成都理工大學
CHENGDU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

第二十二届全国核电子学与核探测技术学术年会

4πγ电离室微弱电流测量系统的研制

报告人：杨博文 硕士研究生

先进核探测技术与仪器团队

报告时间：2024.07.16

联系方式：2022050459@stu.cdut.edu.cn

目录
CONTENT

研究背景
Research background

研究内容
System design

实验测试
System testing

总结与展望
Summary and prospect

成都理工大學
CHENGDU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

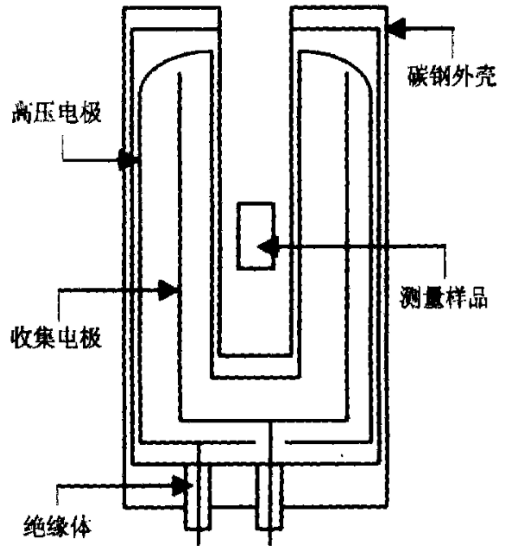
4πγ电离室研究背景与意义

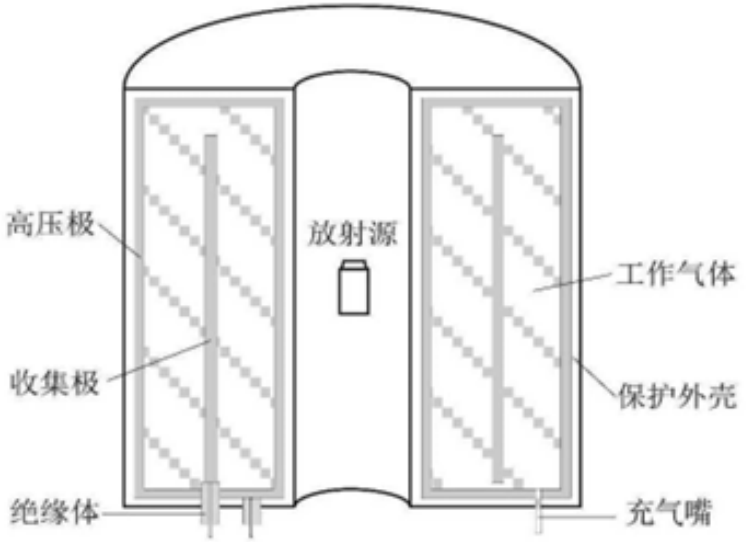
4πγ电离室探测器通常被用于放射性核素活度测量与核医学等领域中，由其制成的活度检测仪器具有结构简单、稳定性好、测量范围广等优点。

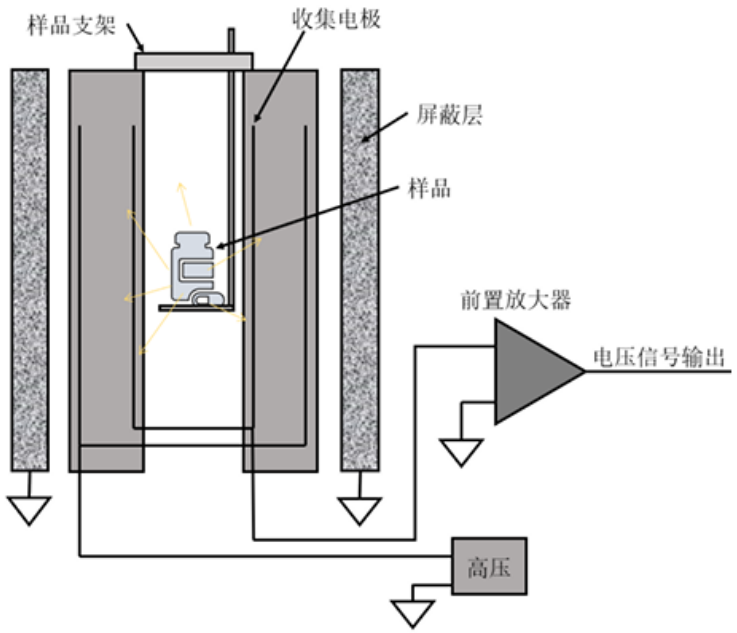
4πγ电离室工作原理

放射性核素产生的γ射线在电离室内作用，使内部气体电离产生大量离子对，在电场作用下带电离子分别向两极漂移形成电流，单位时间内电离室输出电流I：

$$I = \mathrm{e} \cdot N \cdot \frac{\bar{E}}{w}$$







微弱电流研究背景与意义

输出电离电流范围： 10^{-12} A~10^{-6} A

（本底低至10^{-14} A）

微弱电流测试精度：优于5%

国内外部分活度计指标

指标 / 活度计	量程 (Bq)($^{99}Tc^{m}$)	准确度	响应时间（高活度/低活度）	研发单位
Fidelis	1k~75G	1%	1s/1s	英国国家物理实验室
CRC55TR	0.1M~250G	2%	2s/16s	美国 Capintec.inc 公司
ALOKA IGC-7	0.1M~100G	5%	未知	日本 HITACHI 公司
SEA ISOMED2010	40K~200G	5%	3s/未知	德国 NUVIA 公司
RM905-A	0.1M~300G	2%	5s/未知	北京华瑞森公司
4πγ 电离室活度标准装置测量系统	0.1M~10G	4%	2s/1h	中国计量科学研究院

