

双输出 SiPM 前置放大器设计与分析

龙 源^{1,2} 黄跃峰¹ 侯会良^{1,2} 陈永忠¹

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 为了适配闪烁体与硅光电倍增器(Silicon Photomultiplier, SiPM)耦合探测器的不同应用场景,设计了基于OPA855芯片的跨阻放大器(Transimpedance Amplifier, TIA)和电压反馈放大器(Voltage Feedback Amplifier, VFB)。理论设计上考虑了两类前置放大器的带宽和噪声问题,采用PSpice for TI软件仿真验证其可行性,并通过阶跃响应和噪声测量验证其性能参数。在室温条件下,采用SiPM耦合掺铈钆铝镓石榴石(Cerium-doped Gadolinium Aluminum Gallium Garnet, GAGG(Ce))探头对²⁴¹Am源进行系统测量。结果表明:跨阻放大器的带宽为101 MHz,低于电压反馈放大器的381 MHz,但其基线噪声 $\sigma_{\text{noise}} \approx 448.32 \mu\text{V}$ 优于电压反馈放大器的 $\sigma_{\text{noise}} \approx 680.96 \mu\text{V}$;电压反馈放大器和跨阻放大器分别满足GAGG(Ce)探头快输出脉冲上升沿时间(2 ns)和标准输出脉冲上升沿时间(20 ns)的带宽设计需求。两类前置放大器均可满足不同场景下对高带宽和低输入噪声的需求,并与SiPM不同的输出模式相匹配。受限于电路的固有噪声和SiPM的输入电容,设计的跨阻放大器适合于能量测量和小面积SiPM应用,而电压反馈放大器更适合时间测量和大面积SiPM阵列。

关键词 硅光电倍增器, 前置放大器, GAGG(Ce), 闪烁体探测器, 噪声

中图分类号 TL821

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240218

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240218

Preamplifier design and analysis for dual output silicon photomultiplier

LONG Yuan^{1,2} HUANG Yuefeng¹ HOU Huiliang^{1,2} CHEN Yongzhong¹

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] In order to apply in different scenarios of silicon photomultiplier (SiPM) coupled scintillator detector, preamplifiers need to fulfill different requirements. [Purpose] This study aims to design high-bandwidth, low-noise preamplifiers to adapt for different output modes of SiPM-coupled scintillator detector. [Methods] Based on OPA855 chip and consideration of bandwidth and noise, a transimpedance amplifier (TIA) and a voltage feedback amplifier (VFB) were designed. The amplifier circuits were simulated and analyzed using PSpice for TI software to obtain circuit parameters. Then, the signal response and noise baseline level were measured and analyzed by experimental test using ²⁴¹Am radioactive source and a sSiPM-coupled Cerium-doped Gadolinium Aluminum Gallium Garnet (GAGG(Ce)) detector. [Results] Experimental results show that these preamplifiers have good gain stability, high-bandwidth and low-noise. TIA's bandwidth is 101 MHz, lower than VFB's 381 MHz, but

国家自然科学基金(No.12075308, No.11775290)资助

第一作者: 龙源, 男, 1999年出生, 2022年毕业于成都理工大学, 现为硕士研究生, 研究领域为核测控技术

通信作者: 黄跃峰, E-mail: huangyuefeng@sinap.ac.cn

收稿日期: 2024-05-21, 修回日期: 2024-10-12

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12075308, No.11775290)

First author: LONG Yuan, male, born in 1999, graduated from Chengdu University of Technology in 2022, master student, focusing on nuclear measurement and control technology

Corresponding author: HUANG Yuefeng, E-mail: huangyuefeng@sinap.ac.cn

Received date: 2024-05-21, revised date: 2024-10-12

its baseline noise level ($\sigma_{\text{noise}} \approx 448.32 \mu\text{V}$) is better than that of the VFB's ($\sigma_{\text{noise}} \approx 680.96 \mu\text{V}$). **[Conclusions]** For GAGG(Ce) detector, both VFB and TIA meet the bandwidth design requirements of 2 ns for fast output pulse and 20 ns for standard output pulse, respectively. Limited by the inherent noise of circuits and the input capacitance of SiPM, TIA is suitable for energy measurements and small-area SiPM applications, while VFB is more suitable for time measurements and large-area SiPM arrays.

