

文章编号: 1007-4627(2015)02-0202-06

## 一种新型低噪声大动态范围小型前端电路的研制

孙文<sup>1,2</sup>, 千奕<sup>1</sup>, 苏弘<sup>1</sup>, 董成富<sup>1</sup>, 赵兴文<sup>1,2</sup>,  
王晓辉<sup>1,2</sup>, 李小刚<sup>1</sup>, 马晓莉<sup>1</sup>, 杨海波<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 设计了一款小型化、低噪声、大动态范围的前端处理电路, 包括电荷灵敏前放、成形放大电路、单道脉冲幅度分析电路。前放的等效输入噪声 $\leq 1.5$  keV, 动态范围可达 $0 \sim \pm 11$  V, 积分非线性 $\leq 0.11\%$ 。该电路为模块化电路, 当前放与主放模块构成系统时, 其分辨可以达到 $0.12\%$ 。当前放、主放模块与中国科学院近代物理研究所制作的离子注入型硅探测器构成系统时, 采用<sup>239</sup>Pu  $\alpha$ 源进行测试, 测得在 $5.157$  MeV时的能量分辨约为 $0.82\%$ ; 当主放、单道脉冲幅度分析模块与中国科学院近代物理研究所制作的碘化铯晶体探测器构成系统时, 采用<sup>60</sup>Co源进行测试, 对于能量为 $1.332$  MeV的 $\gamma$ 射线, 测得其能量分辨约为 $7.9\%$ 。该电路可用于半导体探测器、光电倍增管及电子倍增器等探测器信号的处理。目前, 小型前端电路已经应用于中国科学院近代物理研究所自行研制的便携式盐湖卤水铀、钍、钾快速测量仪的原型样机, 达到了预期效果。

**关键词:** 低噪声; 大动态范围; 小型; 前端电路

**中图分类号:** TL821      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.02.202

### 1 引言

前端电子学系统是核物理与粒子物理实验中必不可少的重要部分。它位于数据源(即探测器)输出端, 其主要任务是从探测单元提取信号, 进行放大、成形等模拟处理, 经过数字化处理, 为获取系统提供数字信息, 同时为触发判选系统提供数据<sup>[1]</sup>。前端电路对探测器信号的处理一般包括放大和甄别, 其中放大部分又分为前置放大和主放大, 根据多级级联放大器总的噪声系数的弗里斯公式可得: 级联放大器中各级噪声系数对总噪声系数的影响是不同的, 越是前级影响越大, 第一级影响最大<sup>[2]</sup>, 所以前置放大器的噪声性能影响到整个前端电路的噪声指标。因此前端电路中的前放部分噪声性能一定要好。同时, 某些探测器工作在较高的计数率( $10^5 \sim 10^7/s$ <sup>[3]</sup>)下, 为使前放输出信号不会因为计数率效应产生“堆积”<sup>[4]</sup>, 需要使前放有一定的动态范围, 如变换增益为 $44$  mV/MeV的前放, 对于能量 $1$  MeV的射线, 当输入信号计数率为 $10^5/s$ 时, 动态范围要大于 $5$  V<sup>[4]</sup>。目前国内外低噪声前放的主要生产厂商中, 美国ORTEC公司生产的前放性能较好, 其低

噪声前放 $142$  A的动态范围是 $0 \sim \pm 9$  V<sup>[5]</sup>; 其他如美国AMPTEK公司生产的电荷灵敏前放A250<sup>[6]</sup>、意大利CAEN公司生产的电荷灵敏前放A422A<sup>[7]</sup>, 噪声性能与 $142$  A相差不大, 但是动态范围都小于 $142$  A。本文设计的小型前端电路中的前放, 其等效输入噪声小于以上几款电路, 动态范围达到 $0 \sim \pm 11$  V, 对于能量为 $1$  MeV的射线, 允许输入信号的平均计数率可达 $10^6$ , 并且结构简单, 造价远低于国外同类型电路。

