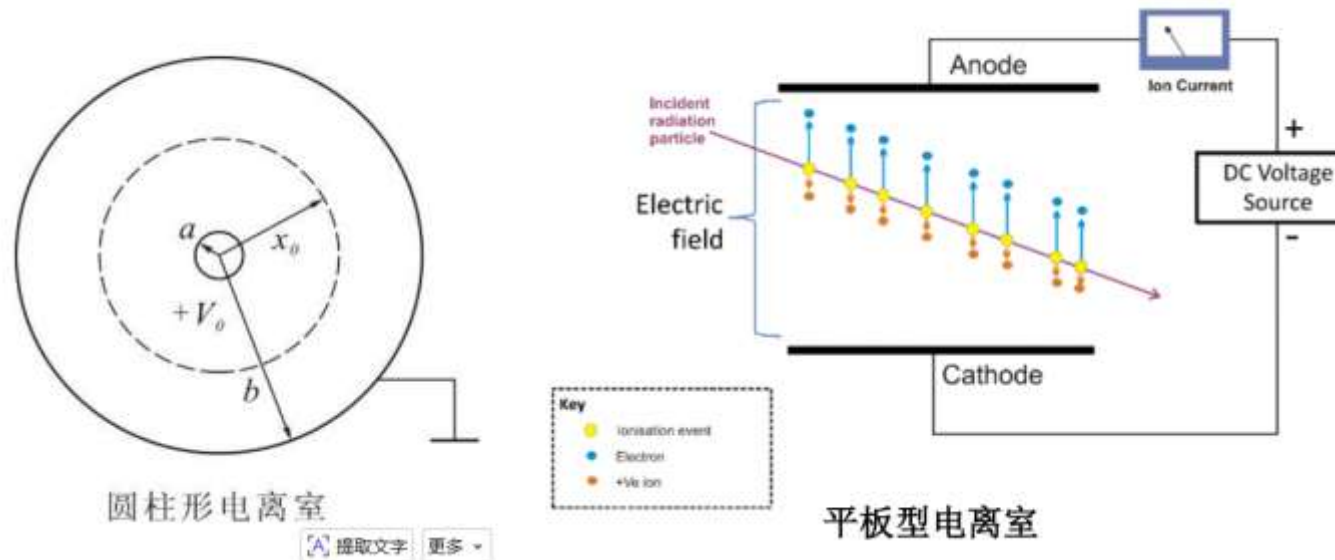
➤ 传感器的时间分辨率与位置分辨率就是核心的性能指标

- 设计目标是时间分辨率好于 $50 ps$ ，空间分辨率好于 $10 \mu m$ 的LGAD传感器
- 对传感器性能进行标定，测试传感器的时间、空间分辨率

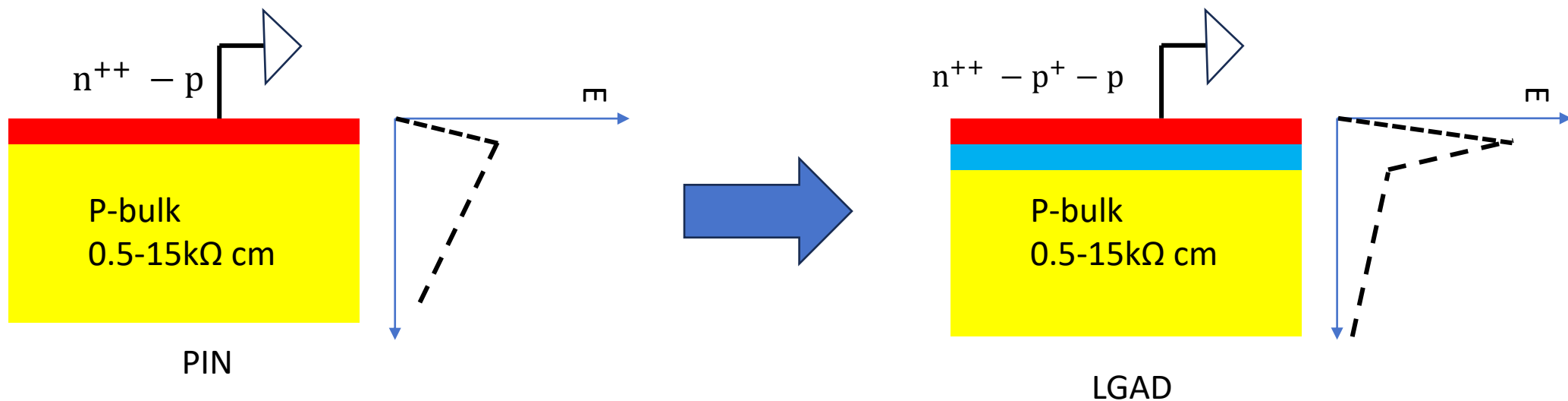


对于高斯分布，拟合的误差 σ 就是分辨率

- 常见的气体电离室有圆柱形电离室与平板型
- 介质：低密度的气体
- 结构：一端为阳极（圆柱形的阳极丝），一端为阴极（圆柱形的接地外壳）
- 物理过程：

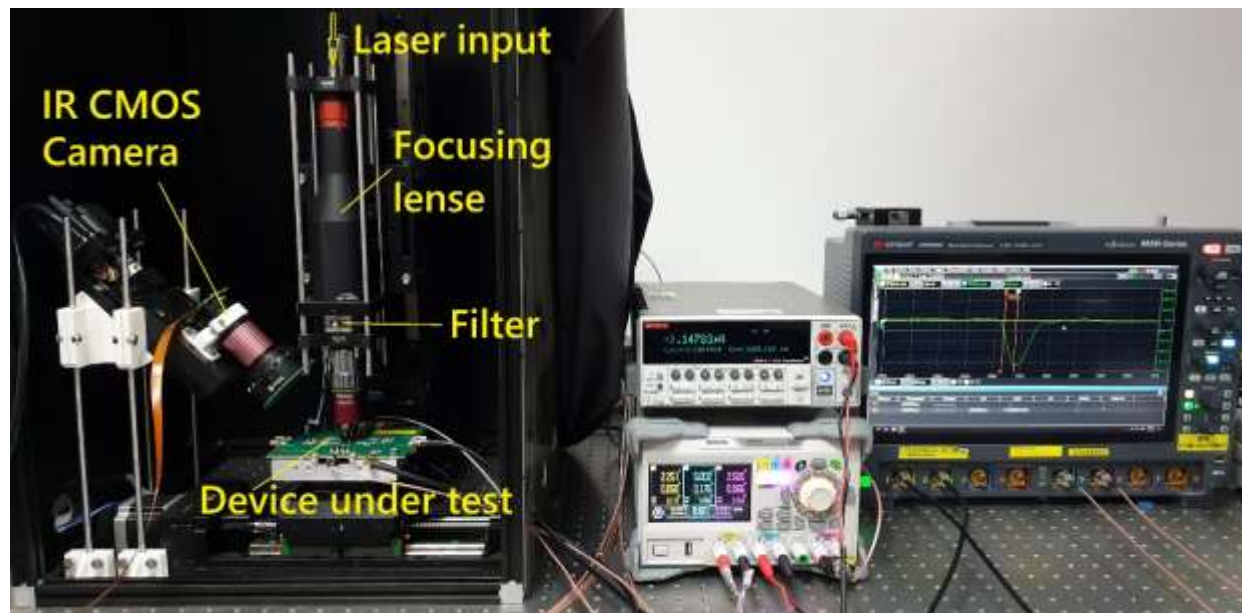
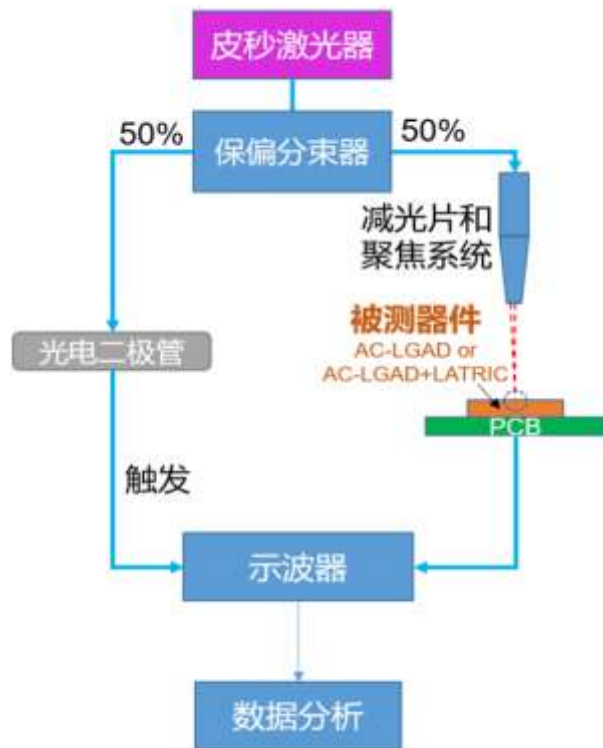


1. **初级电离 (Primary Ionization)**：入射的高能带电粒子直接与气体原子碰撞，将其电离，产生“初级电子-正离子对”
 2. **次级电离 (Secondary Ionization)**：部分被击出的初级电子具有较高的动能（在物理上被称为 δ 射线），它们在继续运动的过程中，会继续碰撞并电离周围的气体原子，产生“次级电子-正离子对”
 3. **载流子漂移 (Drift)**：在外加电场 E 的作用下，静电力会驱动电荷定向运动，电离出的电子向正电极（阳极）漂移，而正离子则向负电极（阴极）漂移
 4. **信号探测**：只要电荷在探测器内部漂移运动，就会通过静电感应在读出电极上产生瞬态的感应电流，**肖克莱-拉莫定理 (Shockley-Ramo's Theorem)**
- **平均电离能 (W -value)**：在宏观统计上，气体中每产生一对“电子-正离子对”，高能粒子平均需要消耗的能量（这个值被称为 W 值，因气体种类而异）