Key words Silicon photomultiplier, Preamplifier, GAGG(Ce), Scintillator detector, Noise

闪烁体探测技术在核探测领域的应用历史悠久。传统的闪烁体探测器由闪烁体和光电倍增管组成,并被广泛应用于粒子探测和核物理实验。目前,该项技术发展迅速,特别是各种无机闪烁体(如 CLLB(Ce)、GAGG(Ce)和 LYSO 等)以及基于硅的新型光电探测器^[1]。

硅光电倍增器(Silicon Photomultiplier, SiPM)是一种新型的光电探测器,具有高增益、低偏置电压、快速响应和结构紧凑等优点,在核医学(例如飞行时间正电子发射断层成像(Time-of-Flight Positron Emission Tomography, TOF-PET)、单光子发射计算机断层成像(Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT))、高能物理(高能粒子的时间标记)等领域应用广泛,并逐渐替代传统的光电倍增管^[2-5]。得益于其出色的时间特性,基于闪烁体/SiPM 探测器的时间测量技术发展迅速,对闪烁体和模拟电路的时间参数要求愈发严苛。此外,该类型探测器在伽马、中子等能量测量领域不断推广^[6]。探测器的时间分辨率和能量分辨率受到基线噪声的影响,其主要由前置放大器的噪声和 SiPM 噪声构成^[7]。因此,针对闪烁体与 SiPM 耦合探测器,研制相应的高速低噪声前置放大器十分重要。

掺铈钷铝镓石榴石(Cerium-doped Gadolinium Aluminum Gallium Garnet, GAGG(Ce))是一种新型闪烁体,具有光产额大、衰减时间短和发射峰契合 SiPM 等特点^[8-9]。而安森美公司的双输出 SiPM (MICROFJ-60035-TSV-TR)^[10]可以同时提供标准输出(Standard output, SOUT)和快输出(Fast output, FOUT)两种输出信号,具有优秀的定时性能和能谱性能。本文以 GAGG(Ce)与 MICROFJ-60035-TSV-TR 耦合的探头为例,设计了两种高速低噪声的前置放大器,分别为跨阻放大器(Transimpedance Amplifier, TIA)和电压反馈放大器(Voltage Feedback Amplifier, VFB),采用软件仿真验证了理论设计的正确性,并通过实验测试了前置放大器的阶跃响应、噪声水平和探头对 ²⁴¹Am 源的信号响应。

1 前置放大器的设计

MICROFJ-60035-TSV-TR 拥有 SOUT、FOUT 两

种输出接口,输出的信号各具特点,其输出电路如图 1(a)所示。SiPM 产生的光电流从阴极(Cathode)流向正极(Anode),产生振幅与入射光子速率成正比的信号,即 SOUT 输出信号,其可提供电流或电荷信息。而 FOUT 是一种交流耦合输出,不具有直流分量,其信号源自像素内部发生的快速开关脉冲。与 SOUT 不同,FOUT 上没有净电荷转移,其信号振幅与触发的像素数量成正比,可提供光子数量信息。此外,FOUT 的输出端电容 160 pF,小于 SOUT 的 4 140 pF,脉冲宽度仅为 3 ns,且无 SOUT 数百纳秒的长下降沿。因此,SOUT 常被用于能谱测量,而 FOUT 适用于快速定时应用。

针对 SiPM 输出信号的特点,前置放大器的设计需要满足高带宽和低噪声的要求。本文选择德州仪器公司(Texas Instruments, TI)的非完全补偿运算放大器 OPA855 进行设计。该芯片拥有 $2\,750\text{ V}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ 的高压摆率、 $0.98\text{ nV}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 的低输入电压噪声以及 8 GHz 的高增益带宽积。本文 SiPM 的供电方式与前置放大器的连接方式如图 1(b)、(c)所示。本节将从前置放大器的带宽和噪声角度分别设计跨阻放大器和电压反馈放大器。

