

背靠背式 micromegas 探测器设计、制作与测试

总结汇报

唐颂蕤 朱宗恒

July 20, 2026

目录

- ① 设计背景
- ② 探测器设计
- ③ 探测器制作
- ④ 基本性能测试

LHCb 实验与缪子探测器

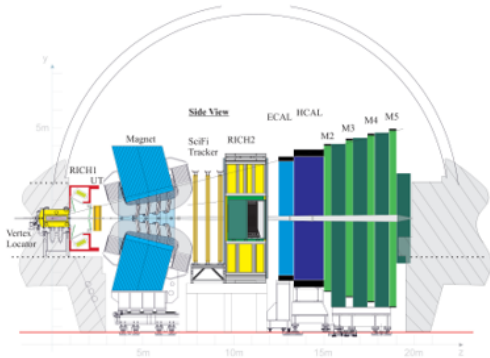


Figure 1: LHCb(Large Hadron Collider beauty) 结构示意图

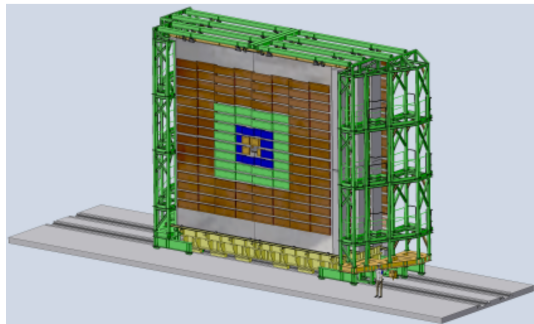


Figure 2: 缪子探测器三维视图

Figure 1 is a schematic diagram of the beam pipe layout. It shows a grid of rectangular regions labeled R1, R2, R3, and R4. A vertical strip is shown in the R4 region, and a horizontal strip is shown in the R3 region. A logical pad is indicated in the R3 region. A beam pipe is shown at the bottom left, with a circular cross-section and a rectangular extension.

◀ ◻ ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡

LHCb timeline

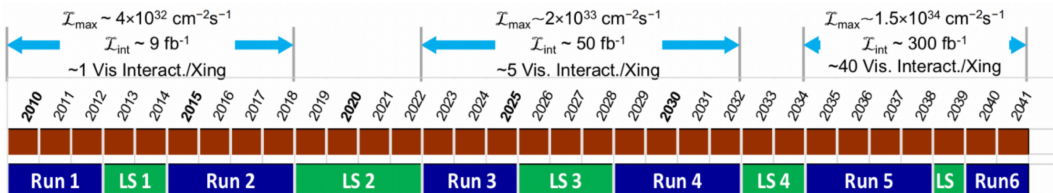


Figure 5: LHCb timeline

缪子系统：功能与运行表现

系统结构与作用

- 传统系统由 M1–M5 五个站组成，每个站包含多丝正比室（MWPC），站间交替布置铁吸收体。
- 缪子系统主要探测高横动量缪子，为触发、缪子鉴别（PID）和径迹重建提供信息。
- 大量 LHCb 物理道具有清晰的缪子末态，因此缪子系统的效率与误判率直接影响物理灵敏度。

Run 1–2（2011–2018）表现

- 瞬时亮度最高约 $4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。
- 全探测器探测效率高于 99%。
- 缪子 PID 效率约 97%。
- 九年运行后未观察到显著老化。

来源：ICHEP 2022 《The LHCb Muon Detector Upgrades》，第 2–3 页。

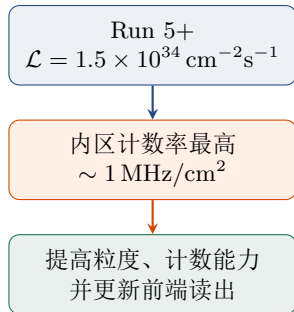
LHCb Muon Detector Upgrade II: 为什么升级

物理与运行条件

- Upgrade II 面向 HL-LHC 的 Run 5 及以后运行，目标瞬时亮度为 $1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，全寿命积分亮度约 300 fb^{-1} 。
- 现有缪子系统由 M2-M5 四个站组成：共 1104 个四气隙 MWPC，站间由三层 80 cm 铁吸收体隔开。

