

一种电荷灵敏前置放大器的设计与实现

王佳帅¹, 秦 晋¹, 许 鹏¹, 卜洪涛², 王道平¹

(1. 火箭军工程大学, 陕西 西安 710025;

2. 西安中核仪器股份有限公司, 陕西 西安 710061)

摘 要: 针对传统金硅面垒 α 谱仪所使用的电荷灵敏前置放大器存在电路结构复杂、损坏后维修周期长的问题, 基于低噪声场效应管和集成运算放大器, 使用电路仿真软件, 设计了针对金硅面垒半导体探测器的电荷灵敏前置放大器, 简化了电路结构。对该前置放大器参数进行了理论计算和实验测试。结果表明: 自制的电荷灵敏前置放大器的电荷变换增益为 5×10^{12} V/C, 能量变换增益为 222 mV/MeV, 上升时间为 200 ns; 将其应用于金硅面垒 α 谱仪之中, 能够测量 ^{239}Pu 板状源的 α 能谱。

关键词: 电荷灵敏前置放大器; 金硅面垒探测器; 电路仿真; α 能谱

中图分类号: TN722.7

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)03-074-007

Design and Implementation of a Charge Sensitive Preamplifier

WANG Jiashuai¹, QIN Jin¹, XU Peng¹,

BU Hongtao², WANG Daoping¹

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi;

2. Xi'an CNNC Nuclear Instrument Co. Ltd, Xi'an 710061, Shaanxi)

ABSTRACT: To cover shortages of the charge sensitive preamplifier used in the existing Au-Si surface barrier alpha spectrometer, such as complex circuit structure and long maintenance cycle after damage, a charge sensitive preamplifier for gold silicon surface barrier semiconductor detector was designed based on low noise field effect transistor and integrated operational amplifier. The proposed preamplifier was designed with circuit simulation software and its simpler circuit structure. Furthermore, parameters of the charge sensitive preamplifier was obtained by theoretical calculation and verified by experimental tests. Results showed that the charge conversion gain of the self-made charge sensitive preamplifier is 5×10^{12} V/C, energy conversion gain is 222 mV/MeV and rise time is 200 ns. When it was applied to the Au-Si surface barrier α spectrometer, it can measure the α energy spectrum of ^{239}Pu plated source.

KEYWORDS: charge sensitive preamplifier; Au-Si surface barrier detector; circuit simulation; α spectrum

目前, α 射线探测常用的核辐射探测器为闪烁体探测器和半导体探测器。其中, 闪烁体探测器为 ZnS (硫化锌) 闪烁体, 但受制于能量分辨率,

一般仅根据脉冲幅度进行计数测量。为有效扣除干扰射线的影响, 需对 α 能谱进行测量, 从而分析核素种类^[1]。而用于 α 能谱测量的半导体探测器具

收稿日期: 2024-03-31

第一作者: 王佳帅 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事核辐射探测技术研究。E-mail: phoenix0515@qq.com

引用格式: 王佳帅, 秦晋, 许鹏, 等. 一种电荷灵敏前置放大器的设计与实现[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (3): 74-80.

有能量分辨率高、性能稳定、探测效率高、体积小以及价格便宜等优势, 被广泛应用^[2]。 α 能谱测量通常使用平面型半导体探测器, 如金硅面垒、钝化注入平面硅 (Passive Implanted Planar Silicon, PIPS) 等探测器^[1]。其中, 金硅面探测器由于其优良的能谱特性和时间特性, 在重带电粒子 (如 α 粒子) 测量中得到了极好的应用^{[3][13]}。

由于核辐射探测器输出的信号极其微弱, 需要进行放大才能用于后续电路。一般采取前置放大器加上主放大器的两级放大模式。其中, 前置放大器的作用有: 一个是将核辐射探测器微弱的信号进行初步放大, 并实现阻抗匹配, 便于传输给后续电路; 另一个是提高信噪比, 减少外界干扰^{[3][16]}。由此可见, 前置放大器本身对输入阻抗、输出阻抗和噪声的要求较高。

电荷灵敏前置放大器作为前置放大器的一种, 能够将电荷信号转换为电压信号并初步放大, 多与半导体探测器配合, 用于高分辨率能谱测量。传统的金硅面垒 α 谱仪使用的探测器和前置放大器即为金硅面垒半导体探测器和电荷灵敏前置放大器。该电荷灵敏前置放大器采用分立元件, 电路结构复杂。在使用过程中发现其存在损坏后维修难度较大的问题, 重新购买或返厂维修又需要一定的时间。