1.1 跨阻放大器设计

本文的跨阻放大器采用图 2 的设计,其中: R_F 和 C_F 构成负反馈网络, R_{ISO} 为隔离电阻。

跨阻放大器的带宽是输入端总电容(C_S)、反馈电容(C_F)和运算放大器的增益带宽积(Gain-Bandwidth Product, GBP)的函数,其中: $C_S = C_D + C_{\text{CM}} + C_{\text{DIFF}}$ 。基于单极点运算放大器模型 $A(s)$ 推导出跨阻放大器的二阶闭环传递函数公式(1),并简化得到 $F_0 = \sqrt{Z_1 \times \text{GBP}}$, $Q = P_1/F_0$, $P_1 = 1/(2\pi \times R_F C_F)^{[11]}$ 。在直流时,因 $Z_F = R_F$ 和理想运放的开环增益无限大,式(1)中的 $A(s) = \infty$,导致闭环增益由 R_F 决定。

$$\frac{V_{\text{OUT}}}{I_{\text{IN}}} = \frac{-Z_F}{1 + (1 + Z_F/Z_G)/A(s)} \quad (1)$$

式中: $Z_F = R_F \parallel \frac{1}{s \times C_F} = \frac{1/C_F}{s + 1/(R_F \times C_F)}$; $Z_G =$

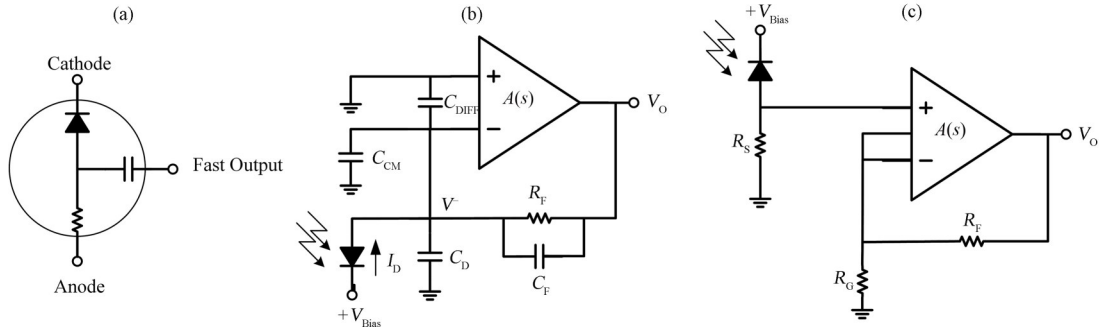


图1 (a) SiPM输出电路示意图, (b) 跨阻放大器, C_D 为 SiPM 的结电容, C_{CM} 和 C_{DIFF} 分别为运算放大器输入端的寄生共模电容和差分电容(包含杂散电容), (c) 电压反馈放大器, R_S 为负载电阻

Fig.1 (a) Diagram of SiPM output circuit, (b) Transimpedance amplifier, where C_D is junction capacitance, C_{CM} and C_{DIFF} are the parasitic common mode capacitance and differential capacitance of Op amp, (c) Voltage feedback amplifier, R_S is the load resistance

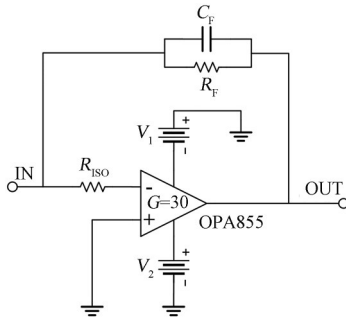


图2 跨阻放大器电路

Fig.2 Circuit of transimpedance amplifier

$$\frac{1}{s \times C_s}.$$

跨阻放大器的稳定性设计需要采用波特图分析,并绘制了噪声增益曲线 $\text{Gain}_{\text{Noise}} = 1 + Z_F/Z_G$ 和开环增益曲线,如图3所示。