瓶颈

在目标亮度下，现有 M2R1 的最大粒子通量外推接近 1 MHz/cm^2 ；若维持原有读出粒度，将出现极高堆积率及死时间引起的探测低效率。



来源：LHCb Upgrade II Framework TDR (LHCB-TDR-023)，第 1、4.5 节。

不同区域计数率

区域	最大输入计数率 (kHz/cm ²)			
	M2	M3	M4	M5
R1	749	431	158	134
R2	74	54	23	15
R3	10	6	4	3
R4	8	2	2	2

表中为 $1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 下的外推最大计数率。

计数率指标

- R1+R2 面积约 25 m²：需承受数十 kHz/cm² 至接近 1 MHz/cm² 的通量；新探测器计数能力应达数 MHz/cm²。
- 内区需承受累计电荷最高 10 C/cm²，并将单通道计数率控制在 1 MHz 以下。
- R3+R4 面积约 365 m²，计数率不高于约 10 kHz/cm²，可优先复用成熟探测器。

来源：LHCB-TDR-023，第 4.5.1 节、表 4.9–4.10。

基准方案

R1、R2：高数率探测器

为适应 LHCb 第二次升级带来的亮度提升，我们需要将 μ 子探测系统中的探测器升级为更高计数率的探测器。同时，为了能在 25ns 读出时间窗内提高探测效率，我们对探测器的时间分辨能力亦有新的要求。为此，一个可能的方案为背靠背式 Micromegas 探测器。

R3、R4：MWPC 与读出升级

- R3+R4 占仪器化面积 94%，基准方案复用约 95% 现有 MWPC；仅新建 80 个腔体以补充覆盖和提高局部粒度。
- 改为全 pad 读出，更新使用近 30 年的前端电子学；四个气隙独立读出可使每通道输入率降低 30%–40%。
- 前端要求至少两个气隙同时击中，可再将非关联本底压低约 3 倍；模拟中仅低于 3 GeV 的低动量缪子出现数百分点低效。

核心思路：辐照与计数率分区匹配，保持缪子识别效率。

来源：LHCB-TDR-023，第 4.5.2–4.5.4、4.6 节。

100

考虑长度为 L 的路径, 其中均匀分布着 N 个相互独立的电离点。粒子在长度为 x 的区间内发生一次事件的概率为

$$p = \frac{x}{L}.$$

定义单位长度内的平均电离点数量

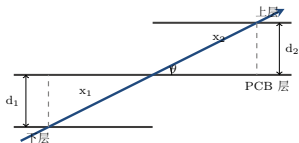
$$\rho = \frac{N}{L}, \quad \lambda = Np = \rho x.$$

在 N 个独立事件中，恰好有 k 个事件发生在区间 x 内的概率为

$$P_N(k) = \binom{N}{k} p^k (1-p)^{N-k}.$$

代入 $p = x/L$, 得到

$$P_N(k) = \binom{N}{k} \left(\frac{x}{L}\right)^k \left(1 - \frac{x}{L}\right)^{N-k}.$$



令

$$N \rightarrow \infty, \quad L \rightarrow \infty, \quad \rho = \frac{N}{L},$$

并保持 ρ_x 一定。

$$\binom{N}{k} \left(\frac{x}{L}\right)^k \rightarrow \frac{(\rho x)^k}{k!},$$

$$\left(1 - \frac{x}{L}\right)^{N-k} \rightarrow e^{-\rho x}.$$

BM 时间分辨

由此有泊松分布

$$P(k) = \frac{(\rho x)^k}{k!} e^{-\rho x}$$

特别地，当区间内没有事件 ($k = 0$ i.e. x 区间中无电离) 时：

$$P(k=0) = e^{-\rho x}$$

为指数分布。指数分布的无记忆性：

$$P\{X > s+t \mid X > s\} = \frac{P\{X > s+t\}}{P\{X > s\}} = P\{X > t\}.$$

时间分辨率 δt_i 取决于最近电离点与 mesh 的距离 d_i ：

$$t_i = \frac{x_i \sin \theta}{v_d}, \quad x_i \sim \text{Exp}(\rho),$$

因此

$$t_i \sim \text{Exp}\left(\frac{\rho \sin \theta}{v_d}\right).$$

令

$$\lambda = \frac{\rho \sin \theta}{v_d}, \quad T = \min\{t_1, t_2, \dots, t_n\}.$$

我们有 $P(t_i > \theta) = e^{-\lambda \theta}$

CDF:

$$\begin{aligned} F(\theta) &= P\{\min(t_i) < \theta\} \\ &= 1 - P\{\min(t_i) > \theta\} \\ &= 1 - e^{-n\lambda\theta} \end{aligned}$$