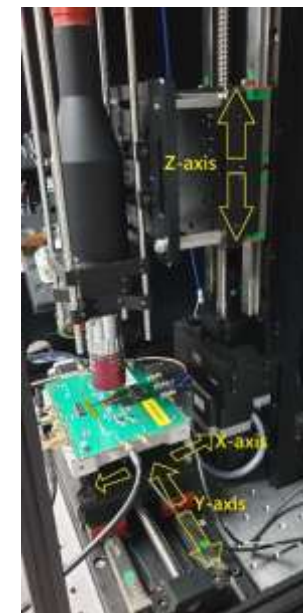


- 雪崩二极管，相对于传统的PIN二极管，在 n^{++} 和 p 衬底之间具有 P 型的增益层（高电场区）
- 工作在线性区
- 增益：10~50，相比起PIN有更大的信号
- 薄耗尽层：耗尽层厚度 $\sim 50\mu\text{m}$ ，信号上升时间 t_{rise} 比较快
- 较好的信噪比Signal/Noise ratio: 相比起SiPM，无自触发现象

时间分辨率测试

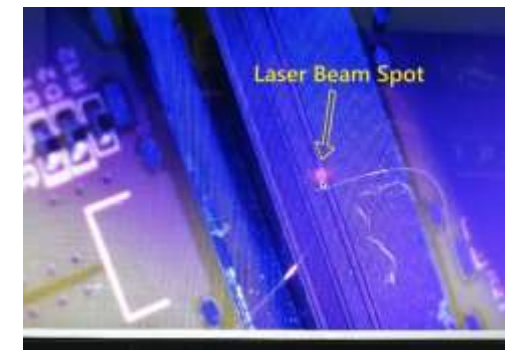


激光TCT测试完整装置设置

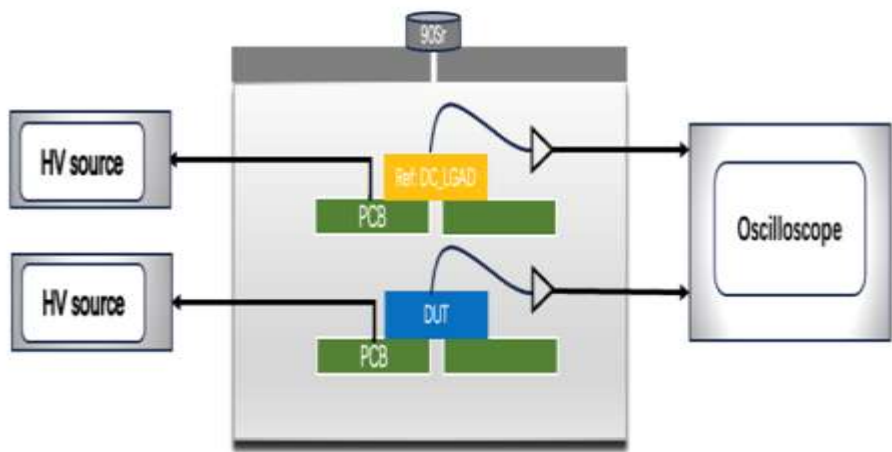


三轴可编程电机位移台

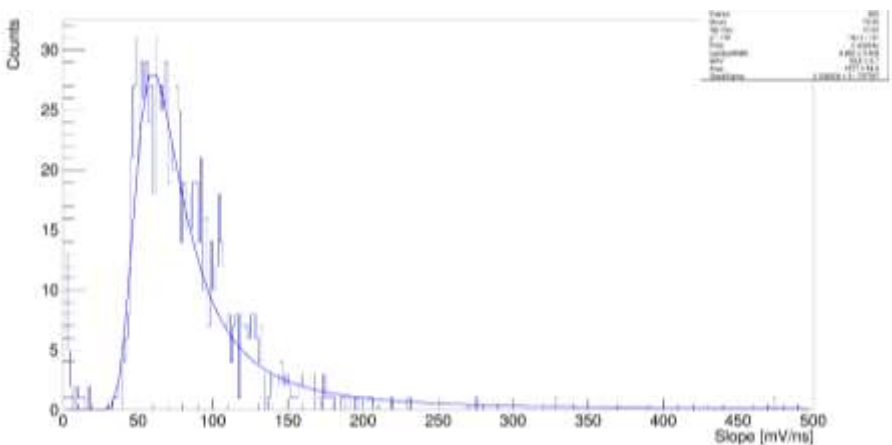
- 1064nm激光击中AC-LGAD器件，模拟真实粒子产生的信号，利用示波器采集信号进行数据分析
- 自动化实验采集方案：编写了具有“远程控制电机位移台->光斑检测->自动采集数据并上传服务器”自动化脚本，有效提高了实验效率