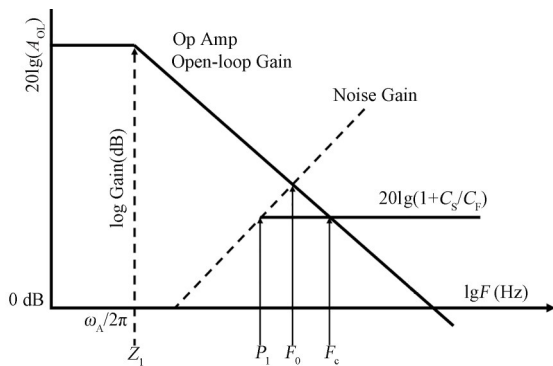


图3 带有开环增益曲线和噪声增益曲线的波特图

Fig.3 Bode plot with open loop gain curve and noise gain curve

根据 SiPM 的参数和 OPA855 的连续输入电流要求,设计跨阻放大器的跨阻增益($R_F=30 \Omega$)为: $\text{Gain}=20\lg(V_{\text{OUT}}/I_{\text{IN}})=20\lg(R_F)=29.54 \text{ dB}$ 。跨阻放大器要达到最大系统信号带宽,即 $Q=0.707$ 的 Butterworth 频响,需满足 $F_0 = F_{-3\text{dB}}$,并得到式(2),计

算得到最大带宽为 $F_{-3\text{dB}}^{\text{SOUT}} \approx 101 \text{ MHz}$ 。

$$\text{GBP} = 2\pi \times F_{-3\text{dB}}^2 \times R_F C_S \quad (2)$$

输入端总电容 C_S 和反馈电阻 R_F 会在噪声增益曲线上引入一个零点,导致开环增益曲线和噪声增益曲线相交处的净斜率为 40 dB/十倍频程 。由稳定性理论^[12]可知,这将造成系统的不稳定。要保证跨阻放大器稳定工作,需要添加反馈电容 C_F ,这将在噪声增益曲线中引入一个极点 P_1 ,并使噪声增益曲线变为 $20\lg(1 + C_S/C_F)$ 。其 C_F 的取值满足式(3):

$$C_F = \sqrt{\frac{C_S}{\pi \times R_F \times \text{GBP}}} \quad (3)$$

此外,对于非完全补偿运算放大器,存在其增益需大于最小稳定增益的要求,在高频下, C_F 的选取还需考虑 $\text{Gain} = 1 + C_S/C_F > 7 \text{ V/V}$ 。最终,得到跨阻放大器的反馈电容值为 $C_F^{\text{SOUT}} \approx 75 \text{ pF}$ 。

对于跨阻放大器的噪声考虑,德州仪器公司给出了一种简单的噪声模型,如图4所示,并得到等效输入参考噪声电流公式(4)^[10]:

$$i_{\text{EQ}} = \sqrt{(i_B)^2 + \frac{4kT}{R_F} + \left(\frac{e_N}{R_F}\right)^2 + \frac{(e_N \times 2\pi \times F \times C_S)^2}{3}} \quad (4)$$

式中: i_B 为反相输入端的电流噪声; k 为玻尔兹曼常数; T 为开尔文温度(298 K); R_F 为反馈电阻; e_N 为正相输入端的电压噪声; C_S 为反相输入端的总电容; F 为噪声积分频率上限。

OPA855 是一款拥有低输入电流噪声 $i_B=2.5 \text{ pA} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 、低输入电压噪声 $e_N=0.98 \text{ nV} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 的非完全补偿运算放大器。根据 $\sigma_{\text{noise}} = \sqrt{i_{\text{EQ}}^2 + i_{\text{SiPM}}^2} \times R_F \times \sqrt{F}$, 其中, i_{SiPM} 为 SiPM 输入的 RMS 噪声电流(本文不考虑),计算得到 25 °C 下跨阻放大器输出的 RMS 电压噪声为 $\sigma_{\text{noise}} = 448.32 \mu\text{V}$ 。

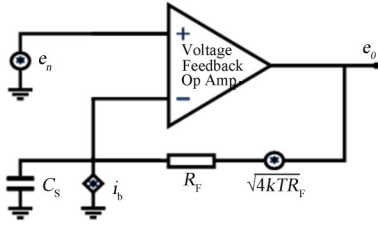


图4 跨阻放大器噪声模型

Fig.4 Noise modelling of transimpedance amplifier

$$e_{ni} = \sqrt{e_n^2 + (i_n R_s)^2 + 4kTR_s + [i_n (R_F \parallel R_G)]^2 + 4kT(R_F \parallel R_G)} \quad (5)$$