本文针对以上问题, 设计了一种可以用于实验室的电荷灵敏前置放大器。选用集成运算放大器提高电路集成度, 选取低噪声场效应管提高输入阻抗和信噪比, 并降低对运算放大器的输入阻抗要求^[4]。

1 电路设计

1.1 整体设计

采用电路仿真软件改变了传统核电子学电路基于实验板开发的边设计、边搭建、边调试的设计模式, 能提高设计效率、减少设计风险、节约试验成本^[5]。国内外均已出现使用电路仿真软件对电荷灵敏前置放大器进行仿真的实例^[5-7]。

所设计的电荷灵敏前置放大器整体电路如图1所示。其中, 从左至右依次为第1级到第4级。

第1级为输入级, 主要元器件为低噪声场效应管 Q1。电位器 R3 和 R2 用来调节静态工作点, 以使得场效应管栅极电压接近于零偏压, 此时场效应管跨导大, 噪声性能好^{[8][112]}。为增大开环增益, 需要增大输入级动态负载, 因此, 在 Q1 的漏极接上了电感负载。

第2级为放大级, 主要元器件为集成运算放大器 U1 (AD8065AR)。与传统的晶体管放大级相

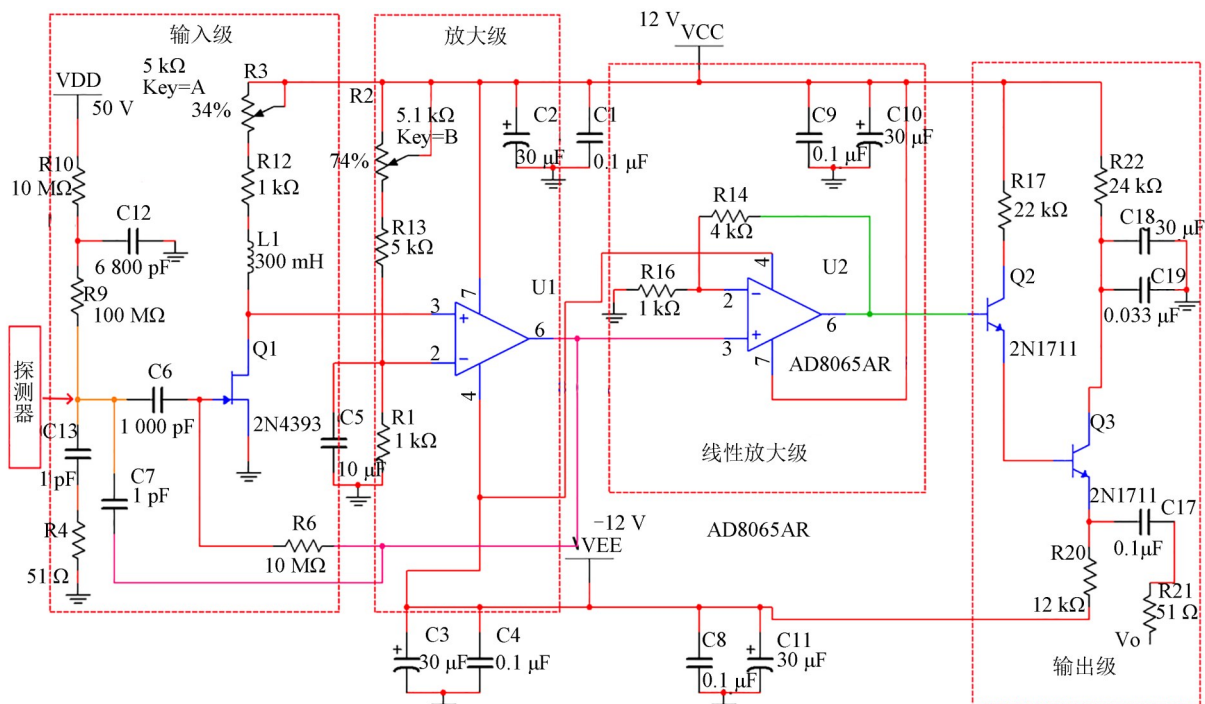


图1 电荷灵敏前置放大器整体电路

Fig. 1 Overall circuit of the charge sensitive preamplifier

比, 结构大大简化。反馈网络为 R6 和 C7。其中: 反馈电阻 R6 为泄放电阻, 其值应当较大, 以减小自身对噪声的贡献和减少电荷泄放^[9]; C7 为反馈电容, 为了提高转换增益, C7 取值为 1 pF。放大级和输入级组合在一起, 通过反馈电容 C7 进行反馈, 就构成了电荷灵敏级, 实现的是电荷灵敏前置放大器的功能。

