

第二十二届全国核电子学与核探测技术学术年会
暨第十二届全国先进气体探测器研讨会



核物理与化学研究所
INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS AND CHEMISTRY

高本底抑制比多层平行板雪崩电离室研究

THE STUDY OF A PPAC WITH HIGH SUPPRESSION RATIO

汇报人：任智洲

中国工程物理研究院核物理与化学研究所

2024年7月16日 山东青岛

CONTENTS

01

背景与需求

02

整体设计方案

03

目前实验进展

04

总结与展望



PART 01

背景与需求

研制背景

为什么进行“裂变核数据”测量？

提供真实可信的实验数据是核数据科研人员最大的责任，也是最大的挑战[1]。

中子裂变核数据在基础与应用核物理领域有不可替代的作用，对解决我国现代化强国目标中能源与环境问题至关重要[2]。



大量科研人员实验
提供实验数据



核数据评价质量
不断提升



应用多个领域
惠及社会大众

[1] R. Capote, et al. Nuclear Data Sheets 131 1-106 (2016)

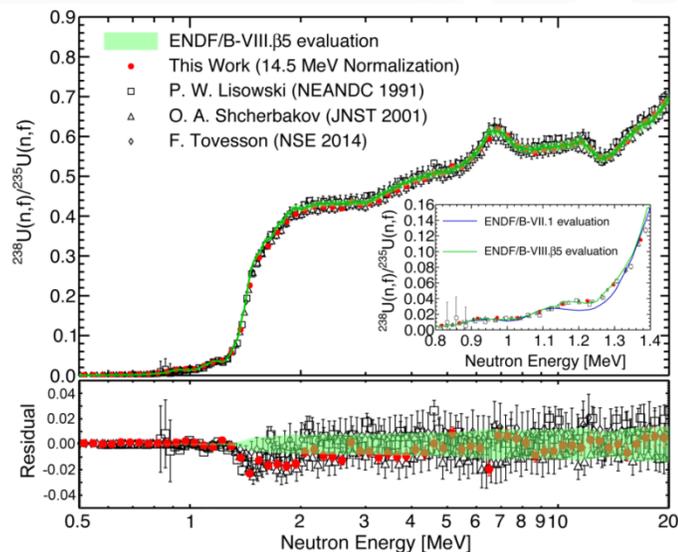
[2] 高树超. 专访叶奇蓁院士. 中国核电, 12(5): 486-490 (2019)

研制背景



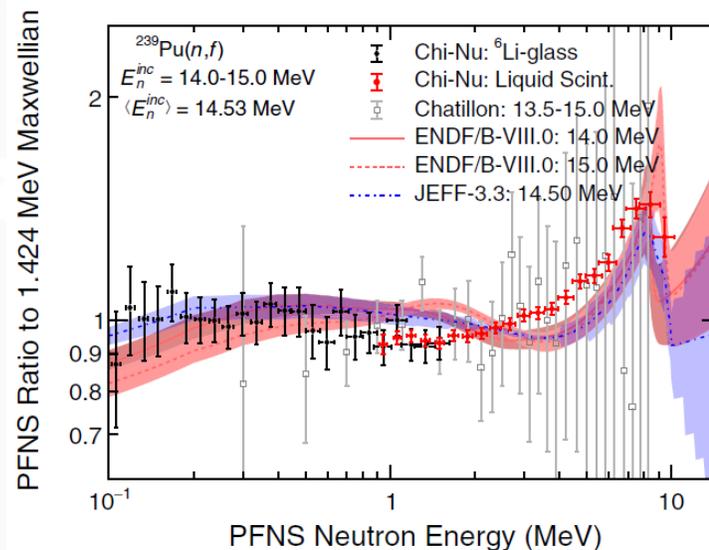
研制背景

◆中子诱发裂变截面



中子诱发裂变截面：即中子与目标核发生裂变核反应的几率。
精确地测量关键核素的裂变截面仍然是核物理领域关注的方向，也是裂变反应应用的基础数据。

◆裂变瞬发中子（伽马）能谱



裂变瞬发中子（伽马）能谱：裂变反应出射的中子（伽马）射线的能谱。
对于反应堆有效增值因子计算至关重要，但测量难度大，实验数据缺少。

[3] R. J. Casperson, et al. PRC 97, 034618 (2018)

[4] K. J. Kelly, et al. PRC 102, 034615, (2020)

研制背景

相关裂变核数据测量需要高本底抑制比的裂变信号探测器



某些核素自发衰变本底太强影响测量

例如 ^{240}Pu 、 ^{241}Am 等自发衰变活度轻易达Mbq量级以上的高放射性核素测量中，核素本身的阿尔法本底信号严重干扰裂变信号测量，需要进行抑制与甄别。

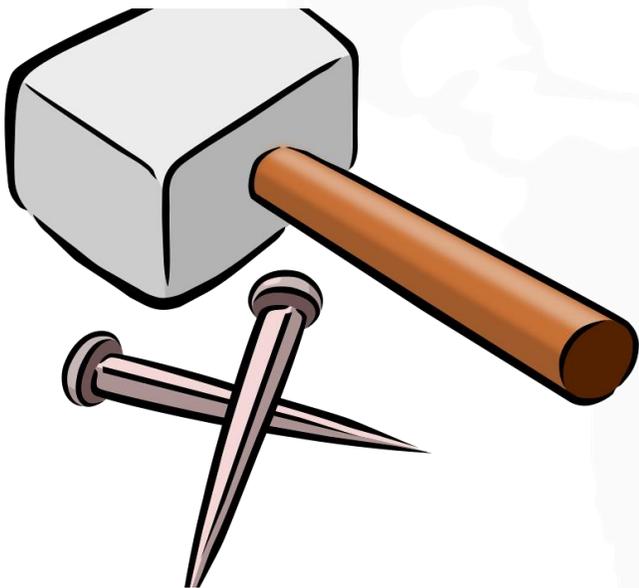
中子源功率增长导致本底反应增加

在Back-n长期进行的裂变核数据实验中，加速器束流功率由最开始10 kW增长到如今的160 kW，未来还会增加到500 kW。需要本底抑制能力更强，波形时间更短的裂变探测器。

具体需求

目前，我们主要关注重要铀系核素的裂变截面与瞬发能谱测量，为了适应高放射性活度核素与高通量中子源带来的极高计数本底，**需要发展一款高本底抑制比的裂变探测器**

该背景需求下，探测器主要有以下要求：



- 高本底抑制比——对 α 信号抑制比大于 10^6
- 高裂变碎片探测效率——对裂变碎片探测效率大于90%
- 快时间响应——减小信号堆积，波形上升时间小于20 ns
- 核素装载量大——能够装足够多的核素（镀片），大于50 mg
- 其他要求——性能稳定，体积较小，造价相对较低等