PDF:

$$f(\theta) = n\lambda e^{-n\lambda\theta}$$

因此时间方差为

$$\begin{aligned} \text{Var}(T) &= E(T^2) - [E(T)]^2 \\ &= \frac{2}{(n\lambda)^2} - \frac{1}{(n\lambda)^2} \\ &= \frac{1}{(n\lambda)^2}. \end{aligned}$$

时间分辨

时间分辨为

$$\sigma_T = \sqrt{\text{Var}(T)} = \frac{1}{n\lambda}.$$

如果

$$\lambda = \frac{\rho \sin \theta}{v_d},$$

则

$$\sigma_T = \frac{v_d}{n\rho \sin \theta}.$$

级联层数对时间分辨的影响

$$\frac{\sigma_{T,n}}{\sigma_{T,1}} = \frac{1}{n}, \quad \sqrt{\frac{\text{Var}(T_2)}{\text{Var}(T_1)}} = \frac{1}{2}.$$

电路板设计

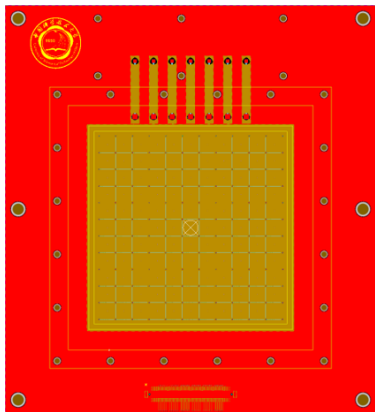


Figure 6: 电路板正

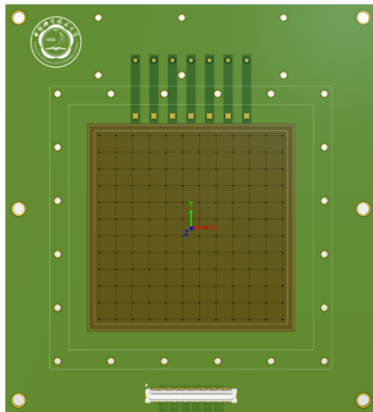


Figure 7: 电路板反

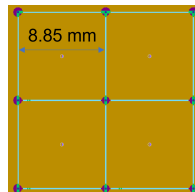


Figure 8: pad

1. 121 个读出 pad, pitch 9mm
2. Pad 大小 $8.85 \times 8.85\text{mm}$
3. 快速接地设计

电路板层间结构

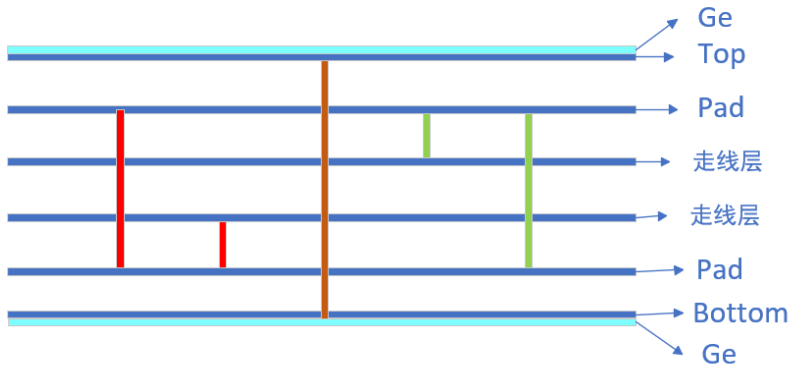


Figure 9: 层间结构

机械设计

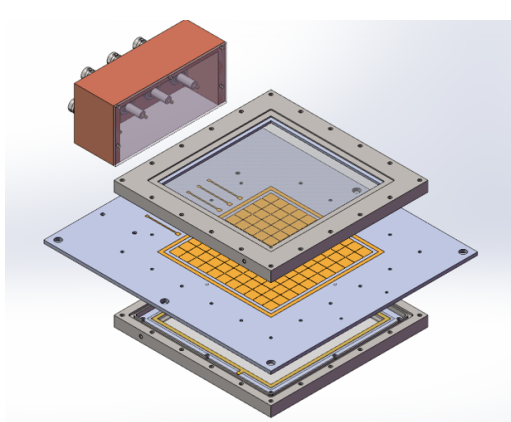


Figure 10: 整体外观

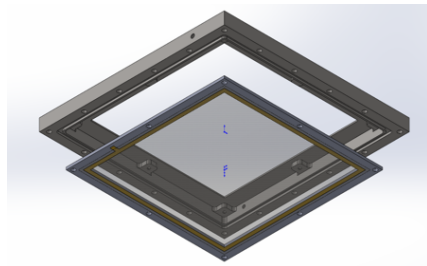
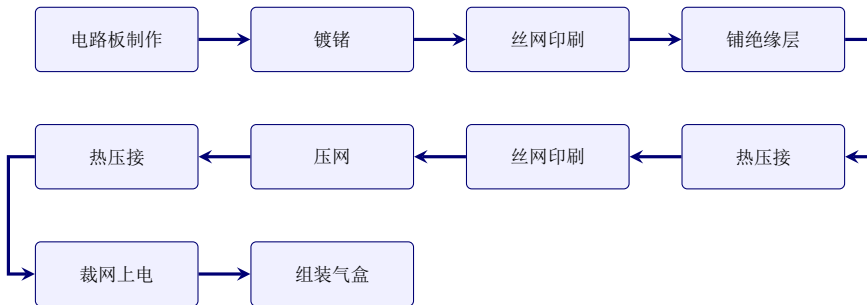