第 3 级是线性放大级, 主要元器件是集成运放 U2 (AD8065AR), 采用同相输入, 放大倍数为 5。由于电荷灵敏级输出的电压信号依然较小, 所以采用线性放大使得电路的输出信号的幅度进一步增大。

第 4 级是输出级, 主要元器件是晶体管 Q2、Q3, 直接耦合为两级射极跟随器, 增强了电路的带负载能力, 同时放大倍数接近于 1。

1.2 主要元器件选择

输入级的场效应管应满足低噪声、高输入阻抗的要求。经查找资料, 初步确定为 2N4393^{[8]112}。仿真中的集成运算放大器选用 AD8065^[9], 它的封装是 SOP8 贴片形式。为了实际电路调试方便, 以及前级的 2N4393 场效应管已具有很高的输入阻抗和良好的高频特性, 对运算放大器的要求不高, 因此, 实际电路选用 DIP8 双列直插运算放大器 LM6264。它的价格低于 AD8065, 同样具有高速、低噪声、高带宽的特点, 其增益和输入阻抗虽与 AD8065 差距较大, 但输入级的场效应管降低了运算放大器的输入阻抗要求^[4], 其增益也足够。

在实际电路, 输出级的晶体管选用高性能的国产晶体管 3DG11F。由于该电路仿真软件中没有 3DG11F, 仿真中选用的是同样具有低噪声、高性能的替代晶体管型号 2N1711。反馈电容选用高压陶瓷材料、并且温度系数接近于 0 的温度不敏感电容^[9], 这种电容的介质极其稳定, 而且不会老化, 损耗因数不会随着电压、频率、温度和时间的变化而变化, 非常适合在高频、超高频和对稳定性有严格要求的电路中使用。反馈电阻选用精密度较高的金属膜电阻, 这种电阻的热噪声相对较小。

2 仿真测试及制作

2.1 仿真信号源

电路仿真软件不能直接提供核辐射探测器, 因此, 需要加入仿真信号源来模拟金硅面垒探测器的输出信号。对前置放大器来说, 半导体探测

器相当于一个脉冲电流源, 由放射源产生的电流信号可以用脉冲电流源来模拟。选用上升时间和下降时间均为 5 ns、脉冲宽度为 50 ns, 幅度为 4 μ A 的矩形负脉冲来模拟探测器的输出, 对应的电荷为 2.2×10^{-13} C 或能量为 5 MeV 的 α 粒子入射到金硅面垒探测器中产生的电荷^[5]。等效电路如图 2 所示。

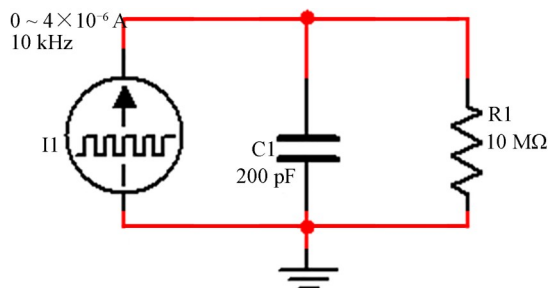


图 2 金硅面垒探测器等效输出电路

Fig. 2 Equivalent output circuit of Au-Si surface barrier detector

C1 为辐射探测器结电容与连接导线的分布电容之和。探测器结电容的值主要与材料、偏压和探测器面积有关, 50 V 偏压下 $\Phi 20$ 的金硅面垒探测器结电容约为 200 pF; 而分布电容一般很小, 只有几个 pF。因此, C1 取值为 200 pF^[5]。R1 为偏压电阻, 设置为 10 MΩ。电流源 I1 的频率设置为 10 kHz、占空比为 0.05%, 就能够得到 50 ns 的脉冲宽度。