### 2 设计思路与电路结构

整个电路的结构框图如图1所示, 探测器信号经过

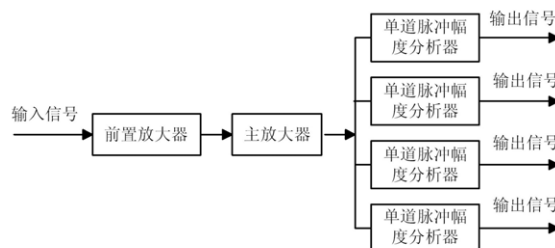


图1 小型前端电路结构框图

收稿日期: 2014-06-06; 修改日期: 2014-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11475233, 11305233)

作者简介: 孙文(1988-), 男, 辽宁铁岭人, 硕士研究生, 从事前端电子学研究; E-mail: sunwen@impcas.ac.cn

通信作者: 苏弘, E-mail: suhong@impcas.ac.cn

电荷灵敏前置放大器预放后，经过主放大器滤波成形、放大，最后经过单道脉冲幅度分析器输出。

### 2.1 前置放大器设计

电荷灵敏前置放大器原理图如图 2 所示。

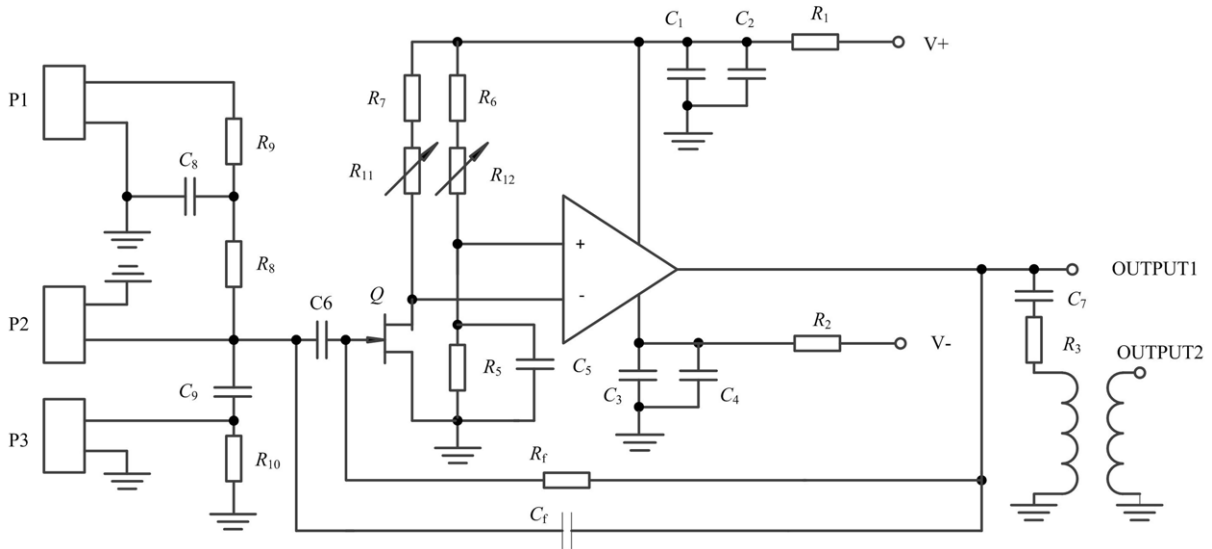


图 2 电荷灵敏前置放大器基本原理图

其中  $C_f$  是反馈电容， $R_f$  是反馈电阻， $C_6$  为耦合电容， $Q$  为结型场效应管。为了保证  $C_f$  上电荷的积累，一般情况下， $R_f$  为  $M\Omega$  到  $G\Omega$  量级。 $R_f$  主要有两个作用，一是用于泄放  $C_f$  上的电荷，二是产生直流负反馈以稳定放大器直流工作点。探测器与放大器之间的  $C_6$  起到隔直作用，取值为几千个  $pF$  量级<sup>[8]</sup>。