式中： e_n 和 i_n 分别为输入电压噪声和输入电流噪声。根据 OPA855 的噪声参数，计算得到 $e_{ni} = 1.37 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。因为放大器的噪声分布是分区域的，通过积分 $1/f$ 噪声区域、平坦带和滤波器效应区域，得到电压反馈放大器的基线噪声水平为 $\sigma_{\text{noise}} \cong 680.96 \mu\text{V}$ 。

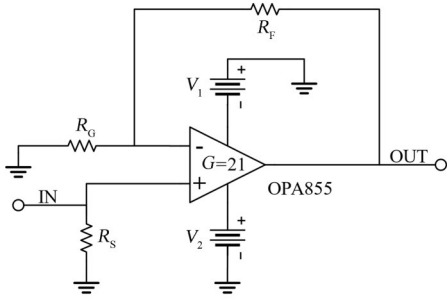


图5 电压反馈放大器电路

Fig.5 Circuit of voltage feedback amplifier

2 软件仿真验证

对于两种前置放大器的理论设计的正确性，采用电子电路软件进行仿真验证。Pspice for TI 软件^[16]是一款 Cadence 和 TI 联合推出的强大电路仿真软件，提供了内置库以满足复杂的混合信号设计。为了近似替代 SiPM 的输出信号，模拟信号源采用双指数脉冲并引入了 SiPM 内部自带的结电容 (MICROFJ-60035-TSV-TR 结电容为 4.14 nF)。基于 PSpice for TI 软件仿真，在图 4 和图 5 的电路基础

1.2 电压反馈放大器设计

为了满足 GAGG(Ce) 探头 2 ns 的信号上升时间要求，故设计放大器增益为 26.44 dB，即 $R_F = 1 \text{ k}\Omega$ ， $R_s = R_G = 50 \Omega$ ，如图 5 所示。此时，电路的闭环增益^[13] $G = V_{\text{OUT}}/V_{\text{IN}} = A/(1 + A\beta) \approx 10.5$ ，其中， A 为开环增益， $A\beta$ 为环路增益。根据 OPA855 的数据手册^[14]，计算得到前置放大器的带宽应为 381 MHz。

电压反馈放大器的输入噪声采用等效输入噪声模型^[15](式(5))进行估计：

上，进行时域瞬态分析、交流分析和 25 °C 下的噪声分析。软件仿真结果与理论计算相比，具有较好的一致性，如表 1 所示。

3 性能测试

3.1 阶跃响应测试

前置放大器的阶跃响应测试采用美国 SRS 公司 (Stanford Research Systems) 的 DG535 产生上升沿约为 2 ns、幅度为 81 mV 的阶跃信号。TIA 为 I - V 变换电路，其输入端信号须为电流信号，故串联 $R_G = 100 \Omega$ 电阻，简易地完成 81 mV 电压信号转换为 $I_{\text{IN}} = 810 \mu\text{A}$ 电流信号。图 6 给出了两款前置放大器的测试结果，在输入信号的 $\tau_{\text{rise}}^{10\% - 90\%} = 1.9 \text{ ns}$ 时，VFB 输出信号的 $\tau_{\text{rise}}^{10\% - 90\%} = 2.0 \text{ ns}$ ，闭环增益约为 10；而 TIA 得到 $\tau_{\text{fall}}^{90\% - 10\%} = 4.0 \text{ ns}$ ，闭环增益 $G = V_{\text{OUT}}/I_{\text{IN}} \approx -27.9$ 的输出信号，与理想闭环增益 $G = V_{\text{OUT}}/I_{\text{IN}} = -R_F = -30$ 相近。对此，采用 Pspice for TI 软件输入 $\tau_{\text{rise}}^{10\% - 90\%} = 1.9 \text{ ns}$ 的脉冲电流信号，得到 TIA 的输出信号为 $\tau_{\text{fall}}^{90\% - 10\%} = 3.65 \text{ ns}$ ，符合实验现象。