2.2 仿真结果

在图 1 的仿真电路中加入仿真信号源, 对电路进行仿真测试。采用四通道示波器观察探测器输出 (通道 A)、电荷灵敏级输出 (通道 B)、线性放大级输出 (通道 C) 以及输出级的最终输出 (通道 D)。所有通道耦合方式全部采用直流, 以确保观察到直流分量。结果如图 3 所示。

由图 3 (a) 可以看出: 电荷灵敏级的输出为正极性脉冲, 探测器输出脉冲幅度为 μ V 级别, 因此通道 A 几乎没有显示脉冲; 通道 B、C、D 信号重叠的原因是通道 C 的脉冲幅度是通道 B 的 5 倍, 而且纵轴刻度也是通道 B 的 5 倍; 通道 D 是输出级的输出, 幅度基本不变, 而且纵轴刻度与通道 C 相同。

由图 3 (b) 可以观察到脉冲幅度约为 182 mV, 经过线性放大级后幅度变为约 893 mV, 放大了约 5 倍, 最后从输出级输出时幅度略有变小。从仿真结果来看, 基本实现了电荷灵敏前置放大

器的功能。

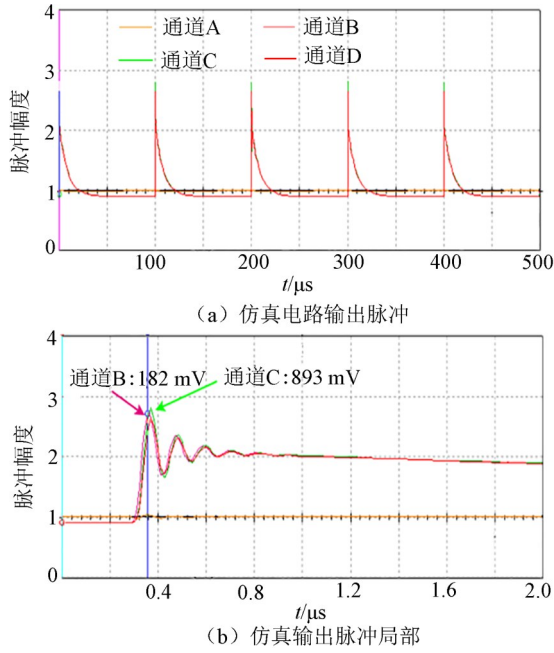


图 3 仿真测试结果

Fig. 3 Results of simulation test

2.3 电路制作

根据仿真电路, 制作的电荷灵敏前置放大器实物电路及其结构如图 4 所示。

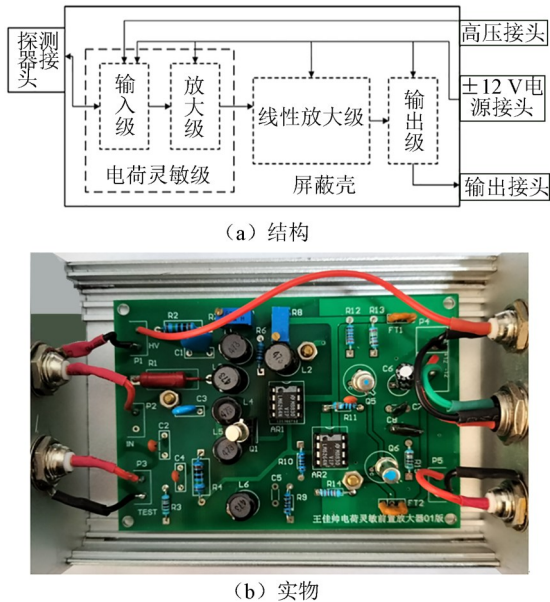


图 4 自制的电荷灵敏前置放大器结构

Fig. 4 Structure of the self-made charge sensitive preamplifier

实际电路中的高压由电路板右端接入, 通过

导线引到电路板左端, 目的是使偏压模块远离电荷灵敏级, 以免高压对信号产生影响。另外, 在实测时为了防止自激振荡, 给 R11 并联了一个 1 pF 的电容。为了减少外界电子的干扰, 需要对电路板增加屏蔽壳。输入级场效应管通过排座接入, 这样可以避免焊接电路板时烙铁所带的静电将输入级的场效应管损坏, 在其损坏时又便于更换。集成运算放大器采用芯片座固定, 同样在损坏时便于更换。