PART 02

整体设计方案

设计方案

以往经验——高本底水平下的裂变信号探测器

Russia 栅格电离室

通过在多层电离室之间增加栅格限制带电粒子径迹长度，减小阿尔法本底

CEA多层裂变室

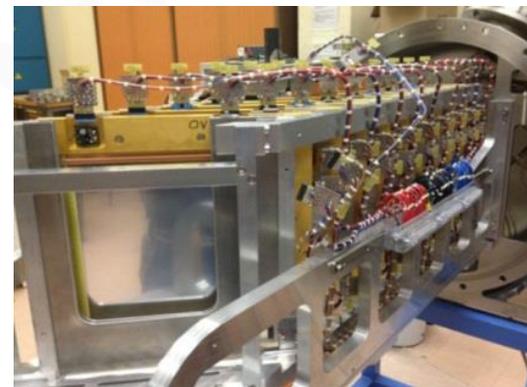
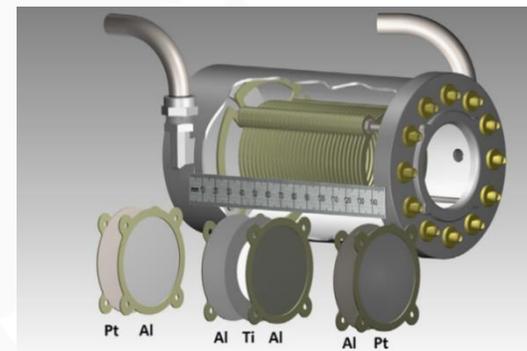
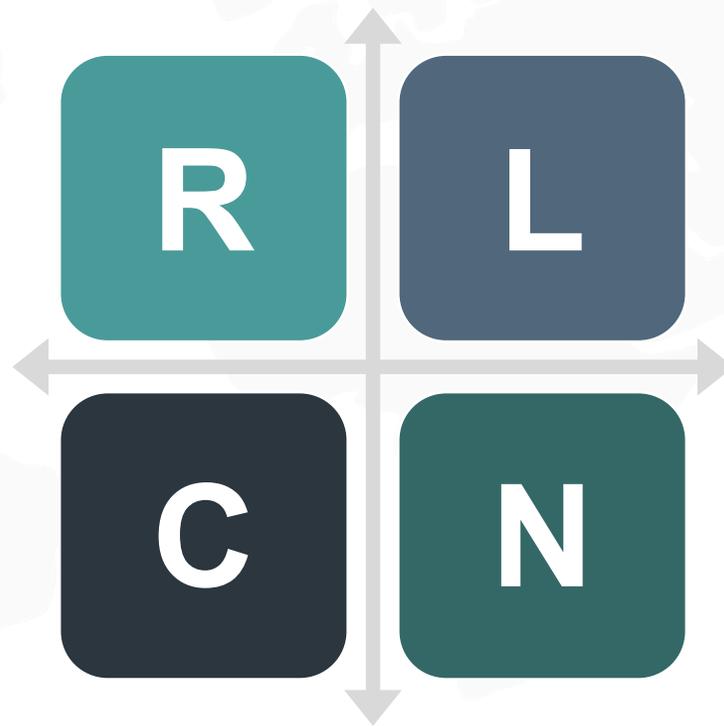
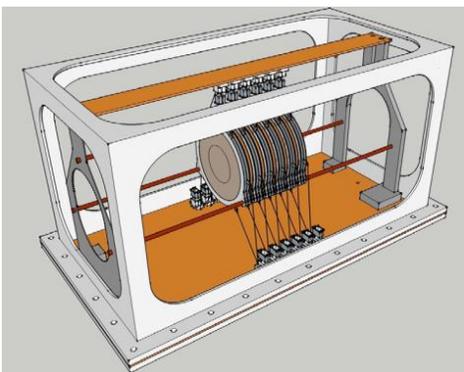
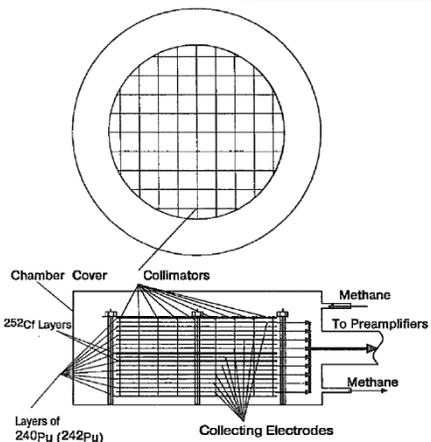
采用电离室对不同带电粒子电离能损差异降低本底，再扣除本底事件

LLNL PPAC

采用PPAC对不同带电粒子电离能损差异降低本底，再扣除本底事件

n-TOF PPAC

一般用于测量同时出射两个裂变碎片的角分布测量，带有位置分辨。



[5] Boris Gerasimenko, et al. JNST 39:sp2, 362-365 (2002)

[6] C. Y. Wu, et al. NIMA 794 76-79 (2015)