常见核素活度计活度计算公式：

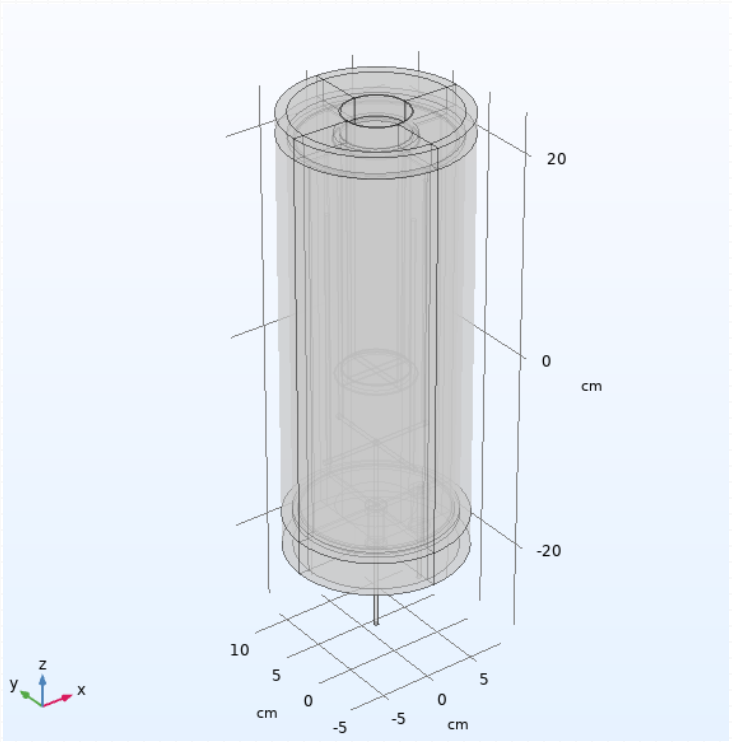
$$A = \delta * I$$

常见核素校正因子

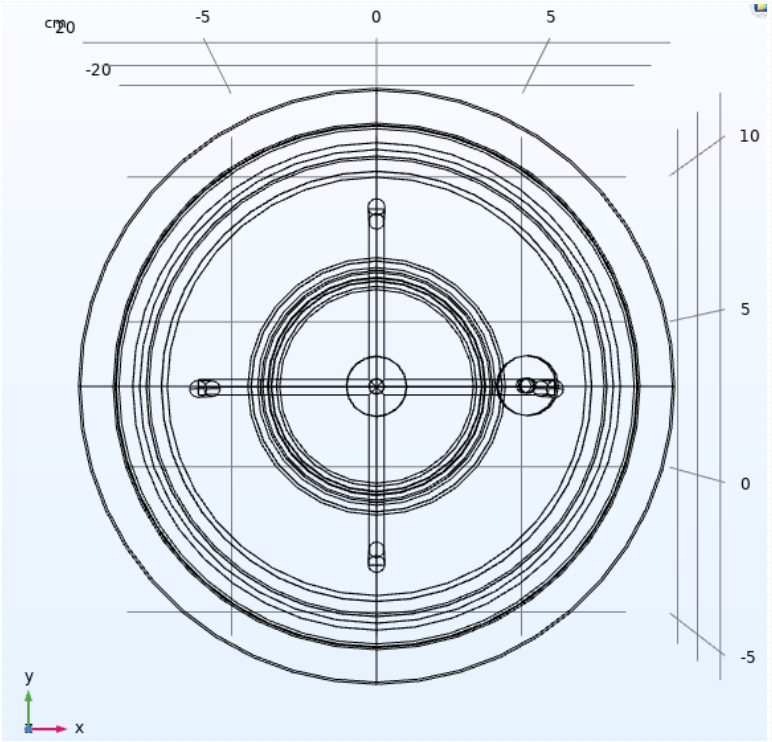
核素名称	校正因子（pA/MBq）
^{18}F	4.918
^{22}Na	8.252
^{60}Co	7.200
^{67}Ga	3.060
^{99m}Tc	3.699
^{111}In	5.811
^{131}I	2.357
^{137}Cs	2.297
^{133}Xe	1.296
^{201}Tl	2.876
^{241}Am	0.350
^{226}Ra	7.035