对于高分辨率的能谱测量装置，放大器系统的噪声要小，就必须将放大器系统中的第一级噪声减到最小。所以，低噪声的电荷灵敏前放在整个系统中起着主要的作用。为了在噪声条件满足要求的前提下获得更大的输出动态范围，并且综合考虑到响应速度快、频带宽等要求，这里采用 THS4011 作为前放的放大级，THS4011 的供电电压范围是  $\pm 5\text{ V} \sim \pm 15\text{ V}$ <sup>[9]</sup>，带宽为  $290\text{ MHz}$ ，等效输入噪声电压为  $7.5\text{ nV}/\text{Hz}^{1/2}$ 。由于结型场效应管具有低噪声、大的跨导，高输入阻抗，低输入电容和小的栅极漏电流等特点，我们采用了 N 沟道低噪声的场效应管 2SK152 作为电荷灵敏前置放大器的输入级，从而降低了整个电路的噪声。2SK152 的主要参数为  $K = 10 \sim 27\text{ J}$ ， $C_g = 6\text{ pF}$ ， $gm = 20\text{ mS}$ 。事实证明 2SK152 是非常理想的运放输入级。除此以外，还选用了温度稳定性好的反馈电容和泄放电阻。通过良好的电路设计，降低噪声对整个电路的影响<sup>[10]</sup>。

该前置放大电路，具有较大的动态范围，可适用于较高的计数率和较大的输入能量。根据平均计数率与动

态范围的关系<sup>[4]</sup>

$$\bar{n} = \frac{1}{\tau_f} \left( \sqrt{\frac{\bar{V}_0 + 2.6\sigma}{V_{OM}} + 0.845 - 0.919} \right)^2, \quad (1)$$

其中： $\bar{V}_0$  表示输出信号平均值； $\sigma$  表示  $\bar{V}_0$  的均方根偏差； $\bar{V}_0 + 2.6\sigma$  即可表示输出动态范围； $\bar{n}$  表示输入信号的平均计数率； $\tau_f$  表示输出信号以时间常数  $\tau_f$  衰减； $V_{OM}$  表示单个输出信号的幅度。该前置放大电路能量灵敏度为  $A_{CE} = 44\text{ mV}/\text{MeV}(\text{Si})$ ，动态范围为  $\sim \pm 11\text{ V}$ ，对于能量为  $1\text{ MeV}$  的射线来说，允许输入信号的平均计数率可达  $10^6$ 。该前放动态范围大于几款常用的商用低噪声前放：142 A、A250 和 A422A，也大于中国科学院近代物理研究所 (IMP) 核电子学组之前研制的电荷前放(动态范围  $0 \sim \pm 4\text{ V}$ )<sup>[8]</sup>，所以在输入能量相同的情况下，该前放可以允许较高的计数率，可应用到高输入能量、高计数率的实验当中。

### 2.2 主放大器设计

由于电荷灵敏前置放大器输出的脉冲幅度和波形并不适合后面分析测量设备的要求。所以对信号进一步放大成形，降低噪声，提高信噪比，从而适合后继电路的测量要求。

主放大器主要由极零补偿、滤波成形和放大三部分组成。基本的电路原理图如图 3 所示。

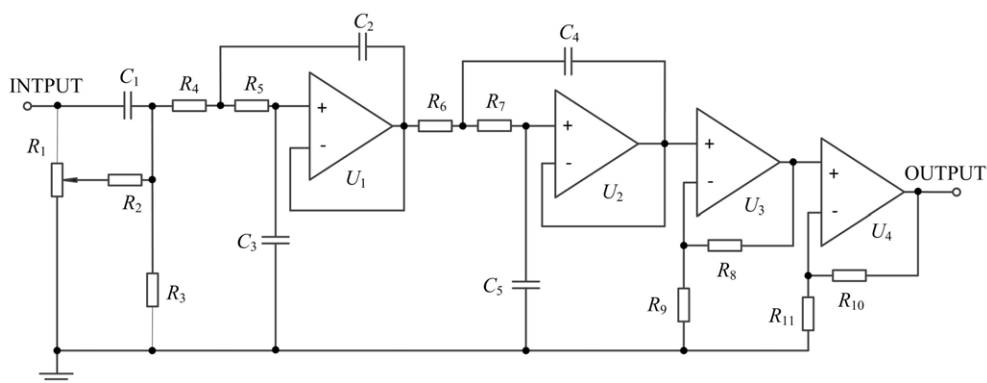


图 3 主放大器电路基本原理图

电路中的  $R_1$ 、 $C_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  构成极零补偿电路， $R_3$  和  $C_1$  是一个简单的微分电路，由于前放输出是一个后沿衰减的信号，经过  $RC$  微分后波形会产生一个下冲。由  $R_1$ 、 $C_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  构成的极零补偿电路可以抑制这种下冲，该电路的传递函数为