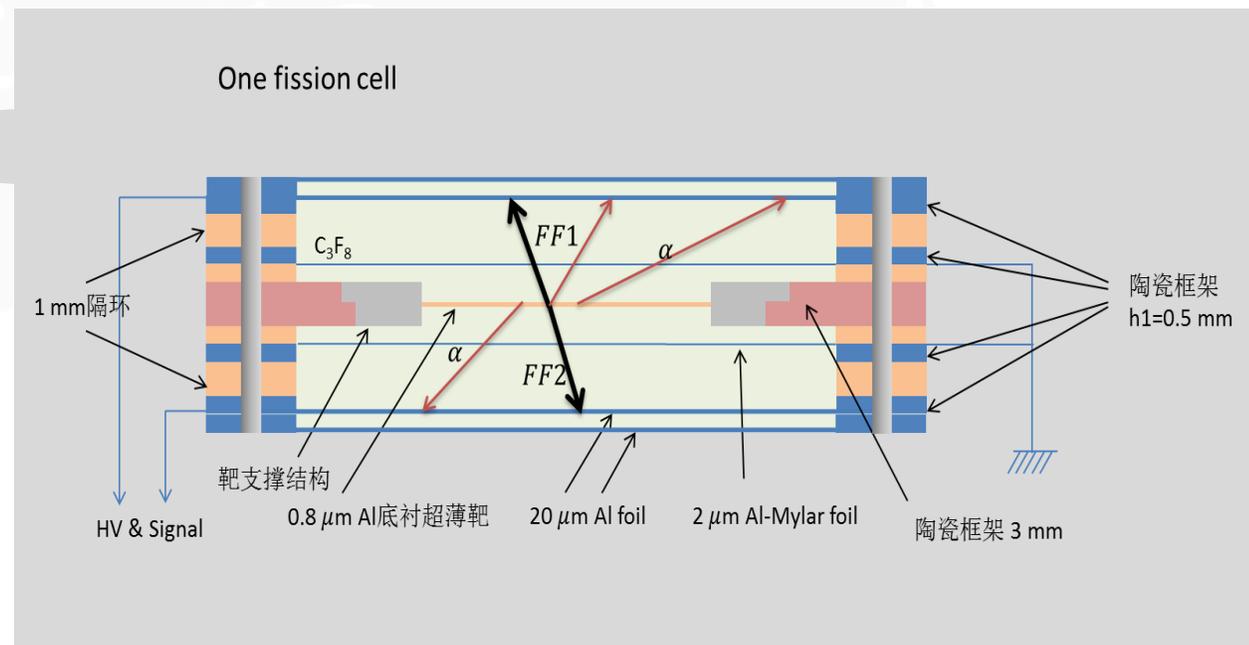
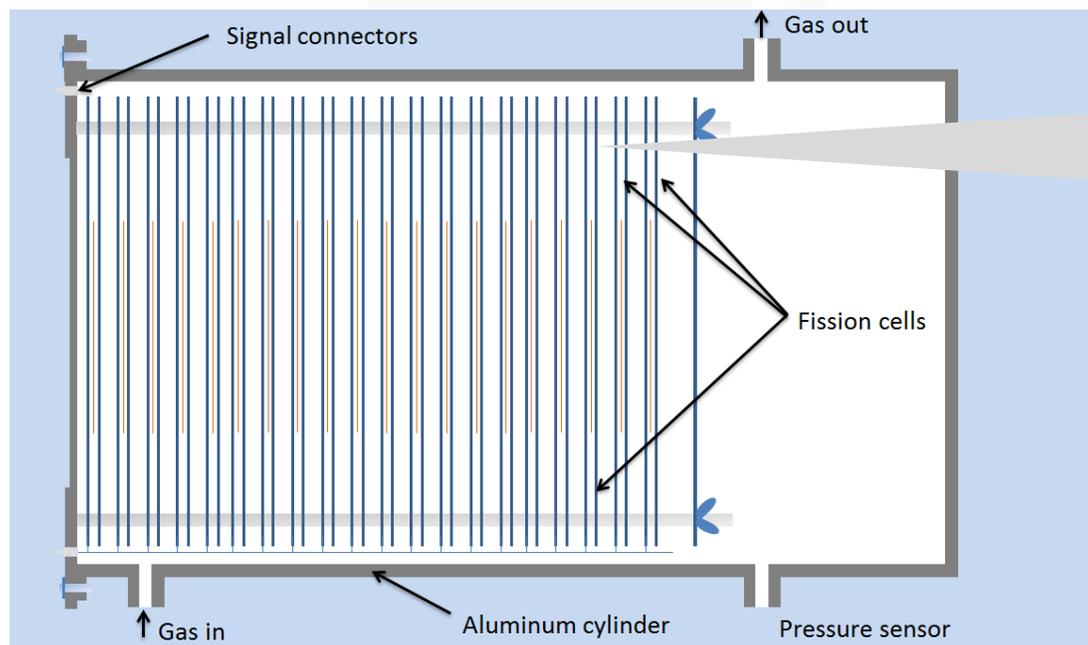
[7] B. Laurent, et al. NIMA 990 164966 (2021)

[8] N. Colonna, et al. EPJA 56:48 (2020)

设计方案

整体方案——多层平行板雪崩电离室PPAC

PPAC整体设计为铝制圆柱腔室，厚度为3 mm，尺寸 $\Phi 150 \times 280$ mm，可安装20个基础探测单元。每个基础探测单元包括两个单层的雪崩电离室与其之间的超薄靶结构，用以符合测量。



特殊设计的电极：粘到陶瓷PCB板上的2 μm 镀铝麦拉膜，极间距能做到2 mm。
特殊设计的超薄高纯裂变靶。

设计方案

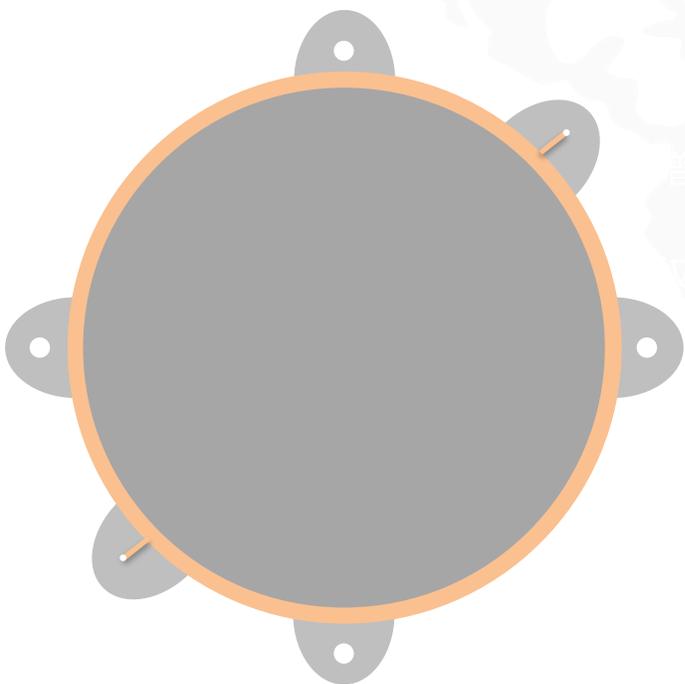
陶瓷电极框架：厚度0.5 mm，四周各有一小孔，两孔距离92 mm，直径84 mm内喷铜，右上与左下各有一引出线与一小孔。陶瓷硬度较高，相比于PCB不易变形。