4πγ电离室探测器设计

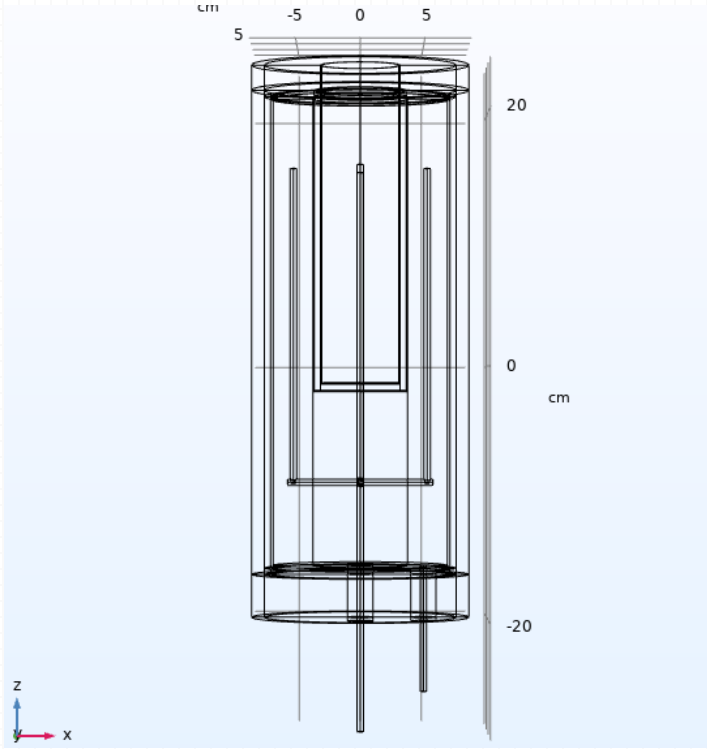
4πγ电离室探测器立体模型



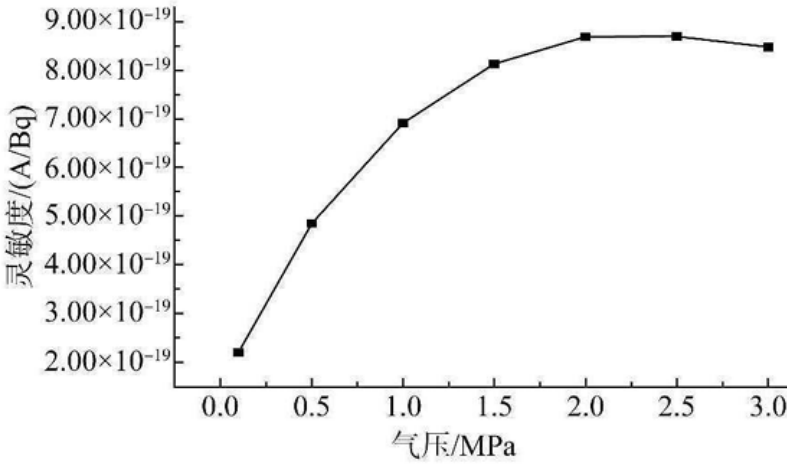
4πγ高压电离室探测器俯视图



4πγ高压电离室探测器侧视图

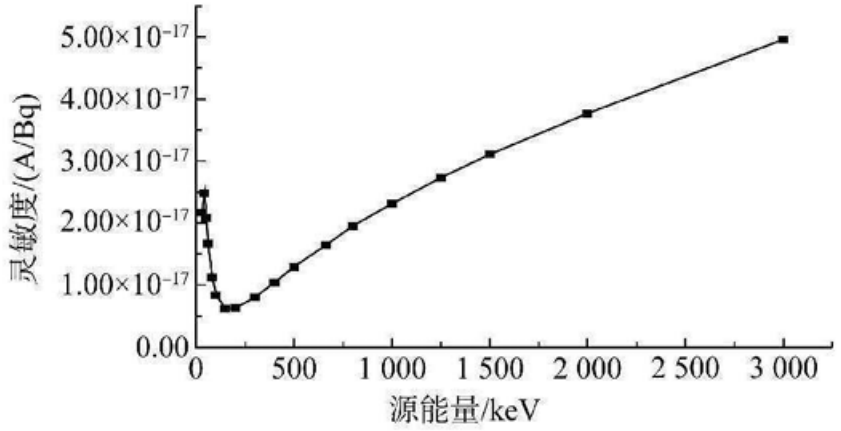


4πγ电离室探测器设计

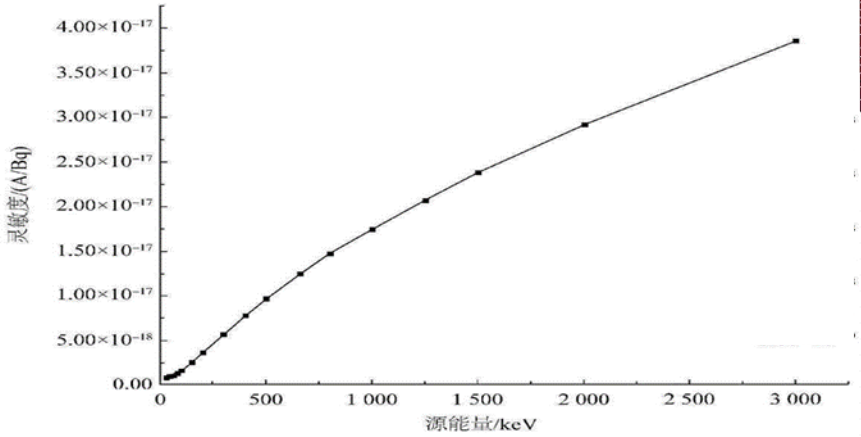


选择2mm厚的Al作为高压极材料

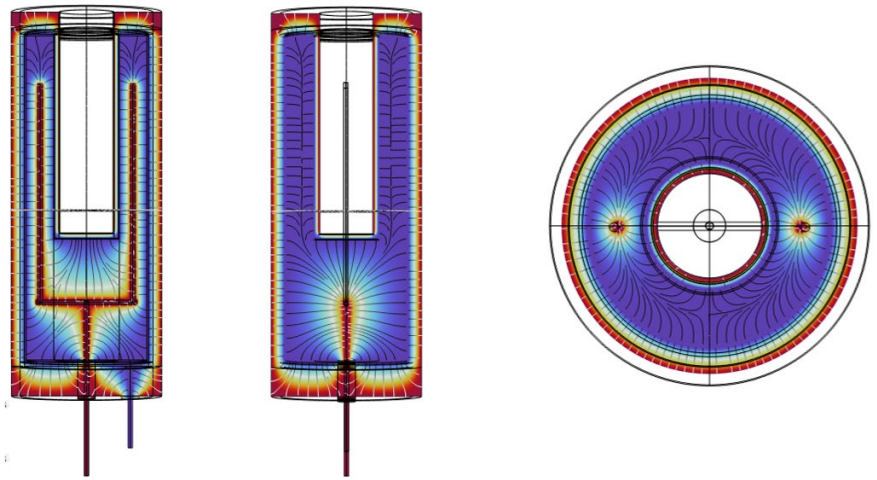
氩气



氮气

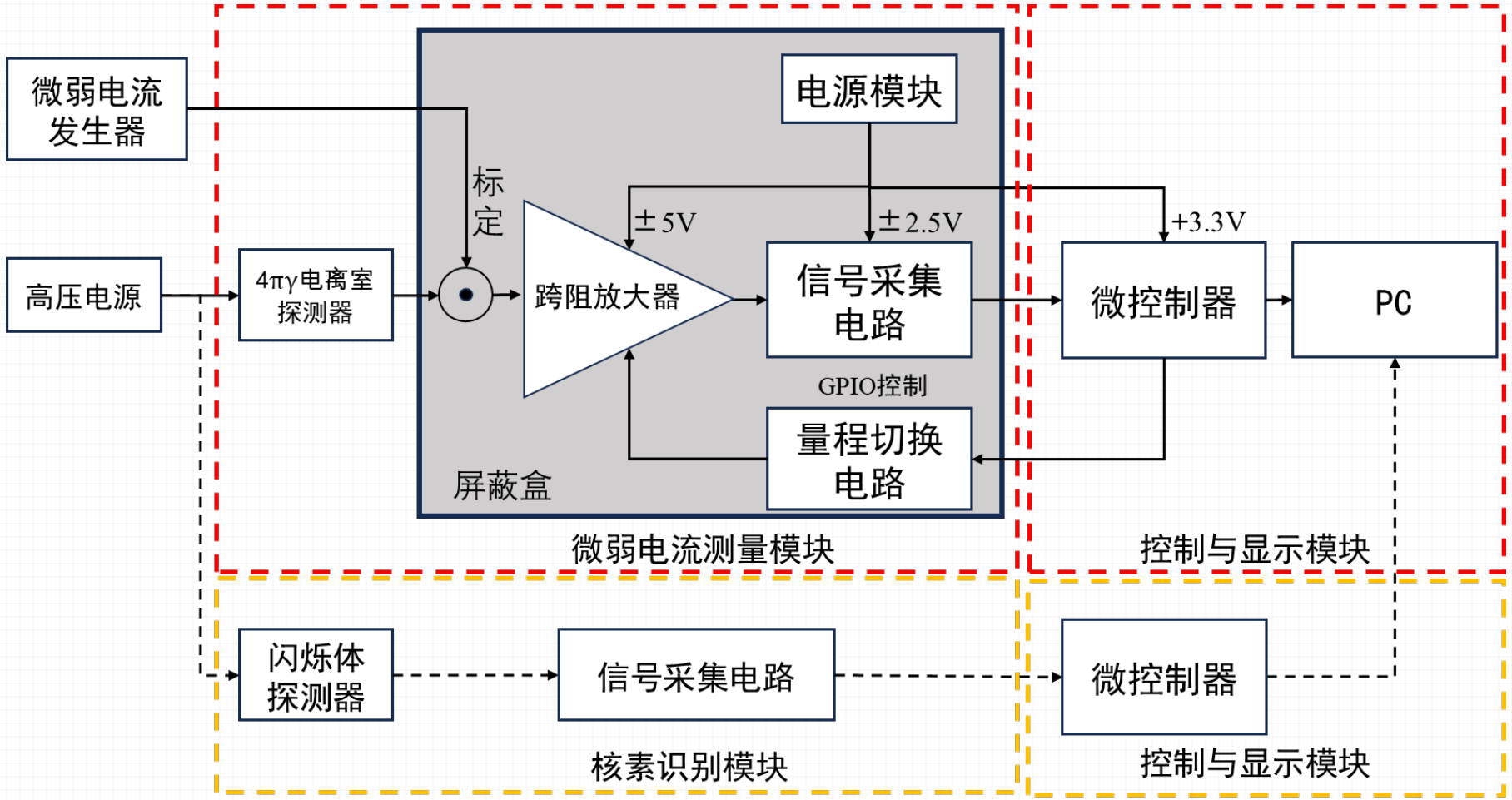