3 性能参数与测试

3.1 理论计算

3.1.1 电荷变换增益

电荷灵敏级实现的是电荷灵敏前置放大器的功能, 电荷灵敏级的电荷变换增益 A'_{cQ}

$$A'_{cQ} = \frac{V'_{oM}}{Q} \approx \frac{1}{C_f} = 1 \times 10^{12} \text{ V/C} \quad (1)$$

式中: V'_{oM} 为电荷灵敏级的输出脉冲幅度^{[8]115}; Q 为输入信号产生的电荷量; C_f 是反馈电容 (对应图 1 中的 C7)。

电荷灵敏级之后加入了线性放大级, 若按照电荷变换增益的严格定义, 则

$$A_{cQ} = \frac{V_{oM}}{Q}$$

式中: A_{cQ} 为整个电荷灵敏前置放大器的电荷变换增益; V_{oM} 为其输出脉冲幅度。由式 (1) 可得 $Q = V'_{oM} \cdot C_f$, 而 $V_{oM} / V'_{oM} \approx 5$, 因此, $A_{cQ} = 5 \times 10^{12} \text{ V/C}$ 。可见, 加入线性放大级可以使电荷变换增益增大相应的倍数。

3.1.2 能量变换增益

金硅面垒探测器加上电荷灵敏级的能量变换增益 A'_{cE} 为

$$A'_{cE} = \frac{Q/C_f}{E} = \frac{\frac{E}{\omega} e}{C_f \cdot E} = \frac{e}{C_f \omega}$$

其中: E 为入射 α 粒子的能量; ω 为硅半导体的平均电离能; e 为电子电量^{[8]115}。当 $C_f = 1 \text{ pF}$ 时, 对于硅探测器, $\omega = 3.62 \text{ eV}$ ^[5], 可计算得到能量变换增益 $A'_{cE} \approx 44.2 \text{ mV/MeV}$ 。

同样, 经过线性放大级之后, A_{cE} 为金硅面垒探测器加上整个电荷灵敏前置放大器的能量变换增益, 有

$$A_{cE} = \frac{V_{oM}}{E} = \frac{5V'_{oM}}{E} = 5A'_{cE} = 221 \text{ mV/MeV} \quad (2)$$

由式(2)得,对于5 MeV的 α 粒子,电荷灵敏级的输出脉冲幅度应为221 mV左右,而最终输出的幅度应为1.1 V左右。图3的仿真测试模拟的是5 MeV的 α 粒子入射结果,可知:电荷灵敏级输出脉冲幅度约为182 mV,小于221 mV的理论值;线性放大级的输出脉冲幅度约为893 mV,小于1.1 V的理论值。出现该误差的原因在于:反馈电阻 R_f 为无穷大时,对于电荷为 2.2×10^{-13} C或能量为5 MeV的 α 粒子,电荷灵敏级输出脉冲幅度 $V'_{om} = Q/C_f = 220$ mV^[5];而电路中设置的反馈电阻 R_f (对应图1中的R6)为10 M Ω ,并非无穷大,造成反馈电容上累积的电荷被泄放,导致电荷灵敏级的输出脉冲幅度变小。

而本文电荷灵敏级182 mV的输出脉冲幅度与文献[5]的187 mV相吻合,而且线性放大级将其幅度放大到893 mV,确实放大了约5倍,说明仿真是可行的。

3.2 实验测试

3.2.1 输出信号测量

输出信号的测量系统结构如图5所示。

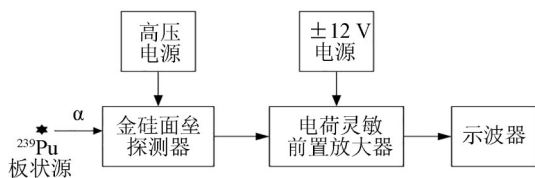


图5 输出信号测量系统结构

Fig. 5 Structure of output signal measurement system

采用电镀的 $\Phi 20$ 板状 ^{239}Pu 放射源产生 α 粒子。该 ^{239}Pu 板状源的活度为 4.99×10^5 表面粒子数/($2\pi \cdot \text{分}$)，标定日期为1983年6月，编号为82-89。由于 ^{239}Pu 的半衰期很长,约为24 110 a,因此,可以认为活度没有改变。除示波器和自制的电荷灵敏前置放大器外,其余插件均采用北京核仪器厂生产的插件。 $\Phi 20$ 的金硅面垒探测器固定在FH-445A型 α 室温探头架之中,经探测器内部的引出线通过同轴电缆插座直接与电荷灵敏前置放大器的插头相连接。为探测器提供偏压的高压电源和为前置放大器提供工作电压的 ± 12 V低压电源均由BH1324多道供给。示波器采用普源(RIGOL)公司生产的DS1204B型四通道示波器,该示波器带宽为200 MHz,采样率为 2×10^9 样本数/s,能够满足核信号宽带宽及随机性强的要求。将 ^{239}Pu 板状源放入探头架中,距离金硅面垒探测器入射窗表面约0.5 cm,设置高压电源为50 V,测试得