电极：直接使用镀铝麦拉膜（2 μm ）贴膜作为电极，已经在测试中实现，拟采用。

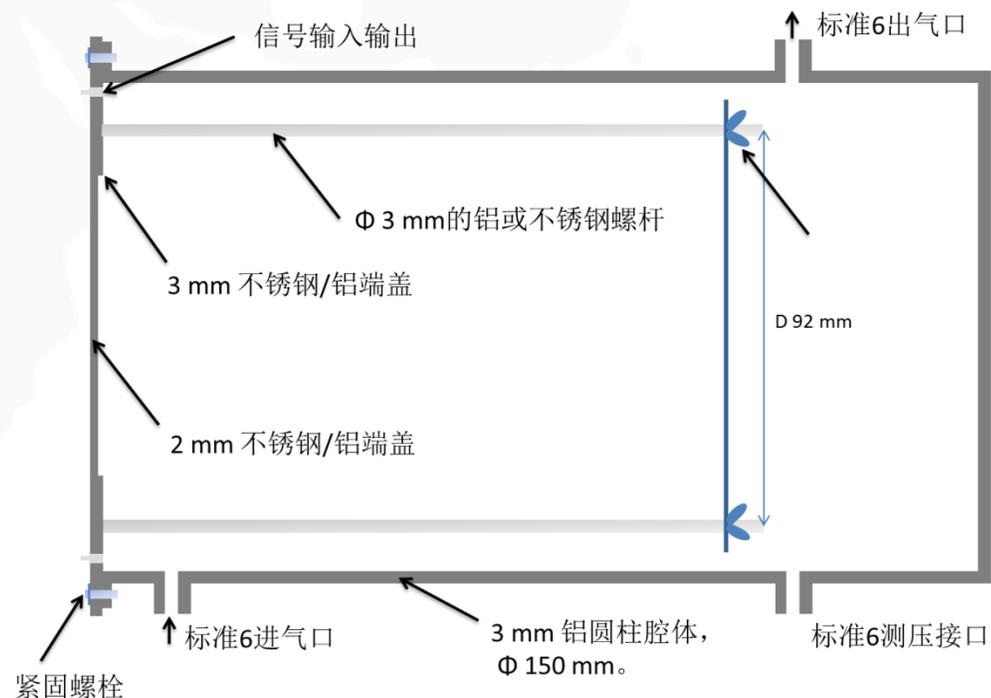
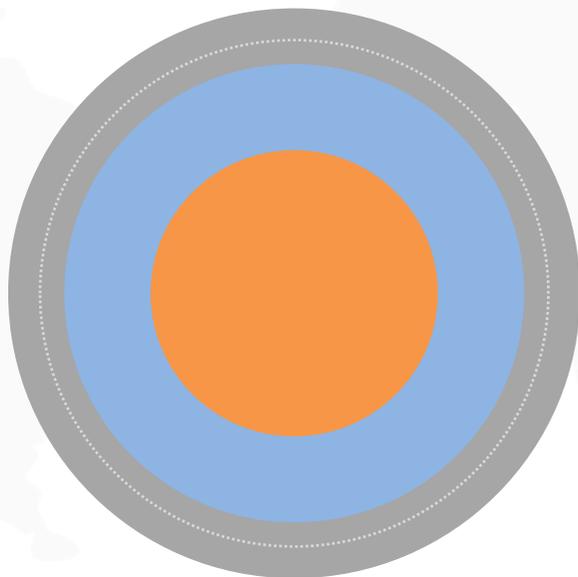
镀片：0.8 μm 铝底衬 Φ 50/40 mm；镀层 Φ 40/30 mm；每片核素大于2 mg，经理论计算碎片穿过底衬能损小于10%。

腔体结构：略微增大直径，使用薄入射窗（减小散射与束流损失），修改气路接口（接口更加通用）。

陶瓷电极框架



镀片





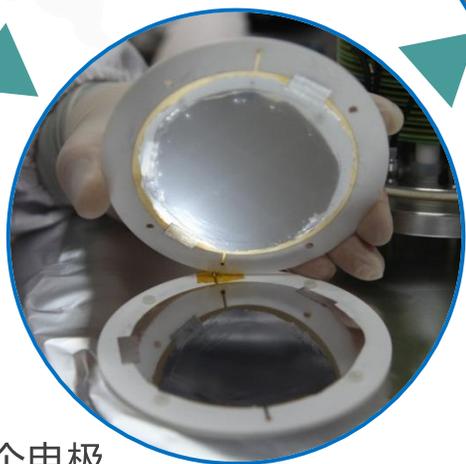
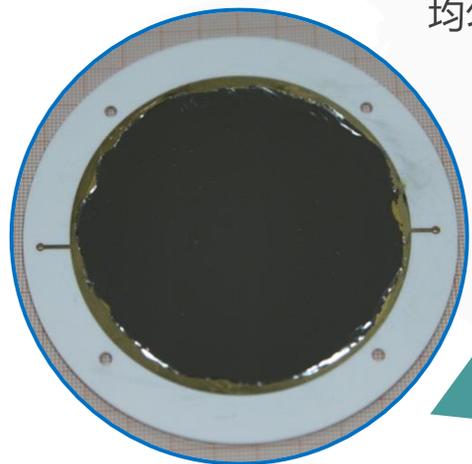
PART 03