Figure 11: 气盒

1. 漂移电极固定在金属气盒上
2. 双排 7 个高压座
3. 气盒高度 10mm，未来可改变设计，减薄气盒高度

探测器制作流程



丝网印刷前置步骤

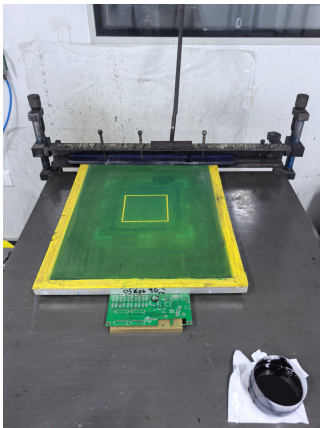


Figure 12: 丝网印刷机器



Figure 13: 对齐过程

Figure 14: 固液胶配比为 8 : 1



Figure 15: 将胶渗入网孔

Figure 16: 印刷



Figure 17: 覆盖绝缘层

热压绝缘层



Figure 18: 0.8 ~ 0.9MPa, 60° 压 4h

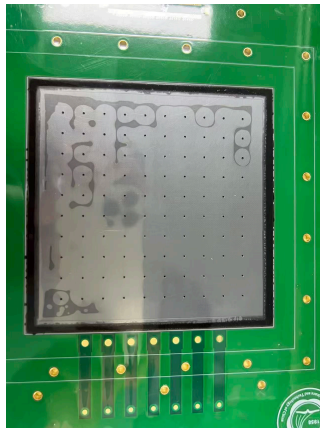


Figure 19: 热压绝缘层结果

二次丝网印刷与压网

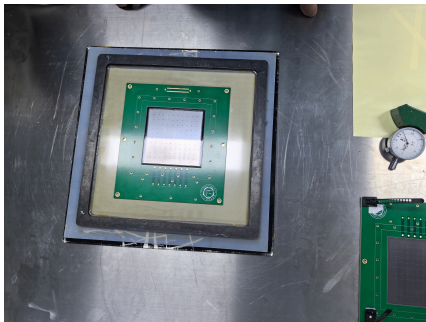


Figure 20: 背靠背板的压网方式

0.3 ~ 0.4MPa, 55° 压 4h

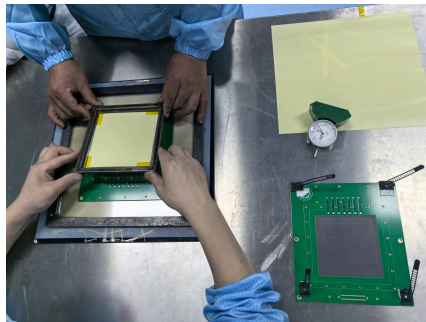


Figure 21: 覆盖上层网

裁网上电

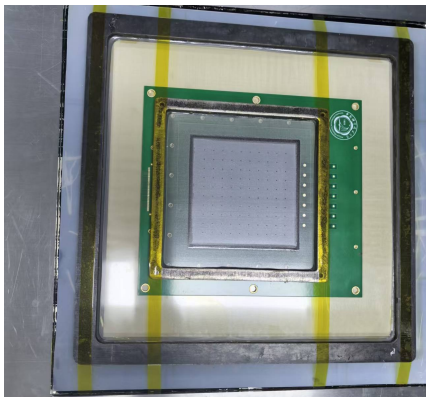


Figure 22: 热压接后

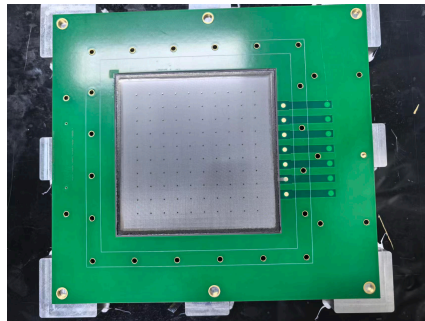


Figure 23: 裁网后

mesh 极加电压 900V 后，观察漏电流稳定在约 19nA。

已解决：溢胶

1. 印刷对齐方式
2. 压网方式可能引起位移

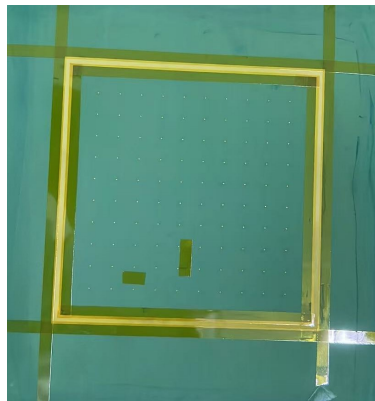


Figure 24: 边框溢胶的解决办法

多道法测量探测器增益

definition (增益)

一般情况下探测器的有效增益 (Gain) 计算公式如下