屏幕上的激光光斑位置检测



β 望远镜测试原理图 (DUT为待测LGAD样品)



$$\sigma_{system}^2 = \sigma_{Ref}^2 + \sigma_{DUT}^2$$

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

➤ Time walk effect $\sigma_{timewalk}$, 与信号的幅值分布、放大器响应速度有关

➤ Landau effect σ_{Landau} , 由能量沉积的不均匀性引起

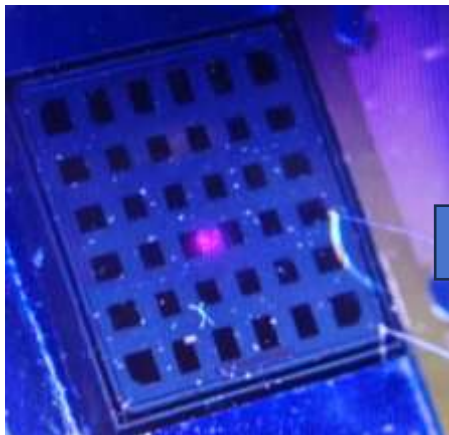
➤ Jitter effect $\sigma_{jitter} = \frac{N}{dV/dt} \propto \frac{t_{rise}}{S/N}$, 由信噪比和上升沿时间共同

决定

➤ $\sigma_{TDC} = \Delta t / \sqrt{12}$ (Δt : TDC的bin宽度, 由时间分辨单元决定, 满足均匀分布)