实验进展

测试实验装置

单层电极制作

实验室中，在1 mm厚度的陶瓷电极框架上粘贴了2 μm厚的镀铝麦拉膜，形成了均匀平整的薄电极

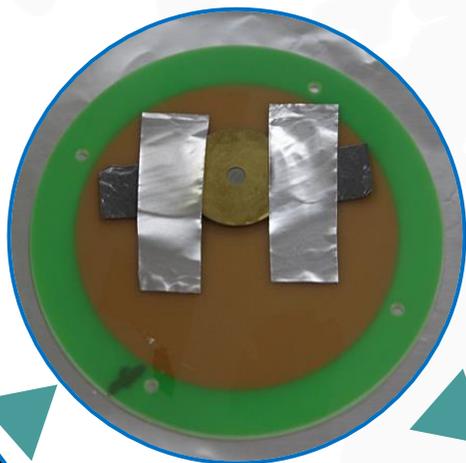


单层PPAC测量单元

单个PPAC测量单元包含两个电极，电极中间由2 mm隔环间隔，分别引线接出，焊点粘贴聚酰亚胺胶带绝缘

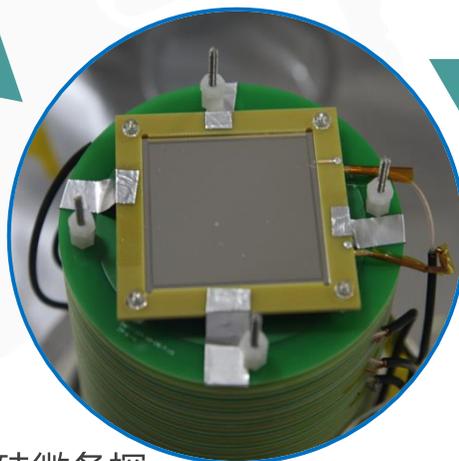
²⁵²Cf放射源

将²⁵²Cf源放置在测试单元下方，利用其自发裂变和衰变粒子进行测试



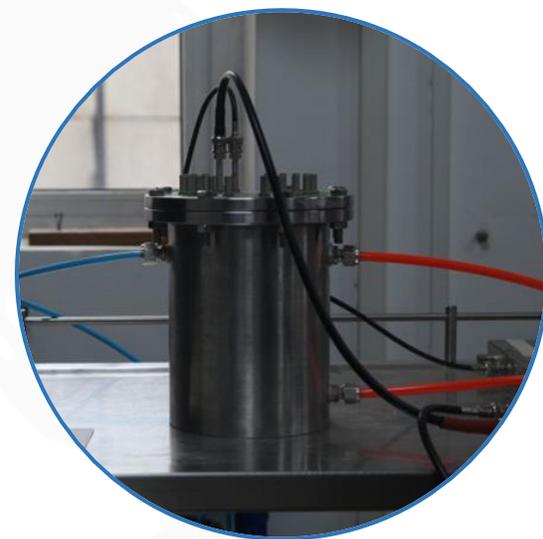
大面积半导体探测器

将边长为50 mm的方形硅微条探测器放在测试单元上方，用以判断出射粒子种类



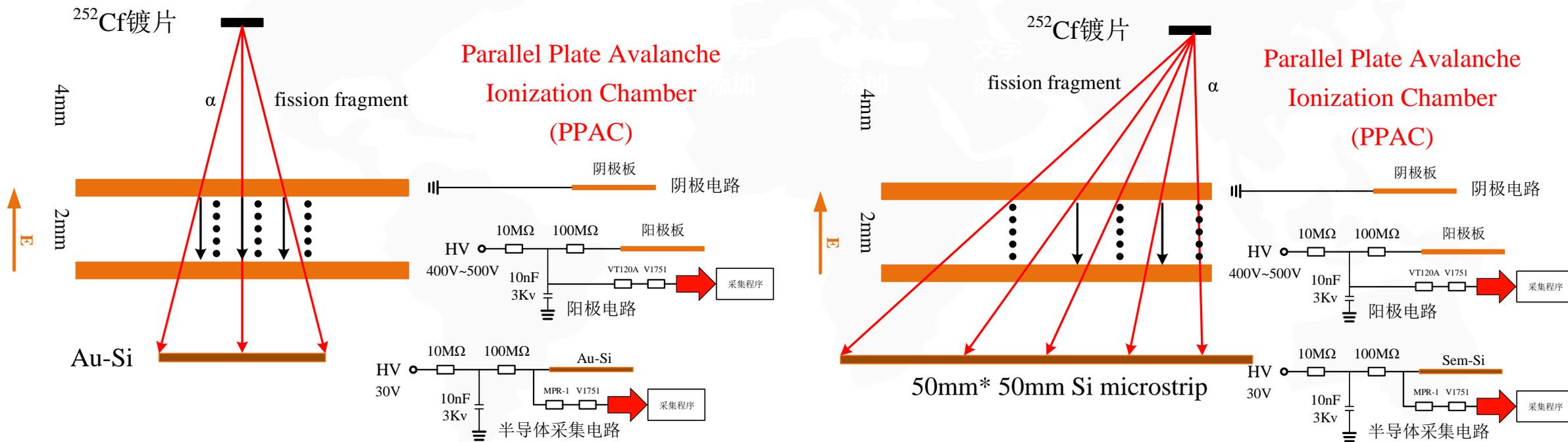
整体装配

使用旧腔室测试，高纯C₃F₈气体流气，前放信号使用CAEN DT5730数采采集波形信号。



实验装置示意图

搭建了2 mm电极间距的单层雪崩电离室测试系统，基于 ^{252}Cf 放射源与半导体探测器，进行了长时间、不同状态下的测试，获得了该探测器的性能指标。

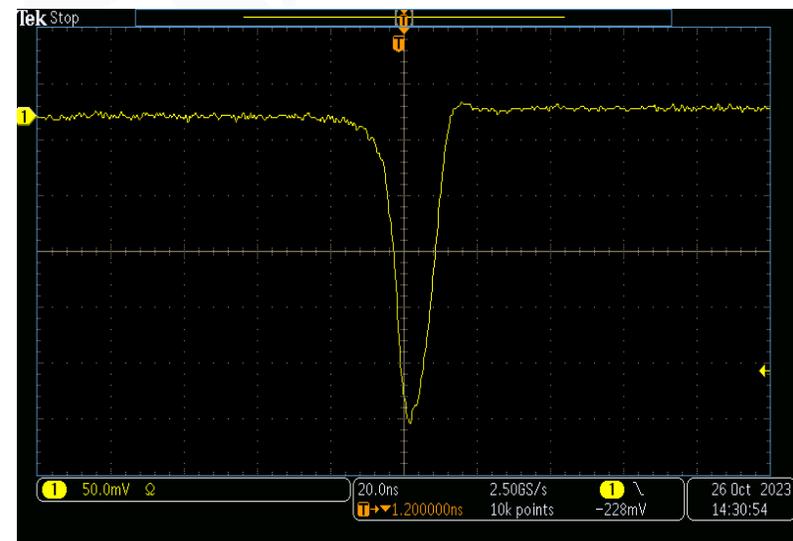
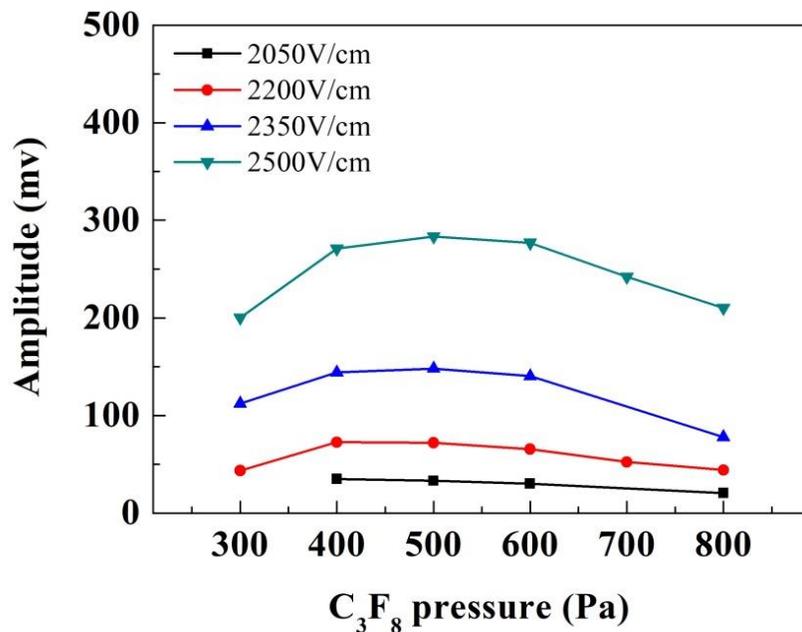
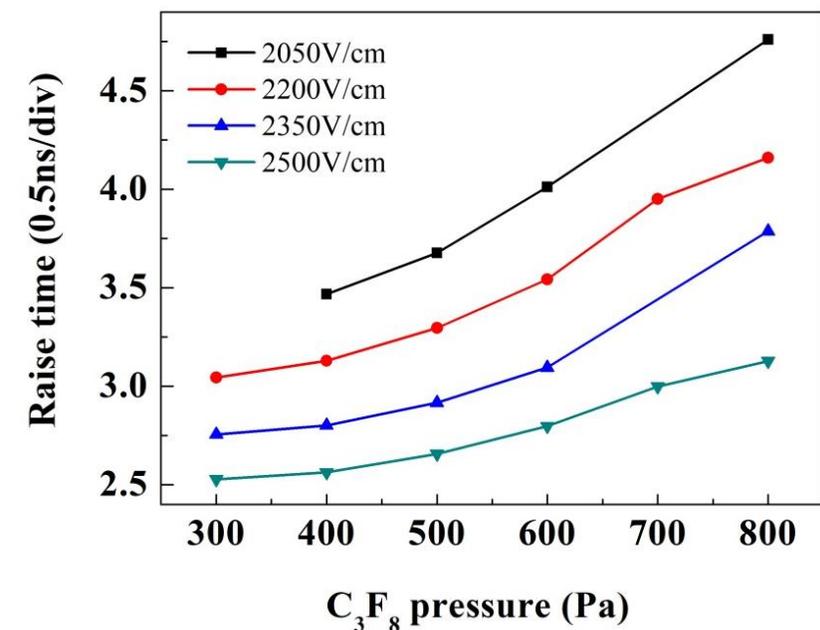