选择内部填充高纯氩气



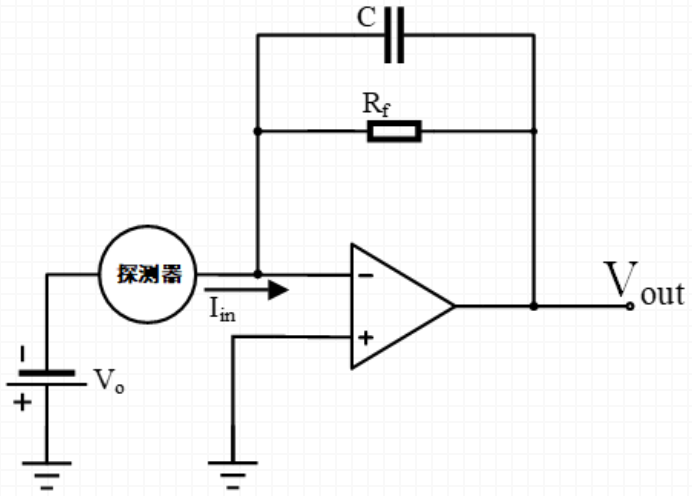
选择2根收集丝的结构

系统整体设计

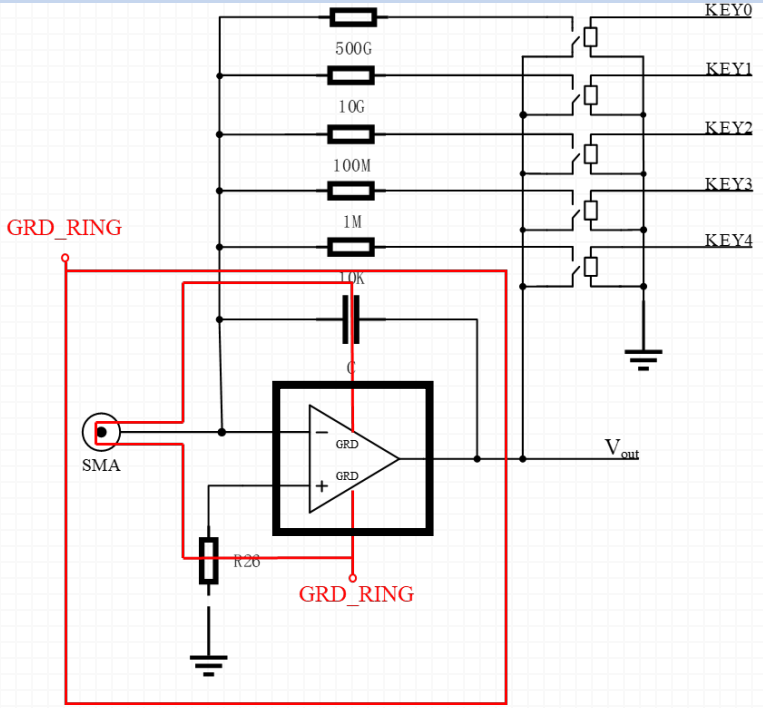


系统整体设计框图

跨阻放大器电路设计



$$V_{out} = -I_{in} * R_f$$



档位	反馈电阻	量程范围	输出电压
1	500GΩ	50fA~1pA	0.025V~0.5V
2	10GΩ	1pA~100pA	0.01V~1V
3	100MΩ	100pA~10nA	0.01V~1V
4	1MΩ	1nA~1uA	0.01V~1V
5	10KΩ	1uA~200uA	0.01V~2V