➤ $\sigma_{Distortion}$ 信号在读出链路中被展宽、反射、非线性失真导致

位置分辨率——光斑大小优化



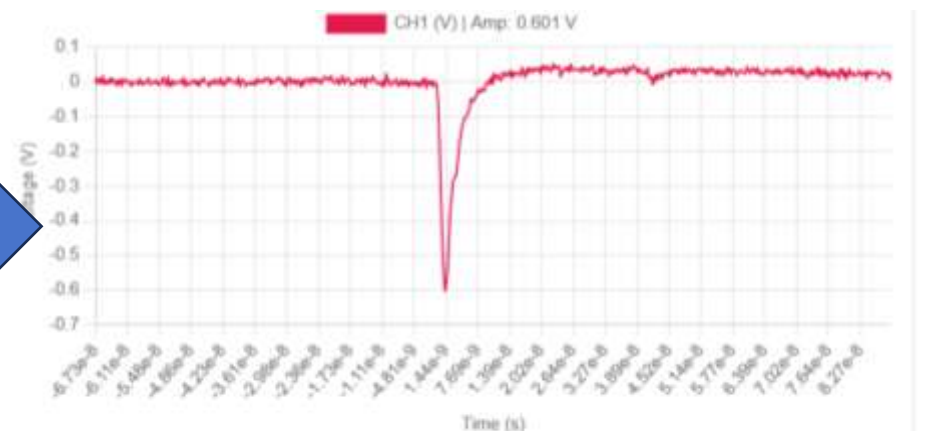
初始光斑位置

控制轴移动



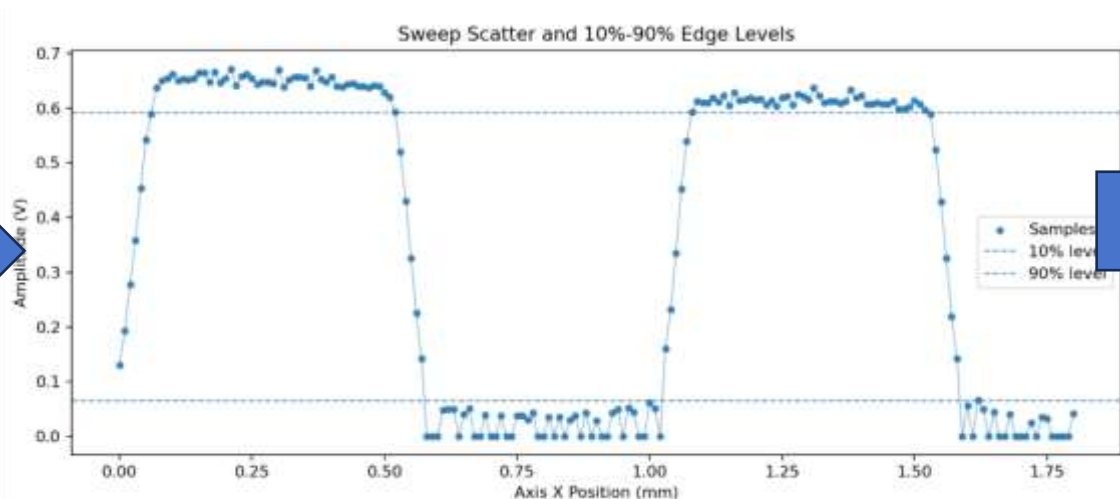
移动后光斑位置

提取幅值