$$\text{Gain} = \frac{Q_{\text{out}}}{n_t e} \quad (4.1)$$

其中 Q_{out} 为探测器信号经过放大后探测到的电荷量, n_t 为原初电离对数, e 为电子电荷。

前放与主放的输出电压信号的线性可加性 → 多道测定全能峰峰位与前放前端的信号 (输入电荷) 为一线性对应。

$$U_{\text{out}} = a \times U_{\text{ch}} + b \quad (4.2)$$

其中 a, b 为线性关系的系数, U_{ch} 为多道读出信号。由此我们由多道测量全能峰峰位得到前放前端的倍增信号大小。

前放与主放刻度

为了得到系数 a, b ，我们用幅值、频率一定的方波信号来代替探测器信号，并记录计算机中显示能谱峰位横坐标 (道址数)，换算得出多道测量的信号大小与前放接受的倍增信号大小，对其拟合得到刻度关系。

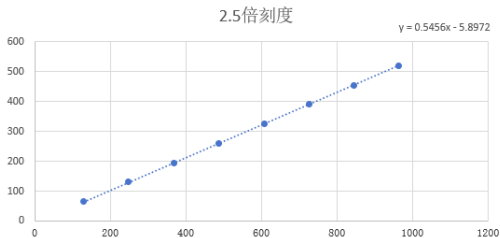


Figure 25: 2.5 倍刻度

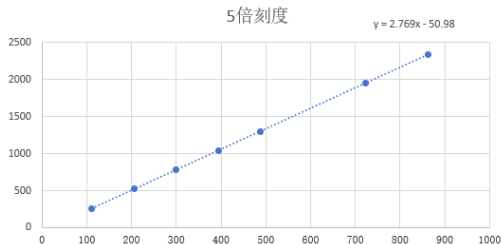


Figure 26: 5 倍刻度

刻度细节

由于信号源输出阻抗与前放的输入阻抗不同，所以在测试中需要注意信号源输出阻抗与前放的输入阻抗不匹配引起的输出失真。已知前放的输入阻抗为 $R_{in} = 93\Omega$ ，信号源输出阻抗为 $R_{out} = 50\Omega$ ，信号源输出显示电压 U ，简单计算有前放接受信号大小

$$U_{in} = 2U \times \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{out}} = 2U \times \frac{93\Omega}{93\Omega + 50\Omega} \quad (4.3)$$

增益随电场比 ratio 的变化

确定电子透过率/最佳电场比 ratio

definition (电场比 ratio)