到电荷灵敏前置放大器输出信号如图6所示。

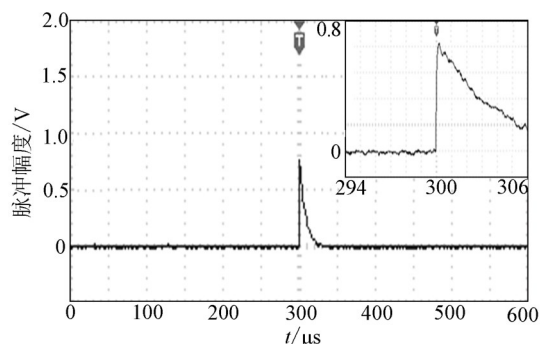


图6 电荷灵敏前置放大器输出信号

Fig. 6 Output signal of the charge sensitive preamplifier

由图6可以看出,输出正极性信号的幅度为780 mV,由此推算出电荷灵敏级的输出电压幅度应为156 mV左右,按照能量变换增益推算出入射到金硅面垒探测器中的 α 粒子能量约为3.5 MeV。这与 ^{239}Pu 放出5.1 MeV的 α 射线能量不符。造成误差的主要原因在于: α 粒子的电离性很强,而且放射源与探测器之间存在空气, α 粒子在空气中的射程较短,入射到探测器之前就已经损失了相当一部分能量;另外,源的自吸收和探测器窗的存在都会使 α 粒子损失能量。

调节示波器参数,从局部放大信号可以看出输出信号的上升时间为200 ns。

3.2.2 α 能谱测量

在电荷灵敏前置放大器输出信号测量系统的基础上,增加线性放大器、多道分析器以及多道分析器配套的电脑软件,即可对 α 能谱进行测量。测量系统结构如图7所示。

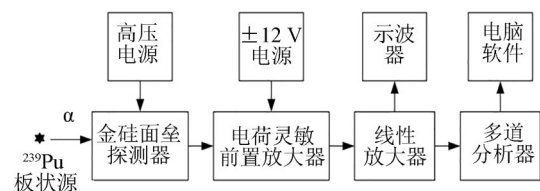


图7 α 能谱测量系统结构

Fig. 7 Structure of α spectrum measurement system

图7中,线性放大器为北京核仪器厂生产的BH1218型主放大器插件,其作用是将电荷灵敏前置放大器的输出信号进行放大和调节,以供多道分析器进行脉冲幅度分析。经过放大和调节后的信号如图8所示。多道分析器为AMPTTEK公司生产的MCA8000D型数字多道,配套的能谱软件用于设置多道分析器工作参数和能谱显示。