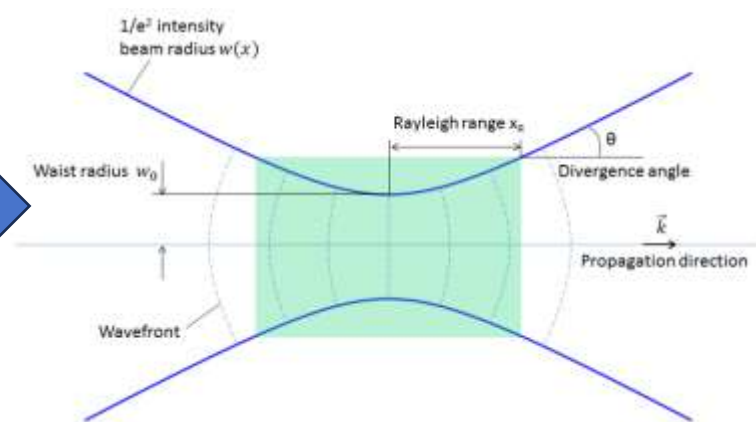
示波器接收的激光信号

扫描结果



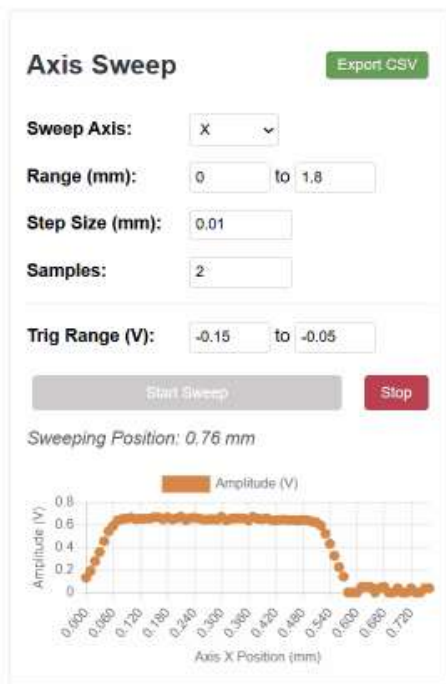
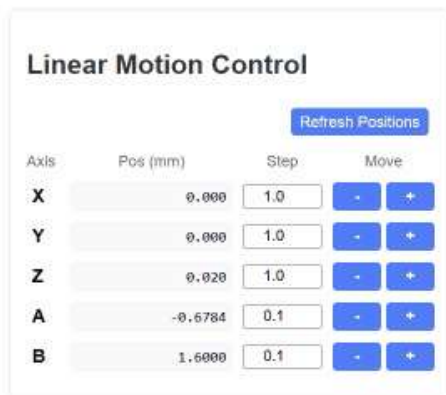
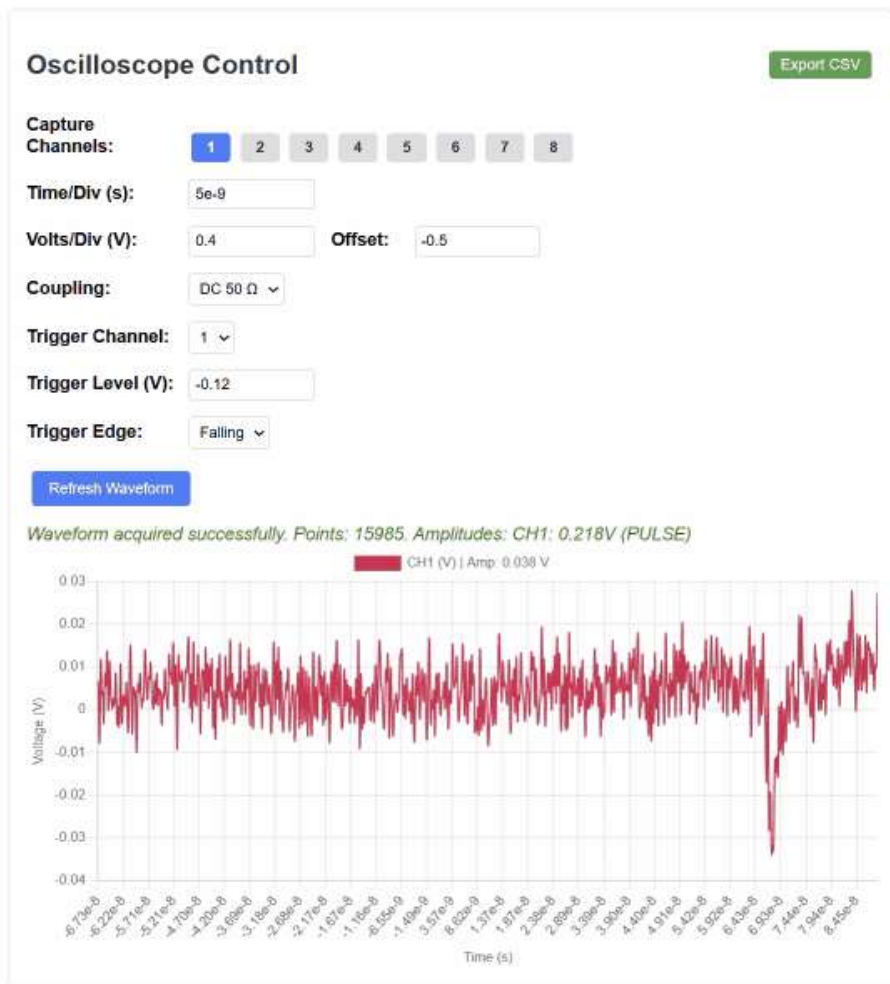
沿某个轴扫描后信号幅值—位移图