在普通 Micromegas 中，电场比 ratio 定义为

$$\text{ratio} = \frac{\text{雪崩区场强} E_a}{\text{漂移区场强} E_d} \quad (4.4)$$

固定 Mesh 电压 $U_m = -800\text{V}$ ，扫描漂移极电压 U_d ，记录不同电压下的增益 $\text{Gain}(U_d)$ 。由于本探测器的漂移极为一张薄铝模，在高电场条件下难免产生形变，为此我们测量 A、B 面有效区中心 (center) 和边缘处 (edge) 处的 $\text{Gain}(\text{ratio})$ 。

极限增益测试 @ratio = 70

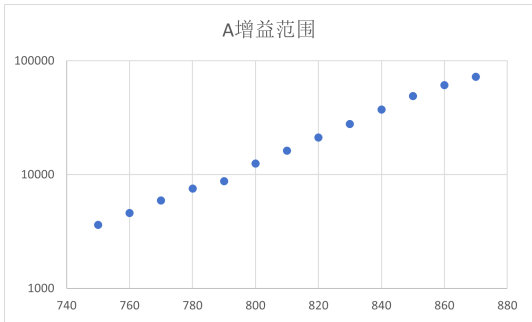


Figure 31: A 面增益范围

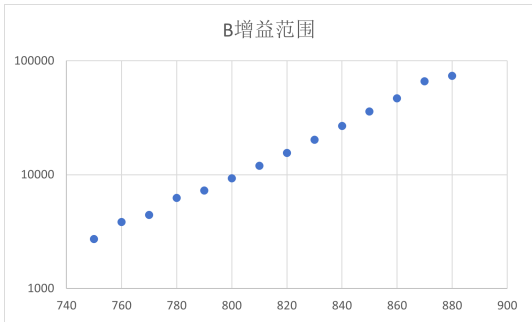


Figure 32: B 面增益范围

固定 $\text{ratio} = 70$, 我们测量 A 面和 B 面的增益随 U_d 变化。实验测得该探测器最大增益可达 $7.2 \times 10^4 @ U_{mA} = 870V, U_{mB} = 880V$ 。

非均匀性

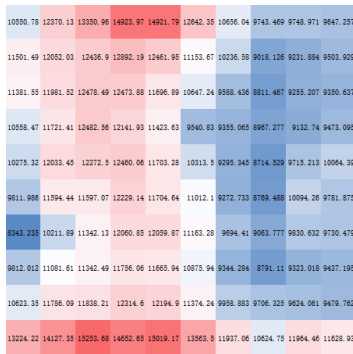


Figure 33: A 面非均匀性
@ratio = 70 $\Delta U_m = 800V$

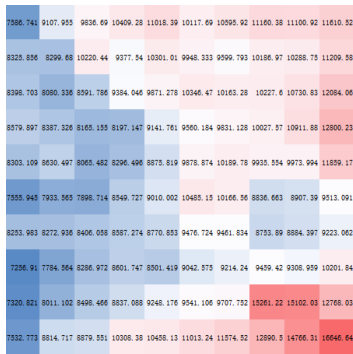


Figure 34: B 面非均匀性
@ratio = 70 $\Delta U_m = 800V$

增益非均匀性是指探测器 Gain 在不同位置上的差异，通常用相对增益非均匀性来表示，即 $\frac{\text{rms}}{\text{mean}}$ 。从左图可以统计得到，探测器 A 面非均匀性为 14.45%，B 面非均匀性为 17.54%。

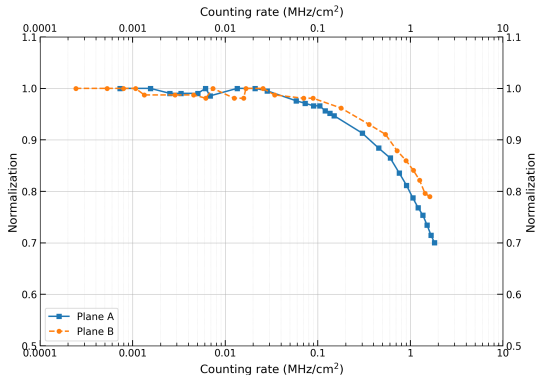
@ratio = 70, $U_m = -800V$ 

Figure 35: 辐照面积 $0.0225\pi\text{cm}^2$

辐照面积为 0.025cm^2 , A 面较 B 面而言更加稳定, 增益也更高, 因雪崩电子产生的分压效应也更加明显, 致使 A 面受计数率影响更大

That's all, thanks