测试结果

不同电压、气压下裂变信号幅度与上升时间的变化规律 @ 2 mm单层雪崩电离室

每个点大于1天测量时间，摸清了最佳工作状态 (99.99% C_3F_8 +3SCCM)

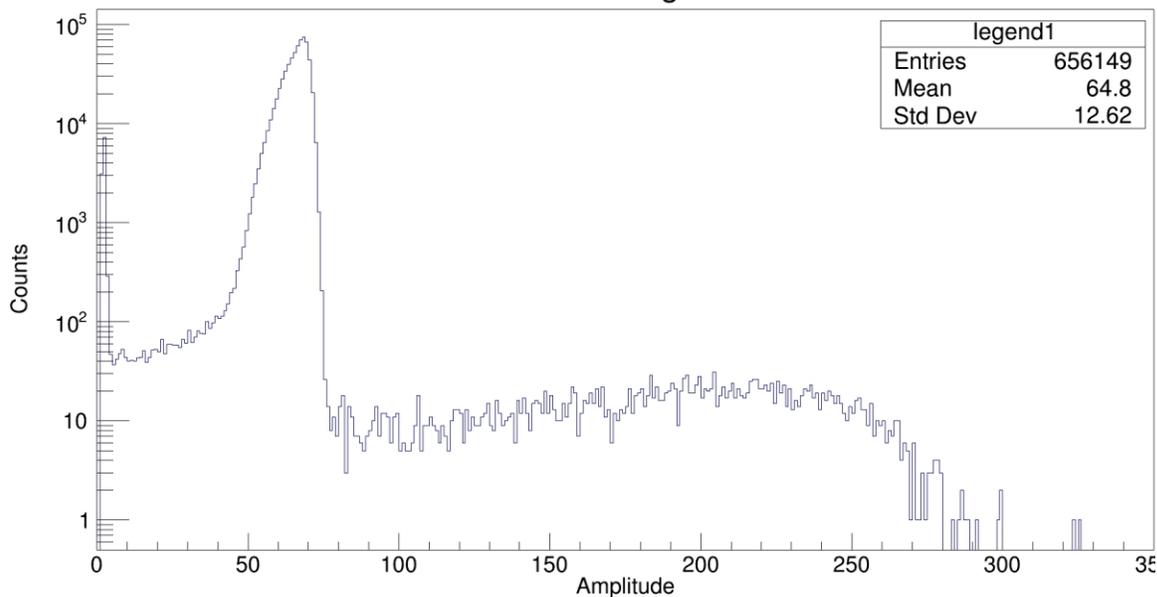
气压在400~500 Pa、电压接近500 V时性能最好，裂变波形上升时间小于2 ns，幅度均值大于200 mV。



测试结果

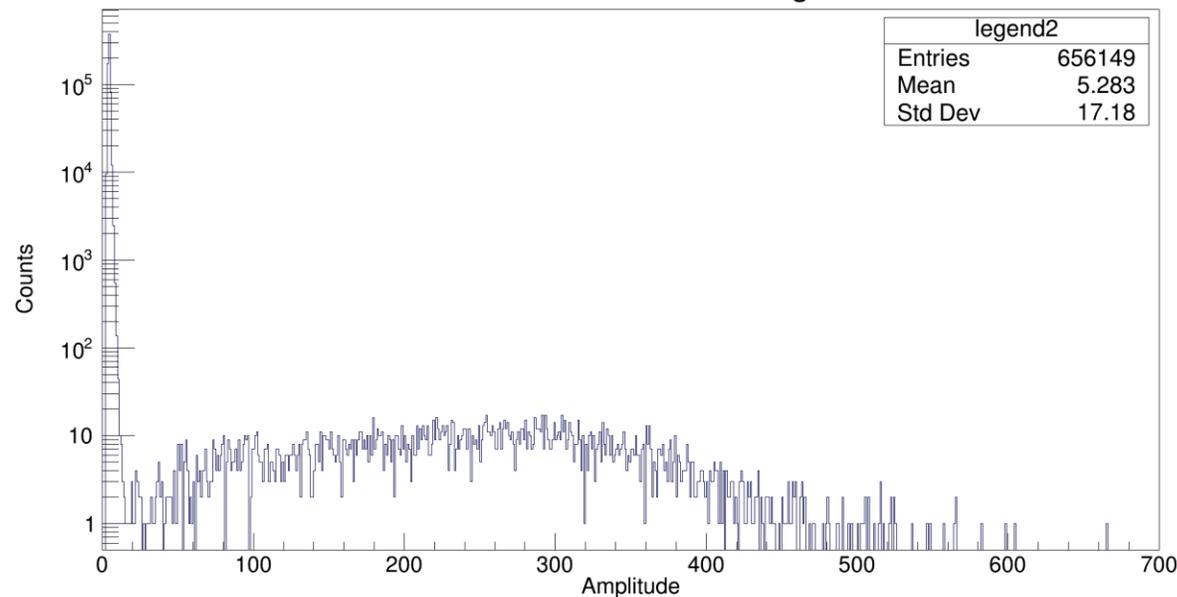
小角度测试： 半导体的 α /fission甄别阈在80 mV，测得半导体和PPAC的裂变碎片比约为：0.98。即98%的裂变碎片能够被单层雪崩电离室探测到。