$$H(S) = \frac{V_0(S)}{V_i(S)} = \frac{S + \frac{1}{\tau_1}}{S + \frac{1}{\tau_2}}, \quad (2)$$

其中： $\tau_1 = R_2 C_1 / \alpha$ ， $\tau_2 = (R_2 // R_3) C_1$ 。通过调节  $R_1$  可以实现极零补偿，实现单极性脉冲输出。

经过极零补偿后的信号还不能直接用于后面的设备，必须通过滤波成形改善它的波形，在极零补偿电路后面加了两级积分电路，单级电路传递函数为

$$H(S) = \frac{\gamma^2}{S^2 + \beta\gamma S + \gamma^2}, \quad (3)$$

其中： $\beta = \sqrt{(R_5 C_3) / (R_4 C_2)} + \sqrt{(R_4 C_3) / (R_5 C_2)}$ ； $\gamma = 1 / \sqrt{R_4 R_5 C_2 C_3}$ 。该电路为 Sallen-Key 有源低通滤波电路<sup>[11]</sup>，这里使用了两级低通滤波，当  $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$ 、 $R_7$  相等，并且  $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$  相等时，可实现四阶积分的效果，从而得到对称性较好的准高斯波形。放大部分，设置了两级放大电路，实现信号幅度的放大。

### 2.3 单道脉冲幅度分析器设计

主放大器的输出信号进入单道脉冲幅度分析器，输出 TTL 逻辑脉冲，便于后端计数和分析。在满足实际应用需求的前提下，综合考虑成本，采用简单的电路结构来实现单道脉冲幅度分析器，其基本原理框图如图 4 所示。并且该前端电路集成了 4 路单道脉冲幅度分析电路。

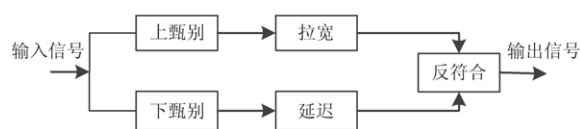


图 4 单道脉冲幅度分析电路基本原理框图

其中每一路的甄别电路由双电压比较器 LM393 组成，当输入信号幅度落在上下阈电平之间时有逻辑脉冲输出。实际工作中，由于输入脉冲信号具有一定的上升时间和下降时间，为了解决电路工作时序上的问题，需要拉宽上甄别器的输出脉冲并延迟下甄别器的输出脉冲，最后经过反符合电路达到要求。为了提高整个电路的工作速度，拉宽、延迟电路采用由快速器件 74HC221 构成的单稳态电路实现<sup>[12]</sup>。所设计的单道脉冲幅度分析器阈值范围为 10 mV~10 V，道宽范围为 ~10 V，输出 TTL 电平宽度在 100 ns~2 μs。

## 3 性能测试

### 3.1 电子学测试

为了满足便携式的要求，小型前端电路安装在直径为 50 mm 的圆形电路板上。

实验室利用精密脉冲产生器 ORTEC 419，完成前端电路各项性能指标的测试。其中前放噪声测试主要由 HP 公司生产的 3400B RMS VOLTMETER 实现。在相同的实验条件下，还测试了几款商用低噪声前放 (142 A, A250 和 A422A)，结果表明前端电路中前放的等效输入噪声最小。各项性能指标如下：

- (1) 等效输入噪声  $\leq 1.5$  keV；
- (2) 前积电荷灵敏度  $A_{CQ} = 1 \times 10^{12}$  V/C；
- (3) 前放能量灵敏度： $A_{CE} = 44$  mV/MeV(Si)；
- (4) 前放上升时间  $< 10$  ns；
- (5) 前放、主放输出动态范围： $\sim \pm 11$  V；
- (6) 在输出动态范围 (0 ~ ±11 V) 内积分非线性