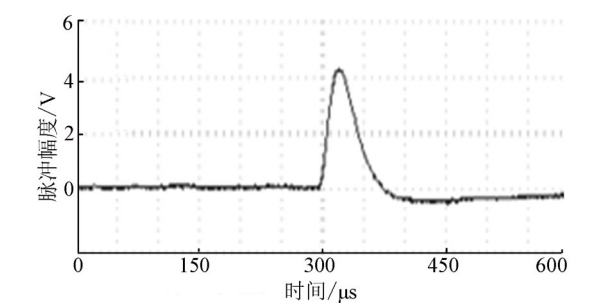


图 8 线性放大器输出信号
Fig. 8 Output signal of linear amplifier

设置多道分析器道数为 1 024 道，测得电镀的 Φ20 板状 ²³⁹Pu 的 α 能谱如图 9 所示。

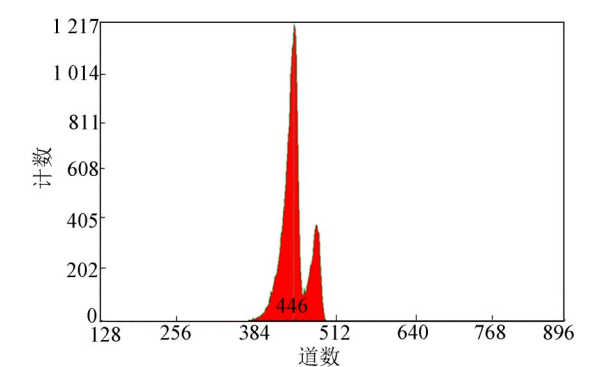


图 9 82-89 ²³⁹Pu 板状源的 α 能谱
Fig. 9 α spectrum of No.82-89 ²³⁹Pu plate-like source

从能谱图可以看到：446 道左右出现能量峰，带有明显的低能拖尾，表明自制的电荷灵敏前置放大器功能已经实现，可以应用于日常金硅面垒 α 谱仪的教学之中。另外，测得的 ²³⁹Pu 能谱中，在其能量峰的右侧还存在着一个能量峰。

Pu 同位素的 α 射线能量和强度如表 1 所示^[10]。由图 9 和表 1 可以看到，能谱中出现 2 个能量峰，推测原因是混入了少量的 ²³⁸Pu，右侧的峰源自其 5 499.03 keV α 射线的贡献。为了验证此推测，使用实验室现有的 Alpha Analyst 谱仪重新测试了编号 82-89 ²³⁹Pu 板状源的 α 能谱，如图 10 所示。

从图 10 可观察到：左侧峰的半高宽为 38.634 keV，峰位能量为 5 118.0 keV，对应 ²³⁹Pu 的 α 射线，3 种射线两两之间的能量差分别为 38.8 keV 和 21.29 keV，接近于或小于 38.634 keV 的峰位半高宽，因此在能谱中表现为 1 个峰；为 5 459.4 keV，恰好可以对应 ²³⁸Pu 的 α 射线。右侧峰中：5 357.7 keV 的射线相对强度只有 0.105%，在能谱中贡献的计数太少，而且会被淹没在低能拖尾之中，因此，能谱中没有显示；²³⁸Pu 剩余的 2 种 α 射线能量

差为 42.73 keV，略大于 37.020 keV，但不足以将这个 2 个能量峰分开，在能谱中也表现为 1 个峰。

表 1 Pu 同位素的 α 射线能量和强度^[10]
Tab. 1 Energy and intensities of α rays of Pu isotope^[10]

核素	半衰期/a	α 射线能量 /keV	相对强度/%
²³⁸ Pu	87.7	5 357.70	0.11
		5 456.30	28.98
		5 499.03	70.91
²³⁹ Pu	24 110	5 105.50	11.94
		5 144.30	17.11
		5 156.59	70.77
²⁴⁰ Pu	6 563	5 132.68	27.10
		5 168.17	72.80
²⁴² Pu	3.733×10 ⁵	4 858.20	23.40
		4 902.30	76.50
²⁴⁴ Pu	8.08×10 ⁷	4 546.00	19.40
		4 589.00	80.50

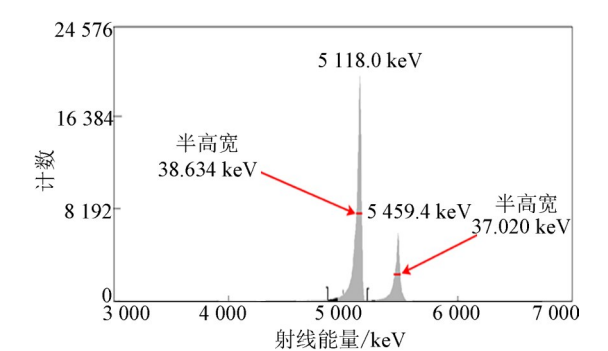


图 10 Alpha Analysis 谱仪测量的 82-89 ²³⁹Pu 板状源 α 能谱
Fig. 10 α spectrum of No.82-89 ²³⁹Pu plate-like source measured by Alpha Analysis spectrometer

其余 Pu 的同位素，α 射线能量均接近或低于 ²³⁹Pu 的 α 射线能量，不能在其右侧形成能量峰。至于长射程 α 粒子，其能量确实较高，但出现概率极小，强度极低，仅有总强度的 10⁻⁴~10⁻⁷^[11]，不足以在能谱中贡献明显的计数，因此，也排除了长射程 α 粒子的可能。