寻找高斯光束
聚焦高度

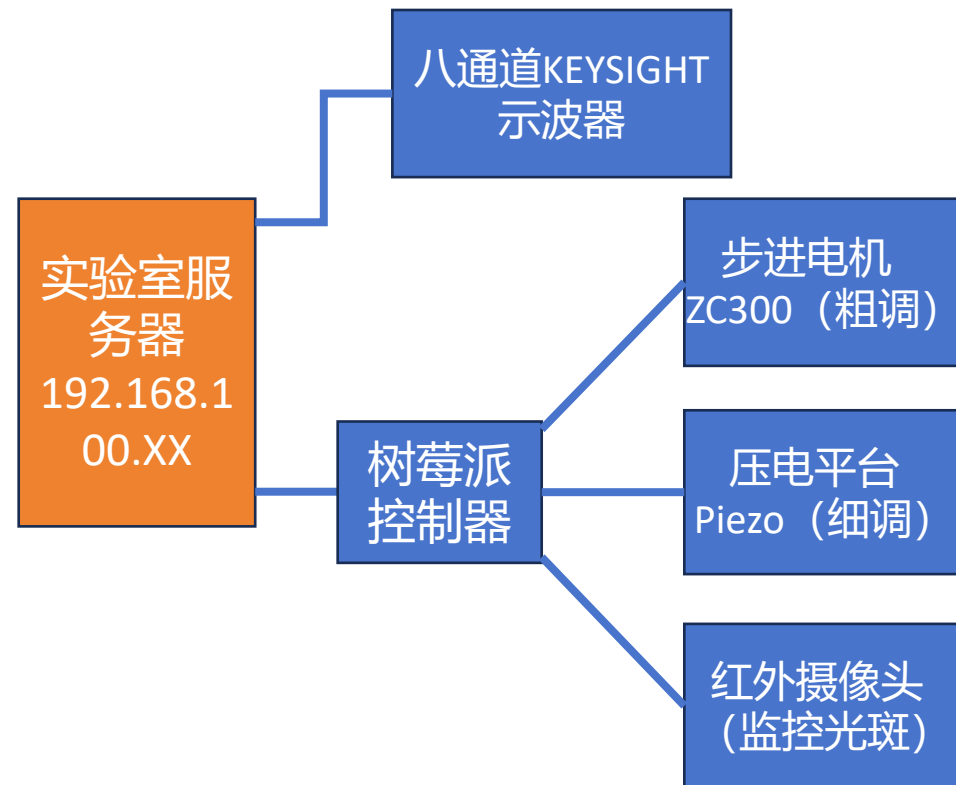


高斯光束示意图

位置分辨率——光斑大小优化

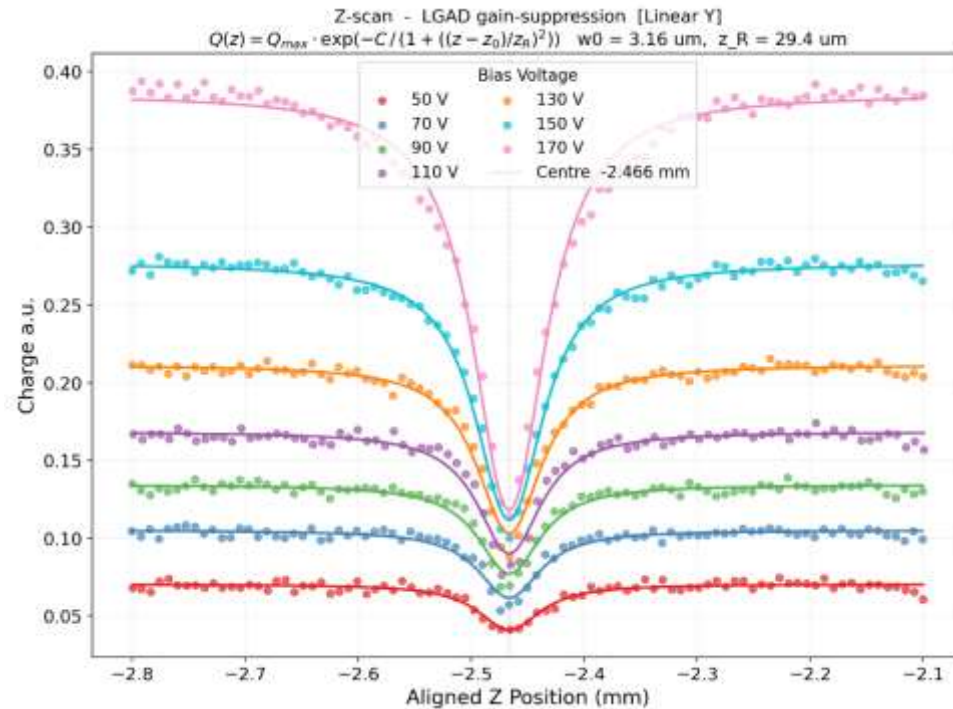
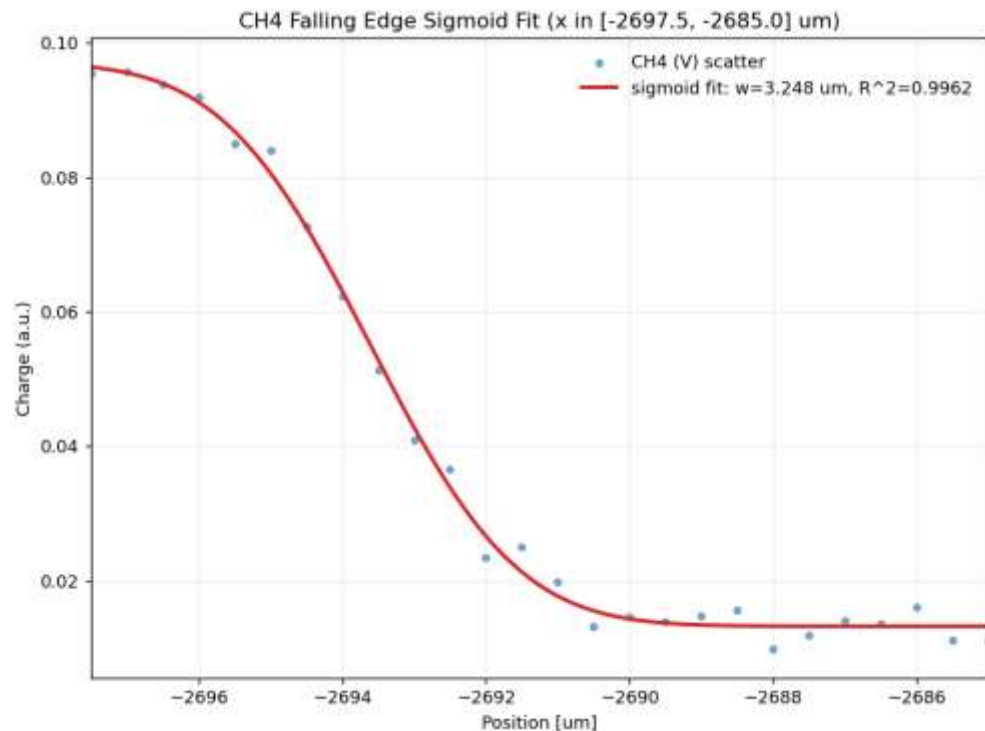