性≤0.11%，如图 5 所示；

(7) 主放大器时间常数：1 μs/3 μs；

(8) 阈值范围：10 mV~10 V可调，道宽范围：~10

V；

(9) 输出脉冲：TTL电平，宽度范围：100 ns~2

μs。

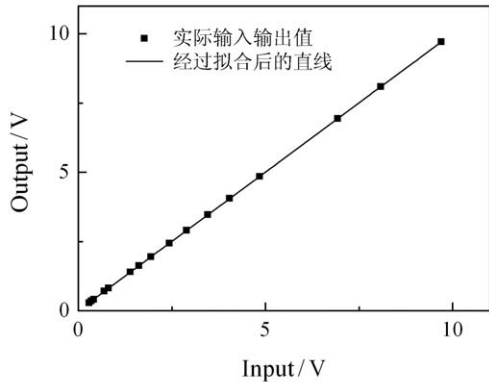


图 5 前放+主放的输入和输出峰值的线性拟合曲线

同时，我们还利用 ORTEC 419、小型前端路中前放和主放模块，以及 CAMAC 的 ADC 插件 (AD811) 搭建测试系统，如图 6 所示，进行电子学分辨测试。测试结果如图 7 所示，其中信号中心值位于 1544 道，统计误差为 0.813 43 道，所以得到前放和主放系统的本征分辨达到 0.12%。根据文献[13]，可以预计该系统可用于硅探测器信号的处理<sup>[14]</sup>。



图 6 小型前端电路测试框图(一)

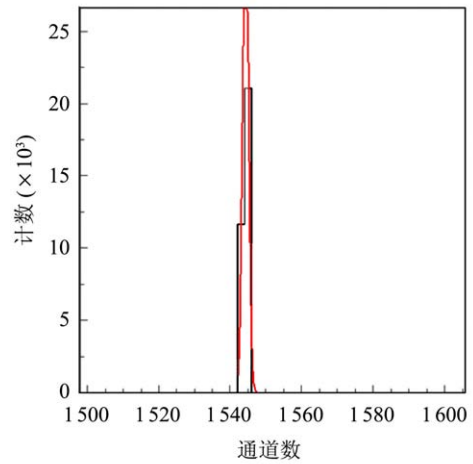


图 7 (在线彩图) 前放+主放电子学分辨

### 3.2 物理测试

(1) 利用 <sup>239</sup>Pu α源、IMP 自制的离子注入型硅探测器、小型前端电路和多道分析器 (ORTEC 926) 联合测试，其中小型前端电路使用前放模块和主放模块。

图 8(a) 为通过小型前端电路获得的<sup>239</sup>Pu α源的能谱，其中 5.157 MeV 能量峰经过高斯拟合后的中心值位于 1536.45 道，FWHM= 12.636 道，从而确定该峰的能量分辨率约为 0.82%，完全满足应用需求。

同时，我们将图 7 中的小型前端电路替换为商用仪器 142A 和 ORTEC 572，在其他条件不变的情况下，进行了对比测试，得到<sup>239</sup>Pu α源的能谱，如图 8(b) 所示。其中 5.157 MeV 能量峰经过高斯拟合后的中心值位于 1655.5 道，FWHM= 18.859 道，所以该峰的能量分辨率约为 1.14%，从而说明该小型前端电路达到了较好的噪声水平。