3.2 噪声测量

Williams 等^[17]给出了一种采用示波器近似测量 RMS 噪声的方法。为了降低外界噪声源对测试的影响，采用钢制屏蔽外壳并与系统接地相连，如图 7 所示。使用 WaveSurfer 104MXs 示波器测得前置放大器的峰-峰值电压分别为 $V_{\text{P-P}}^{\text{TIA}} = 3.2 \text{ mV}$ ， $V_{\text{P-P}}^{\text{VFB}} =$

表1 理论计算与仿真参数对比

Table 1 Comparison of theoretical calculation and simulation parameters

		上升/下降时间	RMS 噪声	-3 dB 带宽
		Rise or fall time / ns	RMS noise / μV	-3 dB bandwidth / MHz
理论计算	TIA	4.0	448.32	101.00
Calculation	VFB	1.0	680.96	381.00
仿真计算	TIA	4.5	507.42	119.00
Simulation	VFB	1.3	711.49	385.85

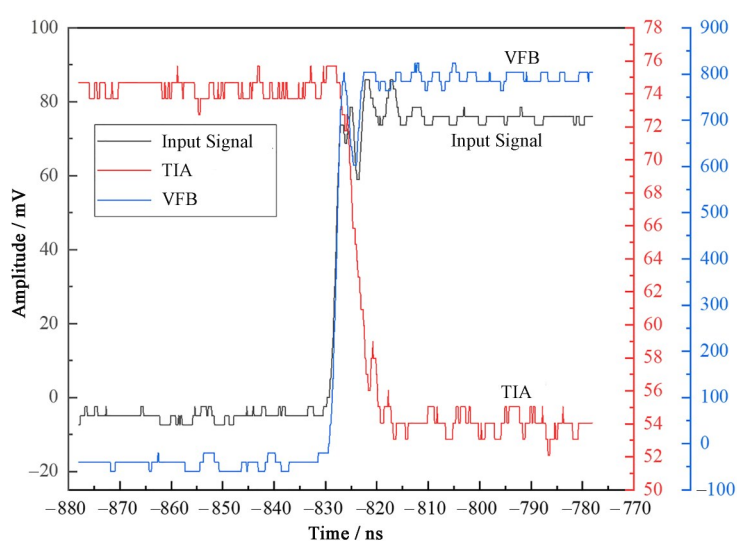


图6 信号响应测试
Fig.6 Test of signal response

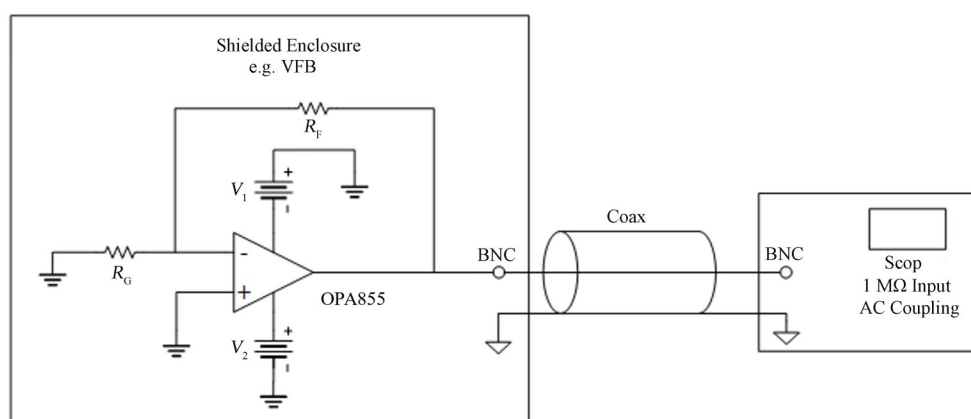


图7 噪声测量示意图
Fig.7 Diagram of noise measurement

4.8 mV。因此,计算得到对应的 RMS 噪声分别为 $V_{TIA} = 533 \mu\text{V}$ 和 $V_{VFB} = 800 \mu\text{V}$,与理论计算结果有较好的一致性。

3.3 ^{241}Am 源测试

测试系统由探头、前置放大器板和供电板组成,如图8所示。探头是 GAGG(Ce) 闪烁体和 SiPM 经过光学耦合组成,并置于长方体暗室中。TIA 和 VFB 两种接法各有对应的前置放大器板,都支持单双端电源供电和外部信号 PD 控制启停的功能。电源板提供 SiPM 的偏置电压和运算放大器的运行电压,其中,偏置电压源采用带温度漂移校正的小型智能程控 SiPM 电源^[18-19],运行电源采用集成超低噪声的 LDO 芯片 LM27762^[20]提供 $\pm 2.5 \text{ V}$ 。