Au-Si-20V-Si trig-50mv Th



金硅面垒探测器幅度谱 ($E_{Th}=50$ mV)

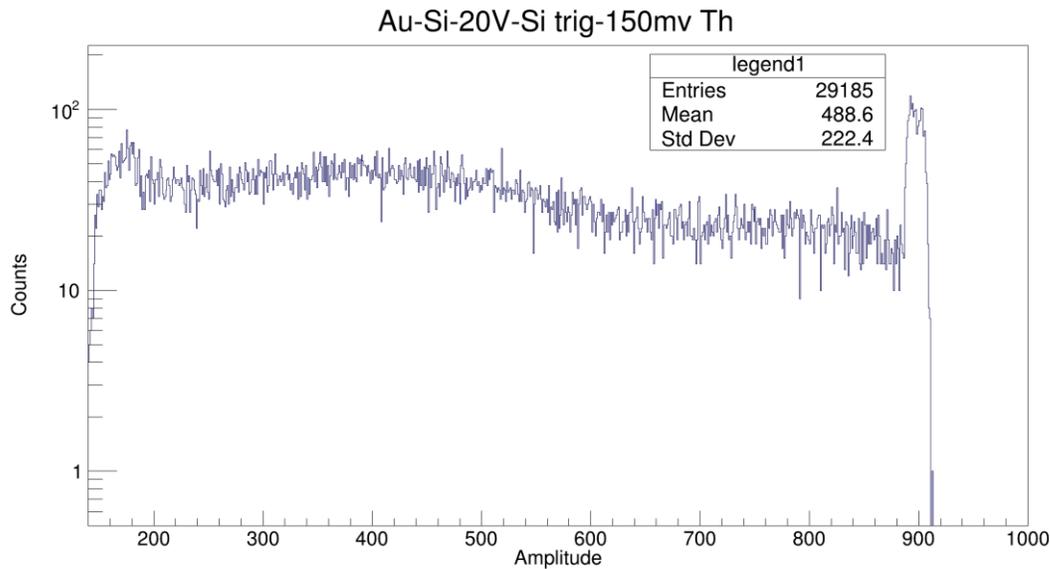
PPAC-400Pa-500V-3SCCM-Si trig-50mv Th



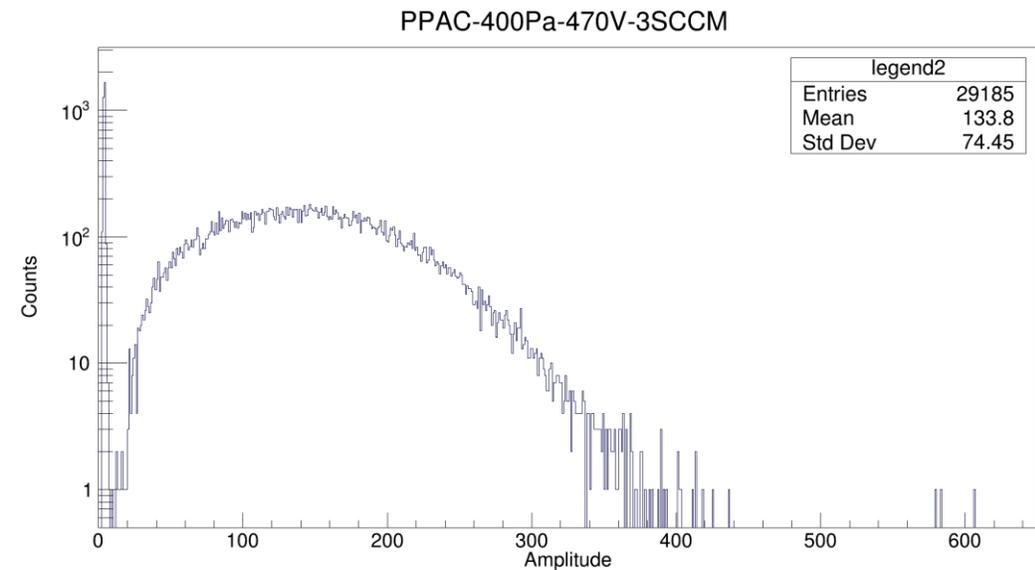
PPAC探测器 α 、fission计数 (50 mV $\leq E_{cutoff}\leq 80$ mV)

测试结果

小角度测试： 当 $E_{Th}=150$ mV，半导体和PPAC有用信号均为裂变信号,当 150 mV $\leq E_{cutoff}\leq 900$ mV时，半导体的fission计数26490，当 10 mV $\leq E_{cutoff}\leq 650$ mV时，PPAC的fission计数26054。此时半导体和PPAC的裂变碎片比约为：0.98



金硅面垒探测器幅度谱 ($E_{Th}=150$ mV)