从测得的能谱也可以看出：编号 82-89 的 ²³⁹Pu 板状源的纯度不高；²⁴⁰Pu 的 α 射线能量与 ²³⁹Pu 的 α 射线能量接近，不能排除存在 ²⁴⁰Pu 的可能。

同理，²⁴¹Am 的 α 射线能量为 5 486 keV^[12]，同样接近于右侧能量峰的 5 459.4 keV，因此，也不

能排除 ^{241}Am 存在的可能。

4 结论

在研究与分析现有电荷灵敏放大器的基础上,设计了用于金硅面垒探测器的电荷灵敏前置放大器。采用低噪声场效应管降低输入噪声,并降低对运算放大器的要求;采用集成运算放大器简化电路;采用调节静态工作点和增加电感负载的方式进一步降低其噪声。而电路设计时采用了电路仿真软件,通过仿真验证了电路设计可行性,有效节省了时间成本,为电路设计提供依据并为电路测试提供指导。在电路制作时,核心元器件采用芯片座和排座固定,损坏时便于更换,降低了维修难度。

经过测试,制作的电荷灵敏前置放大器能够应用于日常金硅面垒 α 谱仪的教学之中。对编号 82-89 的 ^{239}Pu 板状源 α 能谱测量结果表明,该源并非纯 ^{239}Pu α 源。推测其中存在 ^{238}Pu , 并且不排除 ^{240}Pu 与 ^{241}Am 存在的可能。

参考文献:

- [1] 辛杰, 杨悦, 尤思梅, 等. 小型 PIPS 探测头便携式 α 能谱仪设计[J]. 核电子学与探测技术, 2021, 41(6): 932-936.
XIN J, YANG Y, YOU S M, et al. The development of a portable α spectrometer based on small PIPS probe[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2021, 41(6): 932-936.
- [2] 丁卫撑, 王义, 王敏, 等. 金硅面垒型半导体探测器在 α 能谱测量中的应用研究[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(7): 844-847.
DING W C, WANG Y, WANG M, et al. The applied research of gold silicon surface barrier semiconductor detector in α -ray spectrum measurement[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, 32(7): 844-847.
- [3] 何亮. 双通道泵吸式 α 能谱测氡仪的设计[D]. 成都: 成都理工大学, 2018: 13, 16.
HE L. Study on alpha dual channel spectrum radon measurement with pump suction[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018: 13, 16.
- [4] 孙文遂, 张良, 文波, 等. 一种电荷灵敏前置放大器: CN219499352U[P]. 2023-08-08.
- [5] 刘良军. 基于 orCAD 的电荷灵敏前置放大器仿真设计[J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27(3): 425-427.
LIU L J. The simulation with orCAD for charge sensitive preamplifier designed[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007, 27(3): 425-427.
- [6] 张玲玲, 何资星, 郭凤丽. 用于 Si-PIN 探测器的小尺寸电荷灵敏前置放大器的设计[J]. 电子与封装, 2022, 22(12): 71-76.
ZHANG L L, HE Z X, GUO F L. Design of a small-size charge-sensitive preamplifier for Si-PIN detector[J]. Electronics & Packaging, 2022, 22(12): 71-76.
- [7] ATIEA H M, RASHID J M. Simulation of Charge Sensitive Preamplifier to improve Nuclear Pulse detecting using Multisim Software[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1999(1): 12125.
- [8] 王经瑾, 范天民, 钱永庚, 等. 核电子学[M]. 北京: 原子能出版社, 1983: 122, 115.
- [9] 苏杭, 封常青, 郑其斌, 等. 一种低噪声电荷灵敏前置放大器的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2015, 35(9): 857-860, 866.
SU H, FENG C Q, ZHENG Q B, et al. A low noise charge sensitive front-end readout circuit[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2015, 35(9): 857-860, 866.
- [10] 石睿. 半导体 Si 探测器 α 粒子能谱共性建模解析技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018: 121-122.
SHI R. Study on common modeling analytic technology of alpha particle spectra for semiconductor Si detector[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018: 121-122.
- [11] 卢希庭. 原子核物理[M]. 北京: 原子能出版社, 2000: 117.
- [12] MALMBECK R, BANIK N L, KERST T, et al. Alpha energy dependence of alpha induced liquid radioluminescence[J]. New Journal of Chemistry, 2021, 45(17): 7766-7773.