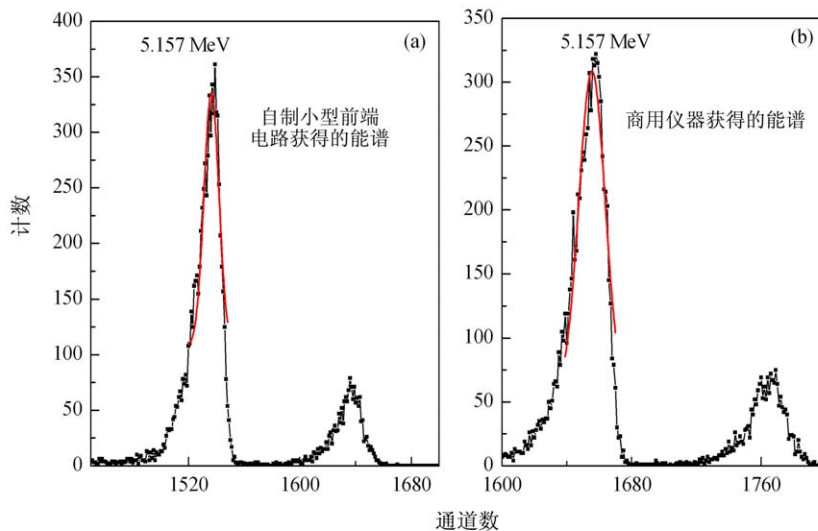


图 8 (在线彩图) <sup>239</sup>Pu α源能谱图

(2) 利用 $^{60}\text{Co}$ 源、自制碘化铯晶体、光电倍增管(PMT)、小型前端电路和定标器联合测试。其中小型电路使用主放模块和单道脉冲幅度分析模块。测试框图如图9所示。



图9 小型前端电路测试框图(二)

用 $^{60}\text{Co}$ 源对自制碘化铯晶体进行照射, PMT将光信号转换成电信号, 送入小型前端电路, 经处理后连接到ORTEC公司生产的定标器(Model 871), 记录输出脉冲个数。利用数据处理软件分析记录的脉冲数据, 得到 $^{60}\text{Co}$ 的 $\gamma$ 射线能谱, 如图10所示。由图10可知, 对于能量为1.332 MeV的 $\gamma$ 射线, 能量分辨率约为7.9%。目前, 该小型前端电路已经应用在IMP自行研制的便携式盐湖卤水铀、钍、钾快速测量仪的原型样机中, 达到了预期效果。这种便携式辐射测量仪, 可以实现特殊环境监测及放射性元素含量的分析。

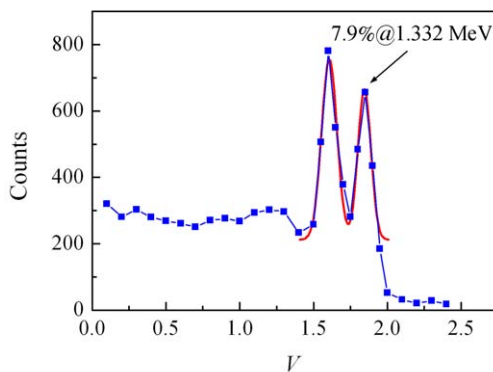


图10 (在线彩图) 通过小型前端电路获得的 $^{60}\text{Co}$ 源的 $\gamma$ 射线能谱

#### 4 总结与展望

本文设计的小型前端电路结构简单、动态范围大、集成度高、体积小、噪声低、输出信号上升时间快、稳定性好。相比于国内外同类型电路, 在低噪声的前提下, 一定程度上增加了其动态范围, 但是造价远低于国外同类型电路。实验测试结果表明, 该小型前端电路性能良好, 可广泛用于光电倍增管、电子倍增器以及半导体探测器信号的处理。今后, 根据需要, 可继续发展改进电路, 研制多道分析电路代替目前小型前端中的单道分析电路, 增强系统实时数据处理能力。