跨阻放大器：ADA4530-1

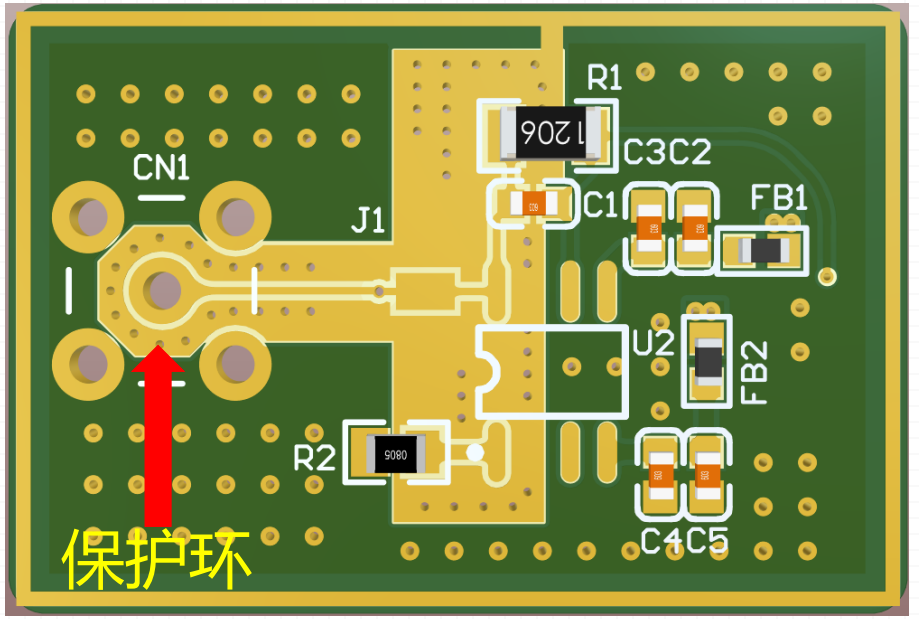
输入失调电压：8μV

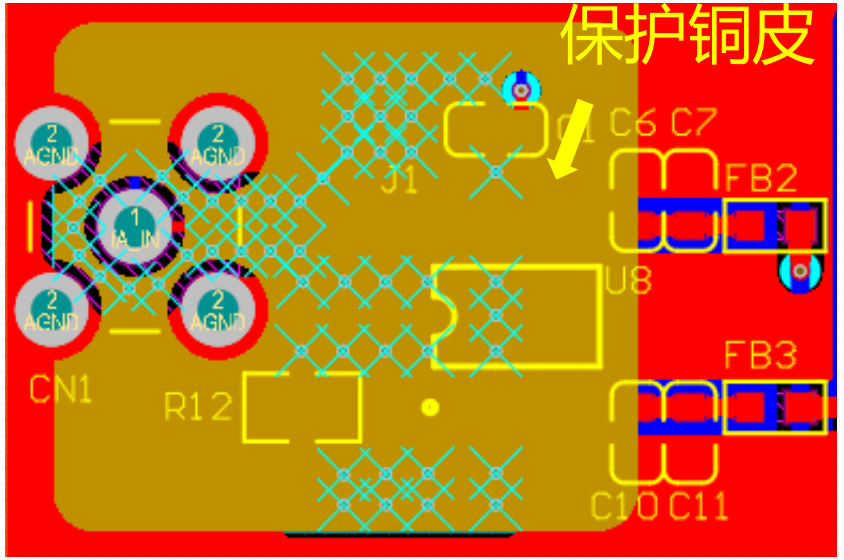
输入偏置电流：<1fA

保护与屏蔽

PCB设计中需要在输入信号处采取保护环设计以及留出一块保护铜皮。

同时，微弱电流测量时极易受到周围环境的干扰，需要对系统整体进行屏蔽。

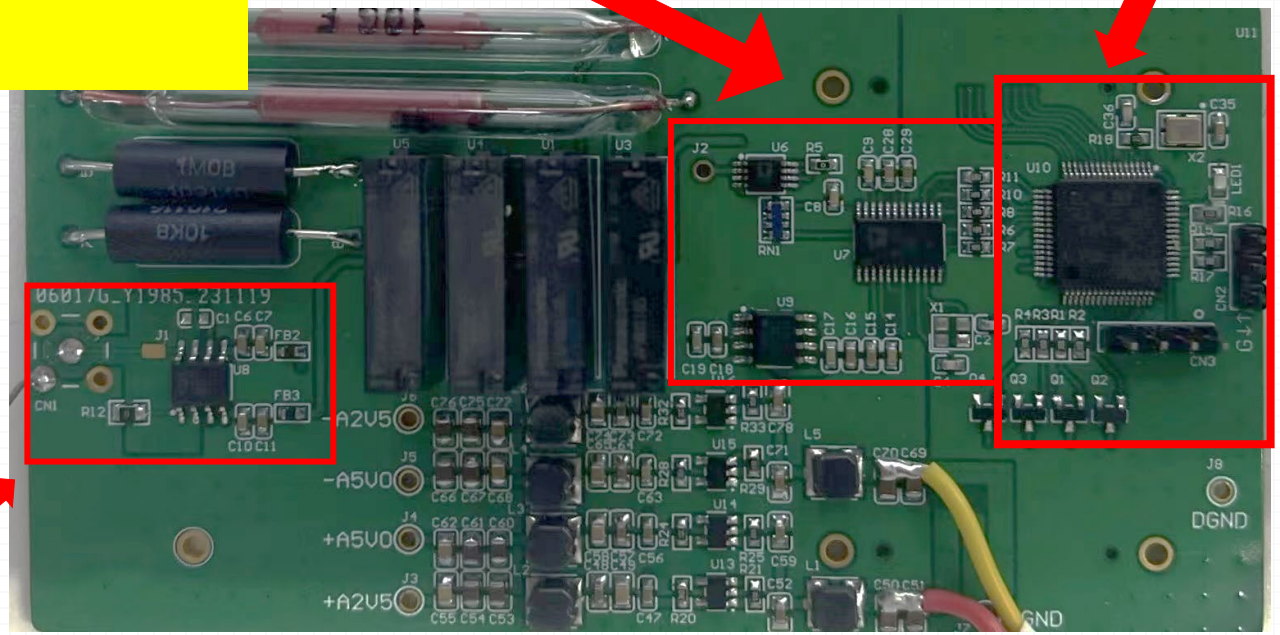




信号采集电路与微控制器设计

信号采集电路：选用24位ADC AD7172-2，信号采用伪差分输入，并通过SPI总线进行传输。

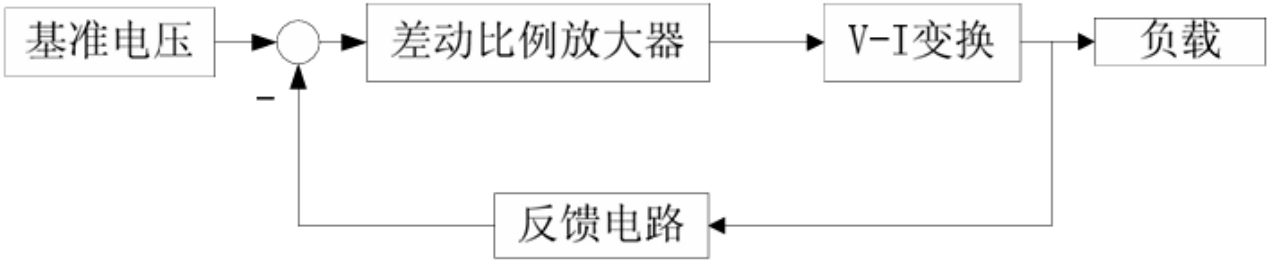
微控制器：设计档位自动量程切换算法，并对数据进行传输与显示。

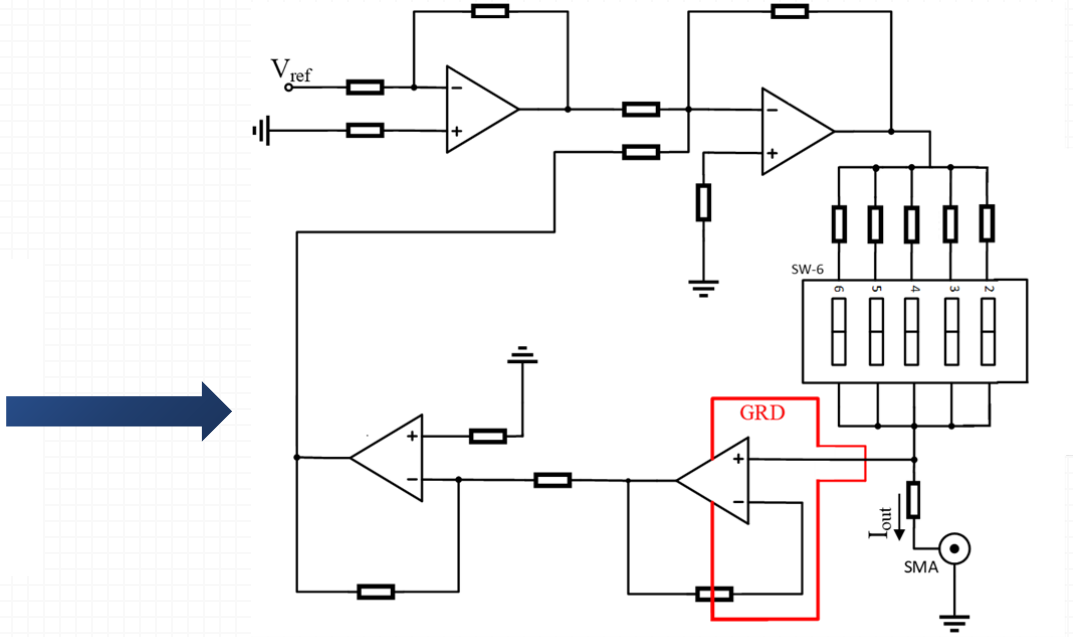


跨阻放大器

微弱电流发生器设计与标定