在优化光斑大小方案上，实现了步进电机（ZC300,piezo）、示波器自动化移动、采集程序，并且在网页端可以交互操作

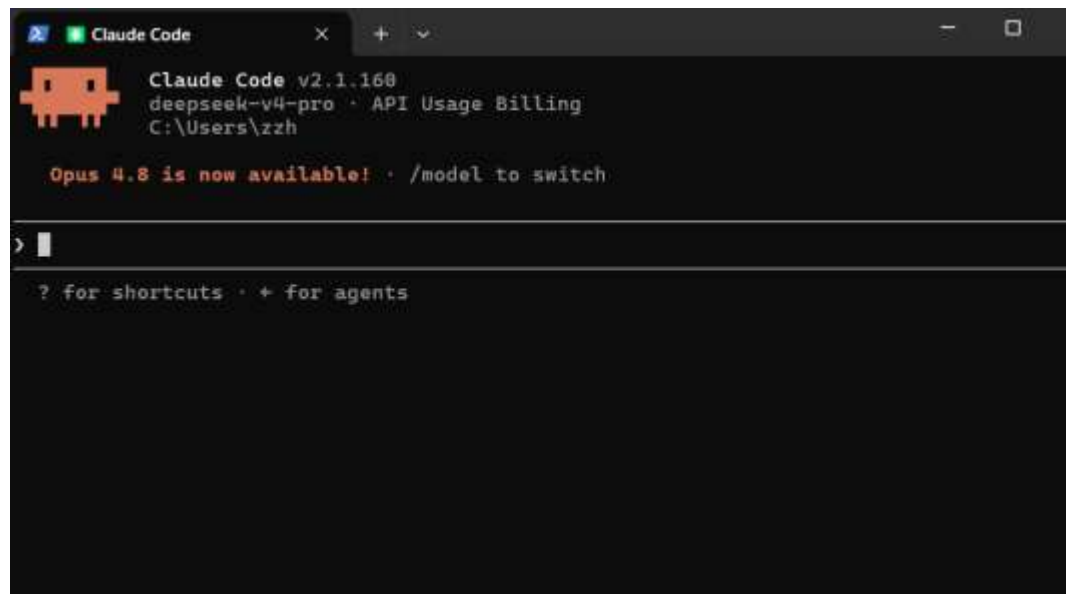
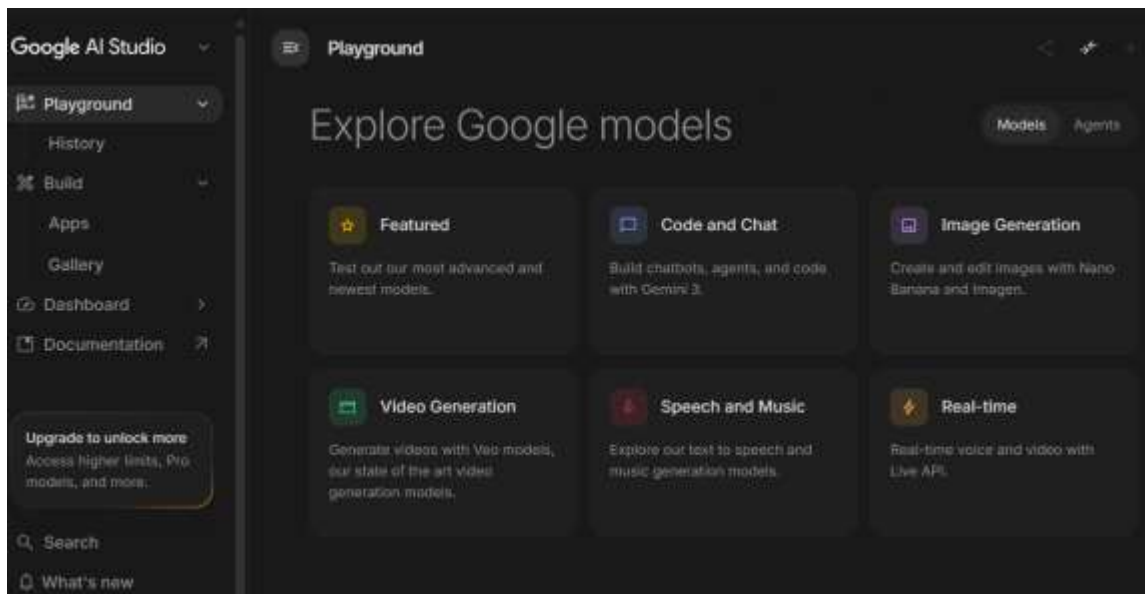


位置分辨率——光斑大小优化

- 理论计算：实验平台使用Mitutoyo 20X扩束镜（焦距 $f=10\text{mm}$ ，数字孔径 $\text{NA}=0.42$ ）@1064nm激光 [20X 放大倍率, Mitutoyo远场校正长工作距离物镜 | 爱特蒙特光学](#)
- 物镜入瞳直径 $D=2*\text{NA}*f=8.4\text{mm}$,高斯光束腰部直径 $\approx \frac{4\lambda f}{\pi D} = \frac{4*1.064\mu\text{m}*10\text{mm}}{\pi*8.4\text{mm}} = 1.612\mu\text{m}$,考虑艾里光斑直径 $d = 2 * 1.22 * \frac{\lambda f}{D} = 3.09\mu\text{m}$
- 使用刀刃法扫描，光斑直径 $3.248\mu\text{m}$ ；利用增益抑制效应全局拟合，光斑直径 $3.16\mu\text{m}$



- Google ai studio (Gemini) : 刚需翻墙vpn (选择海外代理节点) +国外手机号注册的谷歌邮箱, 有免费额度, 网页版适合聊天和编写简单代码项目
- VScode copilot: Vscode安装copilot插件后, github上申请学生特惠, 成功后每个月有较大的免费额度, 可以辅助编程写代码 (缺点是最近被砍了不少模型) [GitHub Copilot教育学生认证教程|白嫖GitHub高级版权益指南 哔哩哔哩 bilibili](#)
- Claude code + deepseek或者其他付费api: 可以安装claude code+ccswitch, 然后在命令行/桌面版让ai agent帮忙辅助编程、管理文件 [5分钟安装ClaudeCode并接入DeepSeek 哔哩哔哩 bilibili](#)



- 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？
- 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，应该怎么样消除能量沉积不均匀的因素。
 - (1) 了解什么是朗道效应
 - (2) 怎么消除信号幅度不一致带来的误差
- 3.安装claude code，建议使用deepseek api，可以充值五块钱，写一个小游戏程序玩一下