#### 参考文献:

- [1] WANG Zhiying, LOU Binqiao, ZHU Junjie, *et al.* Principles of nuclear electronics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1989: 34. (in Chinese)  
(王芝英, 楼滨乔, 朱俊杰, 等. 核电子技术原理[M]. 北京: 原子能出版社, 1989: 34.)
- [2] GAO Jinzhan, Detection of weak signal[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 41. (in Chinese)  
(高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 41.)
- [3] LI Yulan. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1999, **19**(6): 441. (in Chinese)  
(李玉兰. 核电子学与探测技术. 1999, **19**(6): 441)
- [4] WANG Jingjin, FAN Tianmin, *et al.* Nuclear Electronics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1985: 122. (in Chinese)  
(王经理, 范天民, 钱永庚, 等. 核电子学[M]. 北京: 原子能出版社, 1985: 122)
- [5] The homepage of ORTEC. [2013-11-28]. <http://www.ortec-online.com>.
- [6] The homepage of AMPTEK. [2013-11-28]. <http://www.amptek.com/a250.html>
- [7] The homepage of CAEN. [2013-11-28]. <http://www.caen.it>
- [8] SU Hong, ZHOU Bo, LI Xiaogang, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2003, **23**(2): 105. (in Chinese)  
(苏弘, 周波, 李小刚, 等. 核电子学与探测技术, 2003, **23**(2): 105)
- [9] The homepage of Texas Instruments. [2013-11-29]. <http://www.ti.com.cn/product/cn/th4011>
- [10] DENG Zhi, LIU Yinong, CHENG Jianping, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, **26**(6): 801. (in Chinese)  
(邓智, 刘以农, 程建平, 等. 核电子学与探测技术, 2006, **26**(6): 801.)
- [11] LI Dong, YANG Lei, TIAN Yong, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, **28**(3): 563. (in Chinese)  
(李东仓, 杨磊, 田勇, 等. 核电子学与探测技术, 2008, **28**(3): 563.)
- [12] CHEN Yu, MA Chengxing, XING Jiangfeng, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2000, **2**(1): 10. (in Chinese)  
(陈羽, 马成兴, 邢江峰, 等. 核电子学与探测技术, 2000, **2**(1): 10)
- [13] YUAN Xiaohua, HU Rongjiang, WANG Hongwei, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005 **25**(3):259. (in Chinese)  
(袁小华, 胡荣江, 王宏伟, 等. 核电子学与探测技术, 2005 **25**(3): 259)
- [14] LI Zhankui, GONG Wei, TAN Jilian, *et al.* Nuclear Physics Review, 2011, **28**(3): 49. (in Chinese)  
(李占奎, 巩伟, 谭继廉, 等. 原子核物理评论, 2011, **28**(3): 49.)

## Design of a Low Noise, Wide Dynamic Range and Small Dimension Front-end Circuit

SUN Wen<sup>1,2</sup>, QIAN Yi<sup>1</sup>, SU Hong<sup>1</sup>, DONG Chengfu<sup>1</sup>, ZHAO Xingwen<sup>1,2</sup>,  
WANG Xiaohui<sup>1,2</sup>, LI Xiaogang<sup>1</sup>, MA Xiaoli<sup>1</sup>, YANG Haibo<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** A small dimension front-end circuit with low noise and wide output dynamic range is introduced in this paper. The front-end circuit is made up of a charge sensitive preamplifier, a shaping circuit and a single channel pulse height analyzer. The equivalent input noise is under 1.5 keV. The output integral nonlinearity is less than 0.11% within the dynamic range of  $0 \sim \pm 11$  V. And the circuit can be suitable for different conditions by different modules. The resolution was about 0.12% with the charge sensitive preamplifier and the main amplifier. The energy resolution of 0.82% was achieved for 5.157 MeV  $\alpha$ -rays from a  $^{239}\text{Pu}$  source with the charge sensitive preamplifier, the main amplifier and anion-injection silicon detector designed by the Institute of Modern Physics(IMP). An energy resolution of 7.9% was achieved for 1.332 MeV  $\gamma$  rays from a stationary  $^{60}\text{Co}$  source with the main amplifier, the single channel pulse height analyzer and a CsI scintillator detector designed by the IMP. The front-end circuit has the features of wide output dynamic range, simple structure, high level of integration, small dimensions, low noise, fast rise time of the output pulse and excellent stability. The front-end circuit can be applied to signal processing of semiconductor detectors, photomultiplier tubes and electrons multiplier. And the front-end circuit had been applied to a prototype of the portable rapid measuring instrument designed by IMP for measuring Uranium, Thorium and Potassium in the salt lake brine with good test result.

**Key words:** low noise; wide dynamic range; small dimension; front-end circuit

---

**Received date:** 6 Jun. 2014; **Revised date:** 18 Jul. 2014

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(11475233, 11305233)

**Corresponding author:** SU Hong, E-mail: suhong@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>