微弱电流发生器原理框图



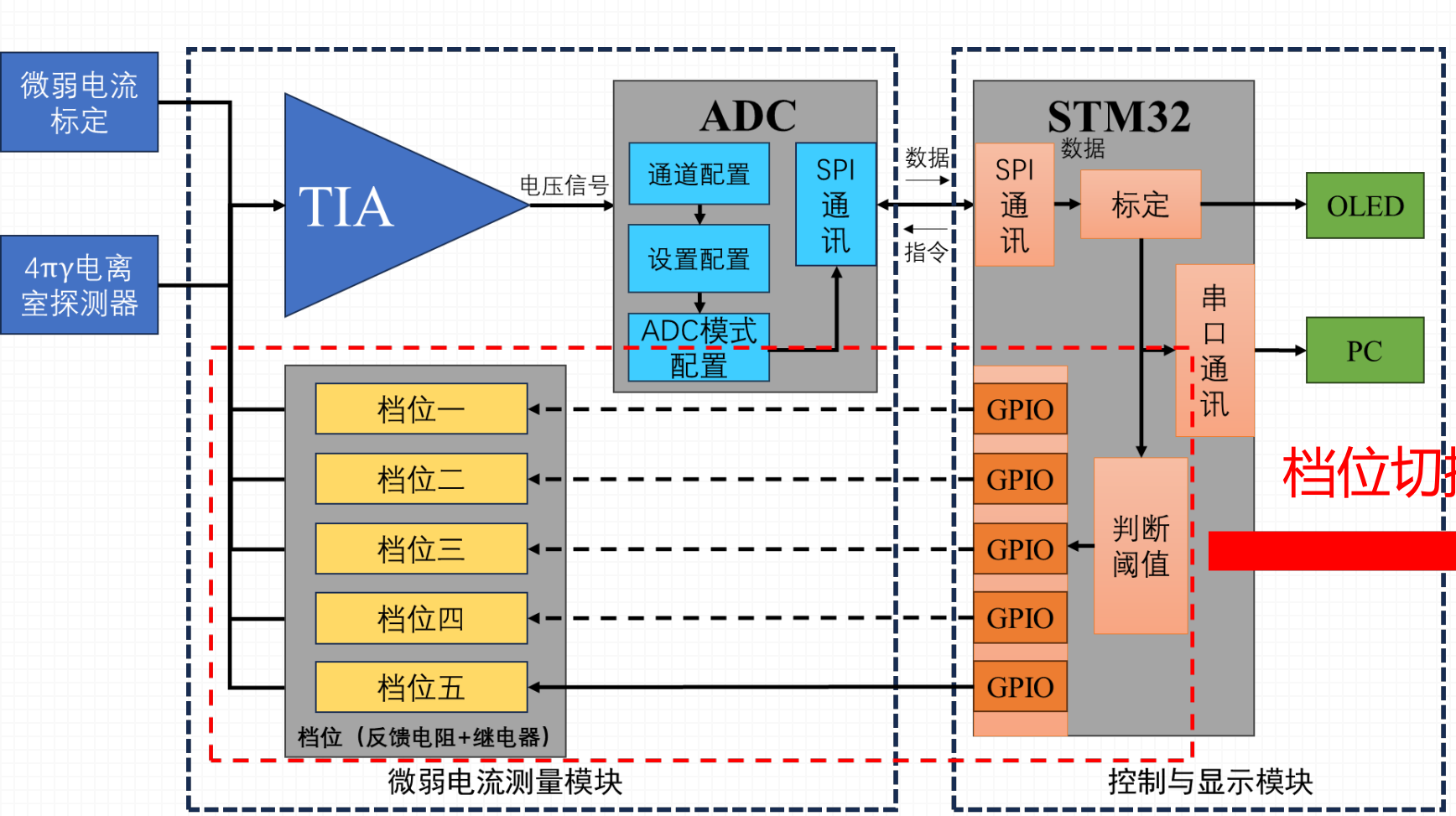


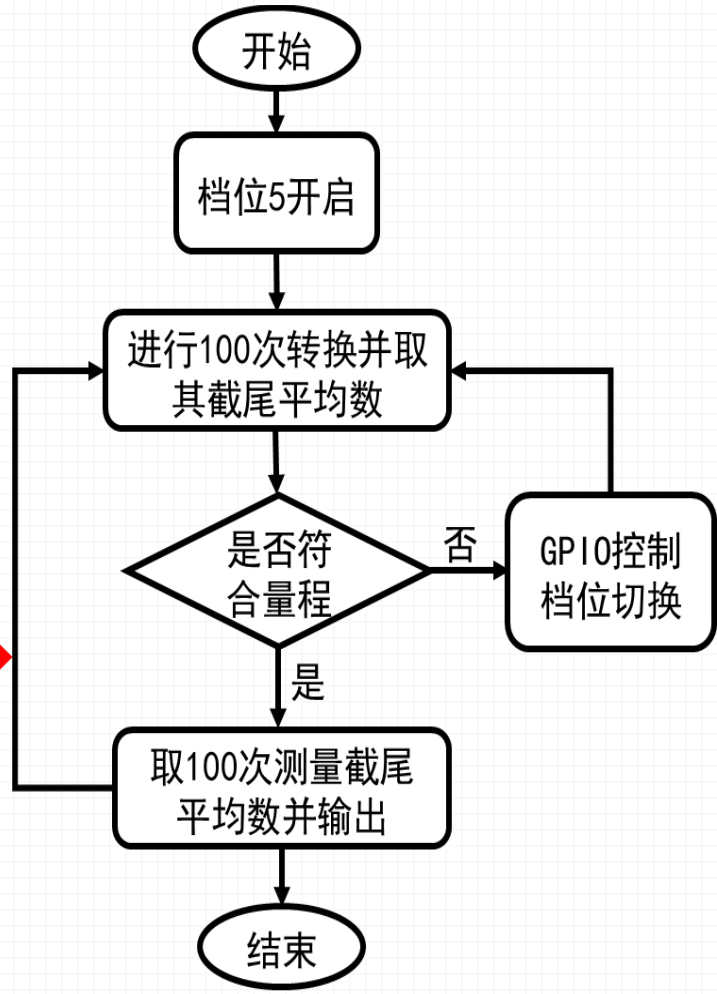
微弱电流发生器档位设计

基准电压	电阻R	输出电流
1V	500G	2pA
1V	100G	10pA
1V	100G	10pA
1V	10G	100pA
1V	1G	1nA
1V	1M	1uA

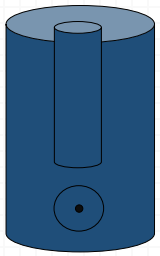
记录差值
对比标定

系统整体程序设计


微弱电流标定
4πγ电离室探测器
TIA
电压信号
ADC
通道配置
设置配置
ADC模式配置
SPI通讯
数据
指令
STM32
SPI通讯
数据
标定
OLED
串口通讯
PC
GPIO
GPIO
GPIO
GPIO
GPIO
判断阈值
档位一
档位二
档位三
档位四
档位五
档位（反馈电阻+继电器）
微弱电流测量模块
控制与显示模块
档位切换