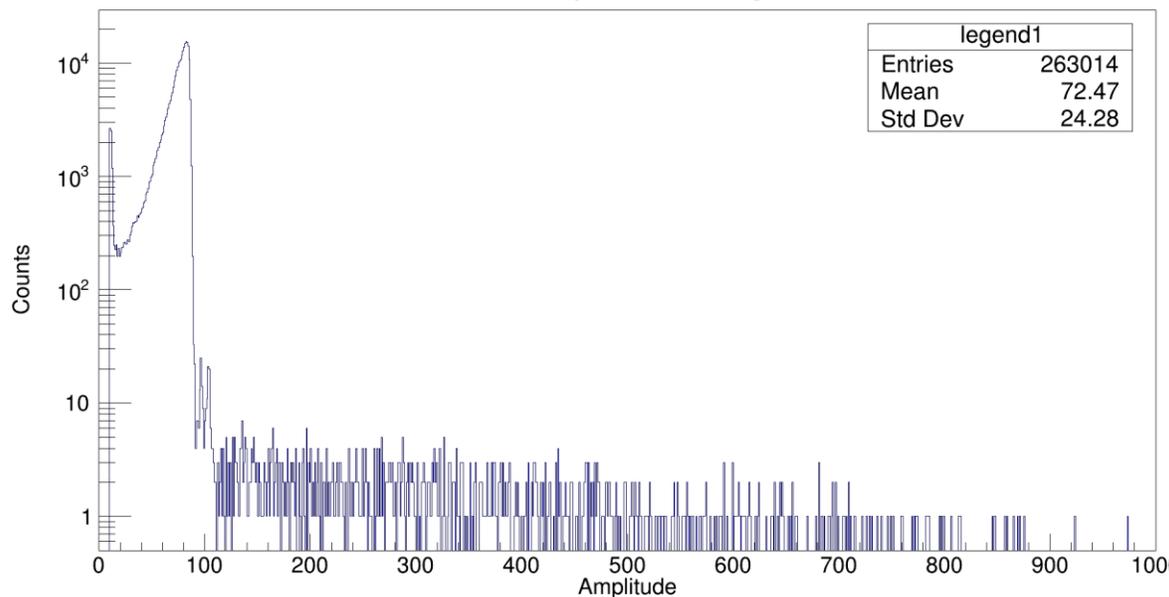


PPAC探测器fission计数

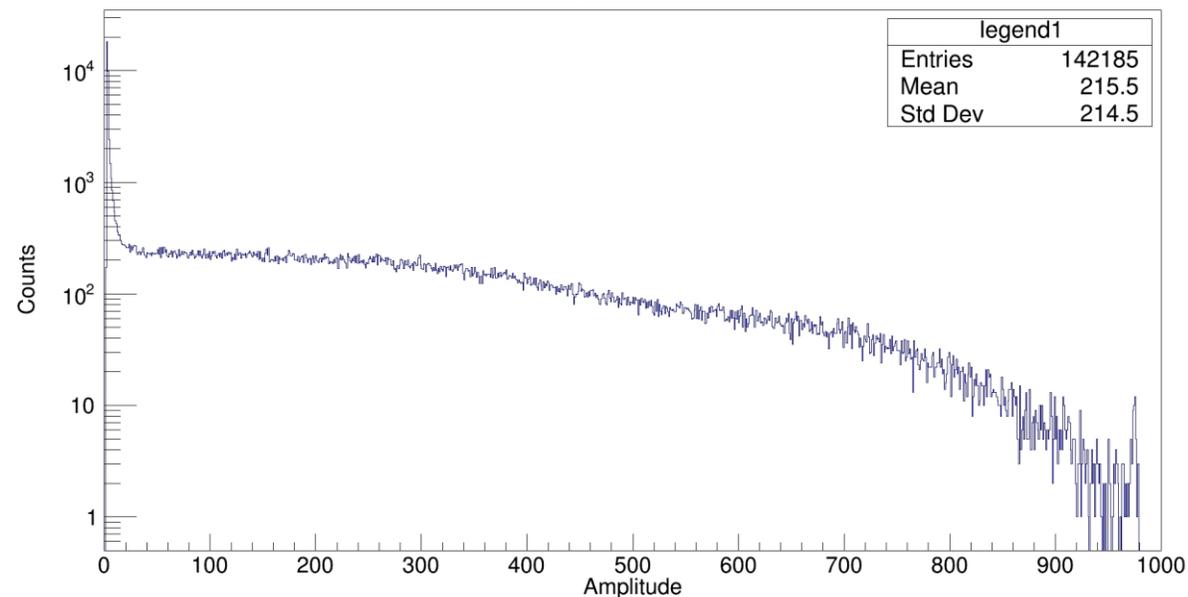
测试结果

大角度测试（接近实际工作状态）：相同的半导体触发范围内， $25 \text{ mV} \leq E_{\text{cutoff}} \leq 86 \text{ mV}$ 半导体的 α 计数率大约为460 cps；PPAC探测到的阿尔法计数率大约为0.15~0.26 cps。不同状态下 α 抑制能力在1700~3000之间。PPAC与半导体探测器的裂变碎片比值：98%。

Silicon microstrip--50V-Si trig-10mv Th



Silicon microstrip-400Pa-480V-2SCCM



测试结果

圆筒型PPAC Alpha计数率计算结果 (50mm×50mm硅微条探测器)

序号	半导体探测器	测试条件	测试条件	触发阈值	α计数	裂变碎片计数	总时间	α计数率	裂变碎片计数率	半导体α计数率	α计数比值
1	50mm×50mm硅微条	-50V	C ₃ F ₈ 、200Pa、2SCCM	575Th (25~86mv)	8098	72110	53262	0.152040855	1.353873306	459.8712687	3024.655904
2	PPAC平行板电离室	450V									
3	50mm×50mm硅微条	-50V	C ₃ F ₈ 、200Pa、2SCCM	575Th (25~86mv)	3361	24703	16250	0.206830769	1.520184615	459.8712687	2223.418065
4	PPAC平行板电离室	480V									
5	50mm×50mm硅微条	-50V	C ₃ F ₈ 、200Pa、2SCCM	922Th (25~86mv)	10284	76253	50708	0.202808235	1.503766664	459.8712687	2267.517726
6	PPAC平行板电离室	460V									
7	50mm×50mm硅微条	-50V	C ₃ F ₈ 、200Pa、2SCCM	922Th (25~86mv)	13989	87899	56855	0.246046962	1.546020579	453.119403	1841.59723
8	PPAC平行板电离室	480V									
9	50mm×50mm硅微条	-50V	C ₃ F ₈ 、200Pa、2SCCM	912Th (35~86mv)	3387	28668	18906	0.179149476	1.516344018	459.8712687	2566.96965
10	PPAC平行板电离室	480V									
11	50mm×50mm硅微条	-50V	C ₃ F ₈ 、200Pa、2SCCM	922Th (35~86mv)	3358	19610	12560	0.267356688	1.561305732	459.8712687	1720.066449
12	PPAC平行板电离室	500V									

采用1.5 mm间距后，PPAC信号幅度大幅减小，裂变信号探测效率显著降低，不足20%，已不适用于此方案。



PART 04

总结与展望

总结

明确目标

明确了需求探测器的各项指标，便于有的放矢的进行设计与测试实验

零件试制

在实验室内制备了关键的超薄电极与超薄底衬靶，摸索了关键部件制作工艺，确定了方案的可行性

方案定型

确定了基于PPAC的符合测量技术方案并完成探测器原理与工业设计

单元测试

测试了最基本关键的单层雪崩电离室的各项性能以及对碎片和阿尔法本底的响应，满足需求



后续工作

超薄底衬靶片测试

测试超薄底衬靶片的承压能力与牢固性，
设计对应的工装

符合单元测试

使用高放射性活度镀片组装一个基本的
符合测量单元进行性能测试

阿尔法放射源测试

基于 10^6 以上活度的 ^{241}Am 等阿尔法放射
源验证高本底下基本单元阿尔法抑制比

整体测试应用

腔室与新制靶片到位后进行PPAC
整体组装测试

本工作在郑普、朱通华、肖军、孙君杰、杨杰成等同事的指导与帮助下完成！



欢迎大家提出宝贵建议与疑问，帮助推进本工作！

WELCOME TO VALUABLE SUGGESTIONS AND QUESTIONS!

任智洲 0816-2482138 zhizhouren@qq.com