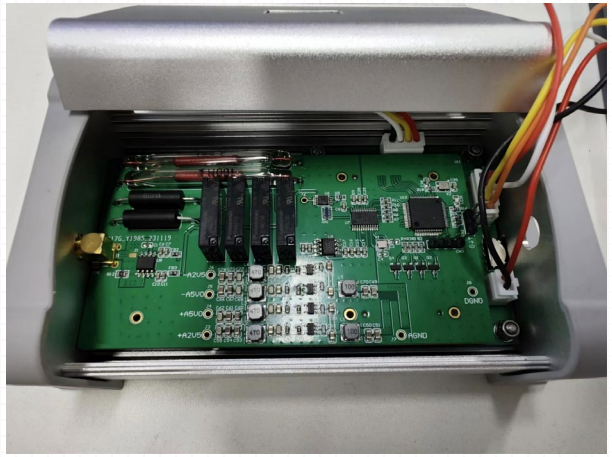

开始
档位5开启
进行100次转换并取其截尾平均数
是否符合量程
否
GPIO控制档位切换
是
取100次测量截尾平均数并输出
结束

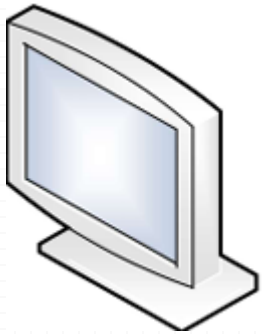
实验测试系统搭建



4πγ电离室探测器

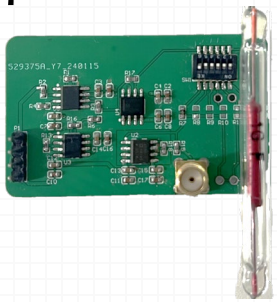
数据测量





PC

静电计



微弱电流发生器

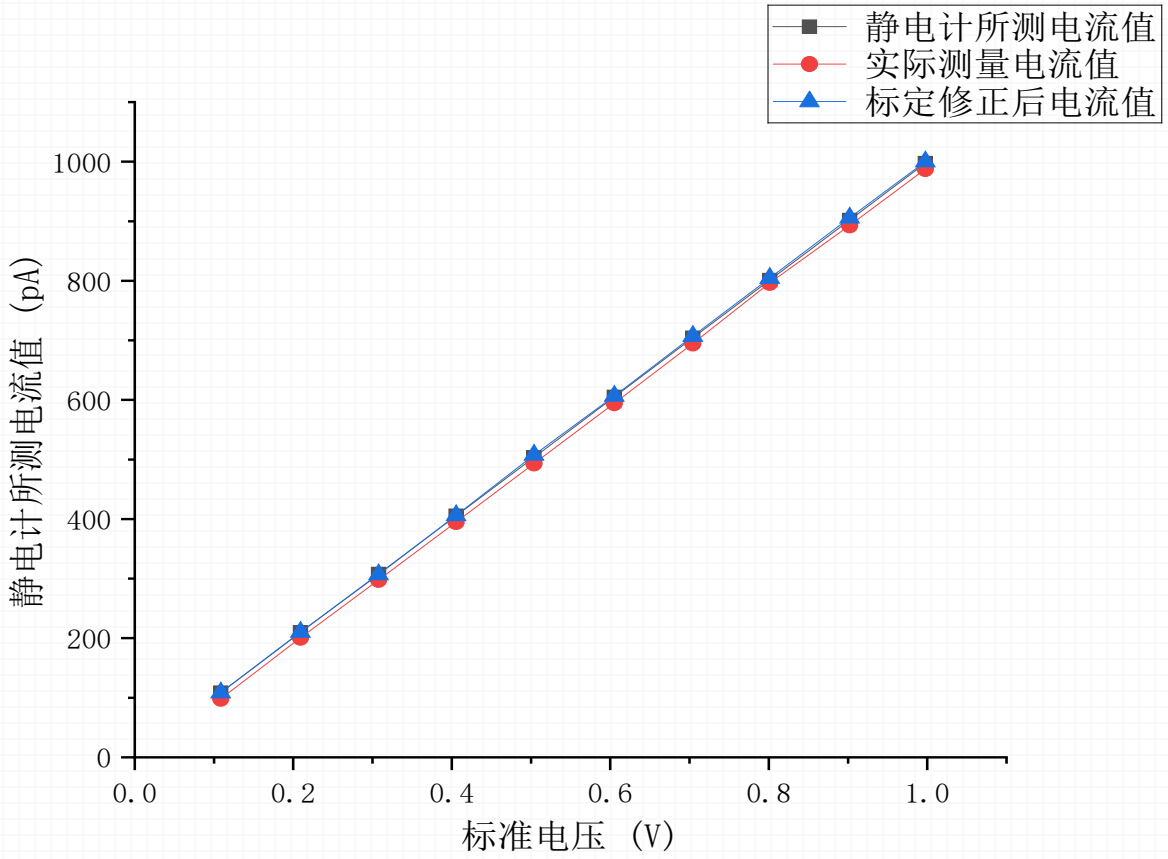
标定

测试

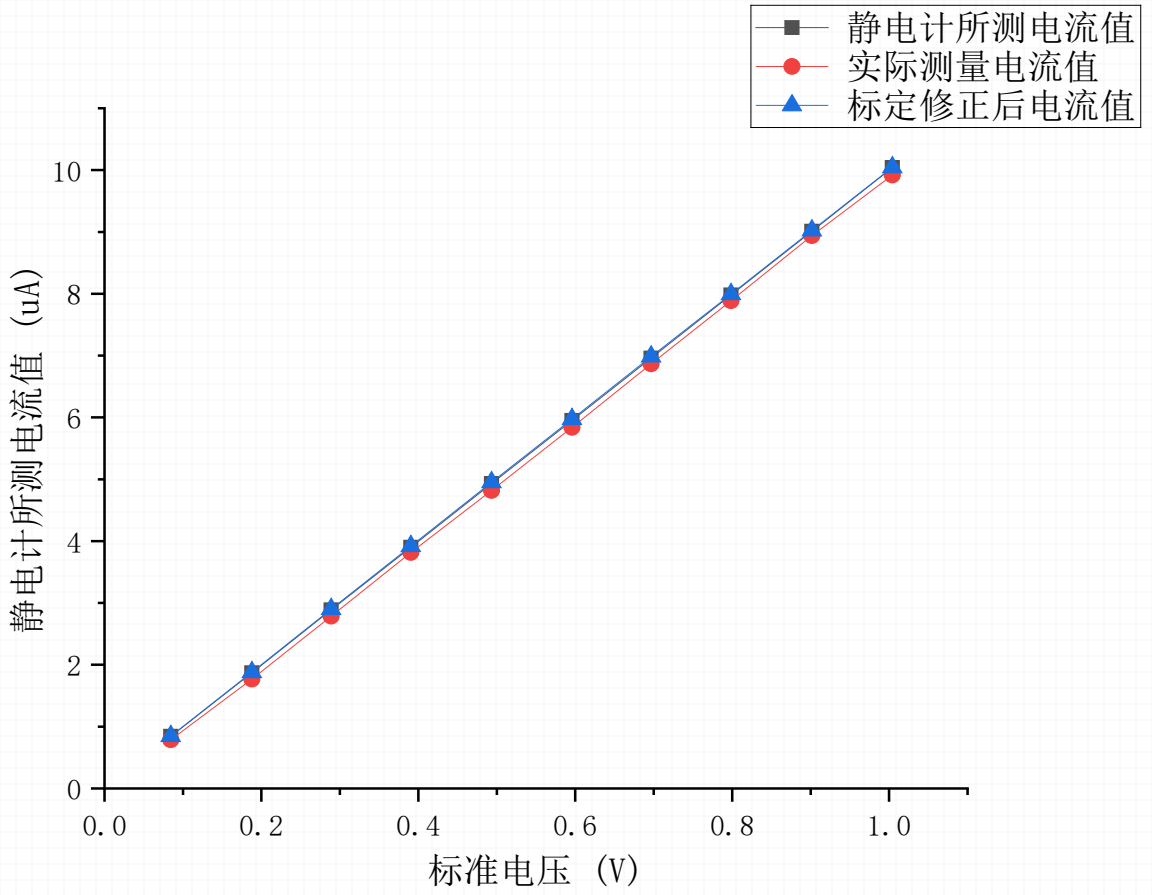
微弱电流计

（三） 实验测试

微弱电流标定结果



100pA~1nA微弱电流标定结果



1uA~10uA微弱电流标定结果

通过标定后修正的电流值明显优于实际电流值

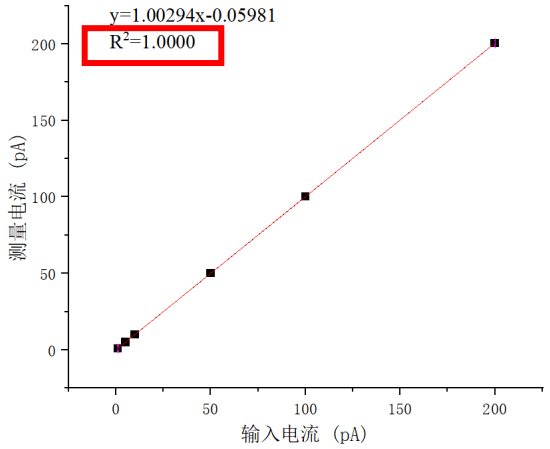
测试结果

档位	输入电流值	实测电流值	误差	输入电流值	实测电流值	误差
500G	20 fA	19.13fA	0.87fA	100fA	102.6fA	2.6fA
	48fA	49.84fA	1.84fA	150fA	151.6fA	1.6fA
	62 fA	64.46 fA	2.64fA	200fA	201.04fA	1.04fA
10G	1pA	0.9528pA	4.72%	50pA	50.0241pA	0.05%
	5pA	5.0054pA	0.11%	100pA	100.1152pA	0.12%
	10pA	10.0206pA	0.21%	200pA	200.6009pA	0.30%
100M	500pA	504.22pA	0.84%	5nA	4.9912nA	0.18%
	1nA	0.9977nA	0.23%	10nA	10.0021nA	0.02%
	2nA	1.9963nA	0.19%	20nA	20.0037nA	0.02%
1M	50nA	50.191nA	0.38%	500nA	498.509nA	0.30%
	100nA	99.562nA	0.44%	1uA	1.0010uA	0.10%
	200nA	199.240nA	0.38%	2uA	2.0002uA	0.01%
10K	5uA	5.0204uA	0.41%	50uA	49.8645uA	0.27%
	10uA	9.9589uA	0.41%	100uA	100.1294uA	0.13%
	20uA	19.9295uA	0.35%	200uA	200.0798uA	0.04%

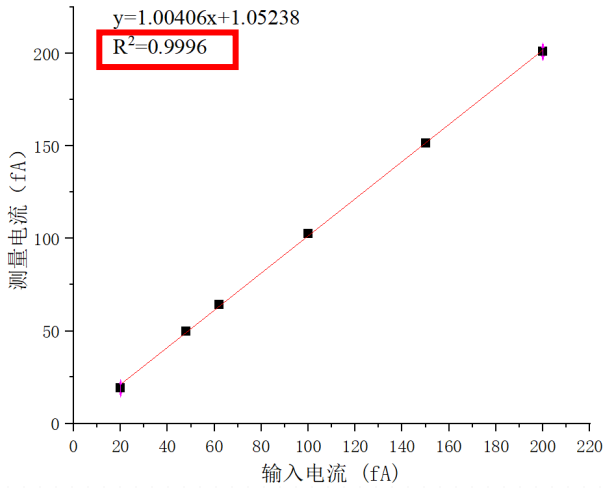
在50fA~1pA范围内误差不超过5fA，其余电流测量整体误差不超过0.42%

（三） 实验测试

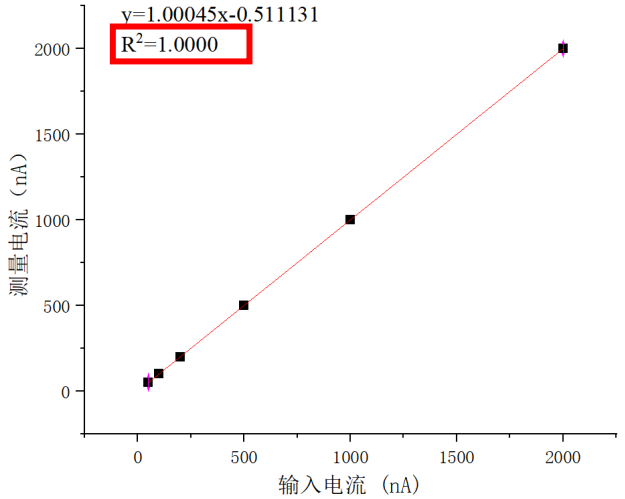
线性度测试结果



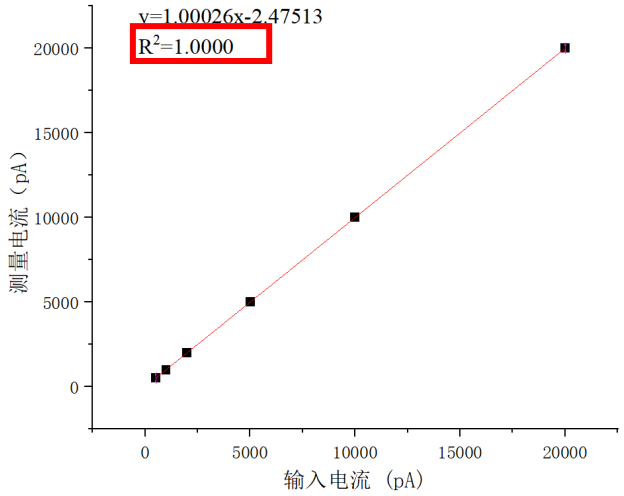
（a）1~200pA 线性度测试



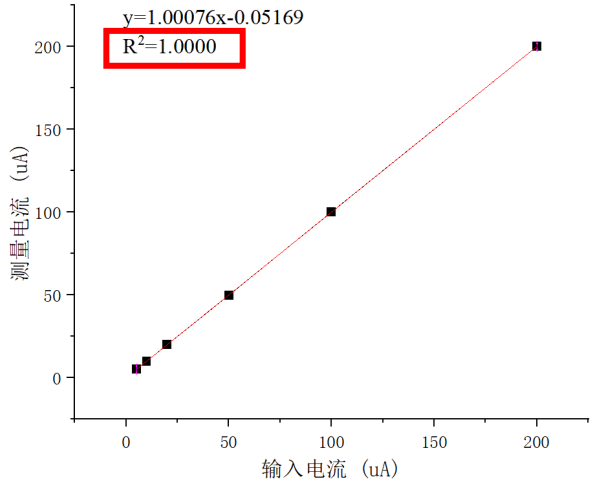
（c）20~200fA 线性度测试



（e）50nA~2uA 线性度测试



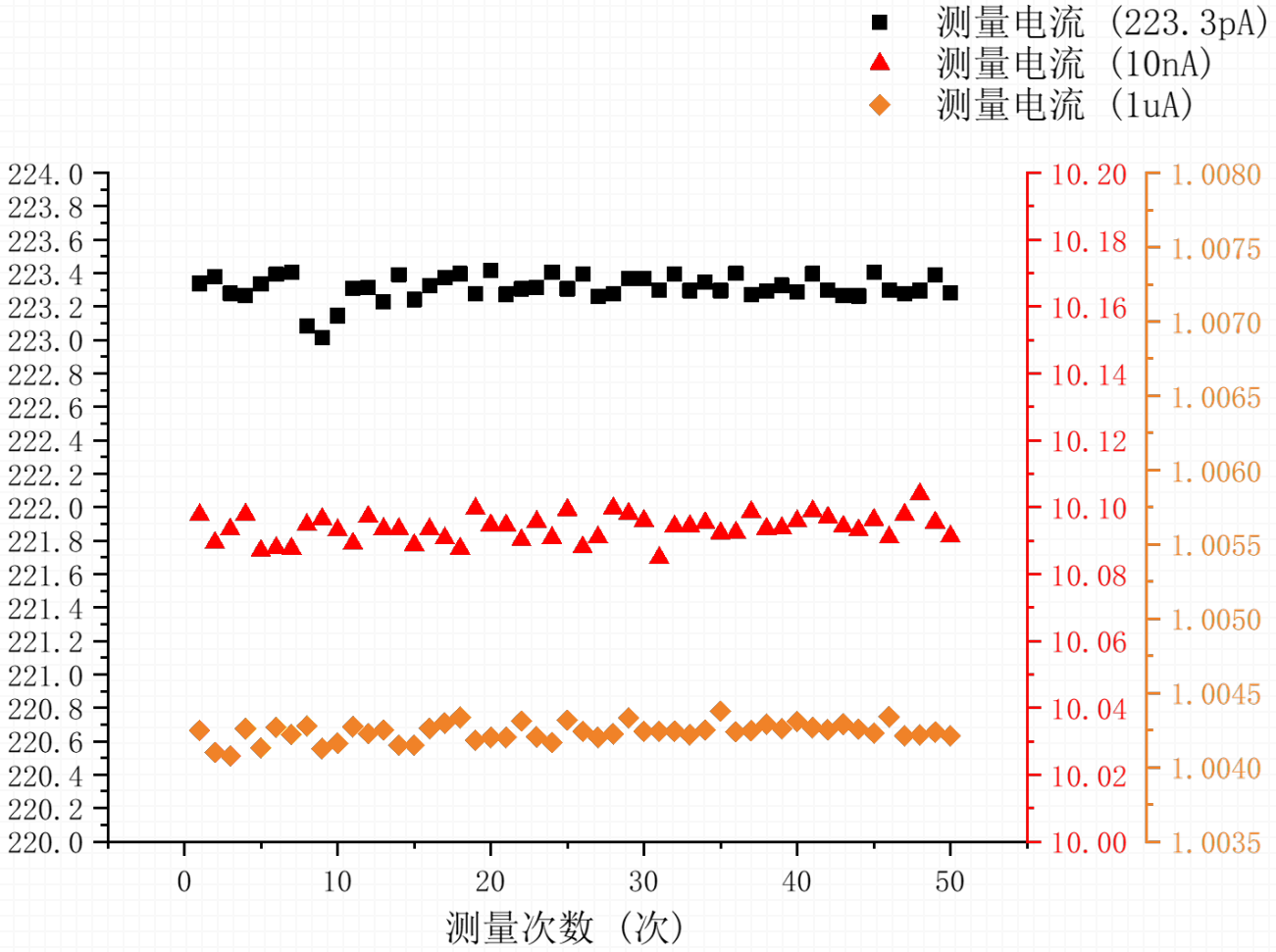
（b）500pA~20nA 线性度测试



（d）1~200uA 线性度测试

各档位所测数据拟合度都大于0.999，线性度良好。

稳定性测试结果



输入电流	标准差
223.3pA	79fA
10nA	3.96pA
1uA	620pA

记录电流计50次测量数据，电流测试标准差均满足各档位设计误差范围，系统稳定性较好。

总结

- 完成了4πγ电离室探测器的设计与仿真；
- 完成基于4πγ电离室探测器的微弱电流测量系统的设计与研制：

  量程范围满足4πγ电离室探测器要求： 50fA~200uA；

  50fA~1pA范围内误差不超过5fA，其余电流测量整体误差小于0.42% ，线性度良好，稳定性良好；
- 完成了自动切换量程算法，可以根据所测微弱电流自动选择合适量程。

展望

- 集成核素识别模块，在测量4πγ电离室探测器的输出电流的同时，通过闪烁体探测器测量能谱进行核素识别。

成都理工大學
CHENGDU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

第二十二届全国核电子学与核探测技术学术年会

恳请各位老师批评指正！

报告人：杨博文 硕士研究生

联系方式：2022050459@stu.cdut.edu.cn