使用 ^{241}Am 源对上述系统进行测试,得到图9的结果。标准输出信号有较快的上升沿,集中分布在

20~70 ns 之间并主要取决于闪烁体的光学特性。而其下降沿缓慢,时间主要由 SiPM 内部反向偏置二极管的电容 C_d 、淬灭电阻 R_q 和其寄生电容 C_p 决定^[21]。因此,常在前置放大器后增加极零相消电路,减少下降时间,达到减少信号堆积的目的。快输出信号的上升时间高达 2~7 ns,具有优秀的时间响应能力,下降时间主要受闪烁体的荧光衰减时间的影响。此外,该类型信号普遍存在下降沿不规整的现象,如图9(b)所示。该现象是闪烁体的量子效率、SiPM 的暗脉冲、后脉冲和光学串扰共同作用的结果^[22-23]。

结合理论和测试结果得出以下结论:闪烁体与 SiPM 耦合的探测器用于能量测量应采用标准输出模式和跨阻放大器的组合,并且关注下降时间和基线水平问题。快输出模式适用于时间测量,并且搭配电压反馈放大器可部署于大规模的 SiPM 阵列。

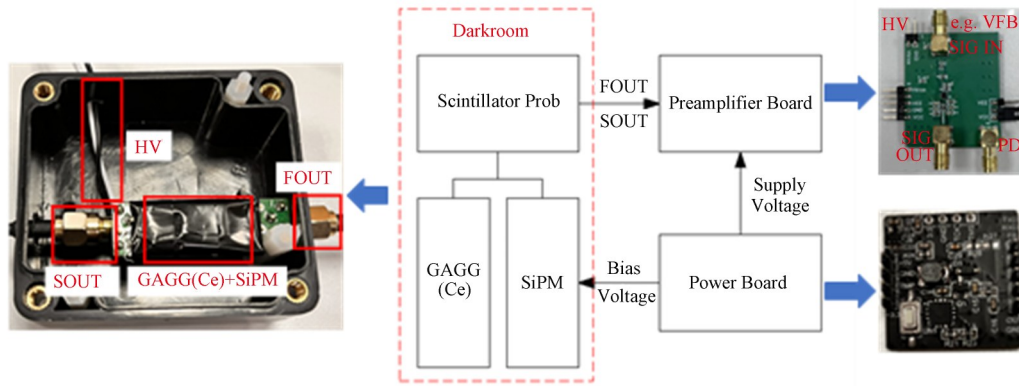


图8 测试系统的构成图
Fig.8 Component diagram of the test system

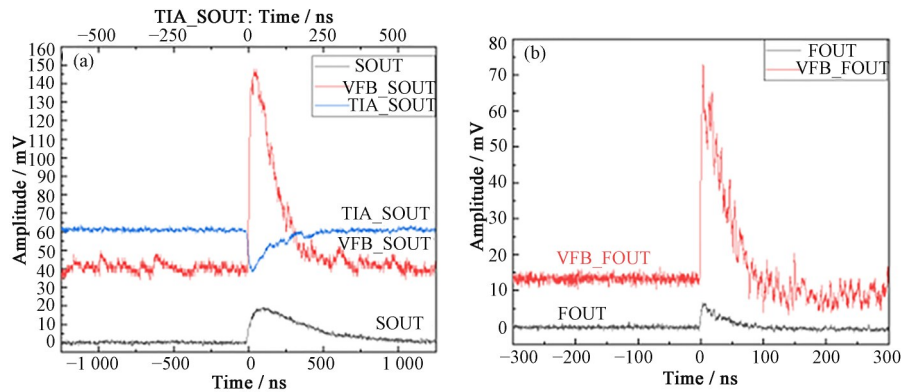


图9 (a) 标准输出信号, (b) 快输出信号
Fig.9 (a) Standard output signals, (b) Fast output signals

4 结语

本文基于 OPA855 芯片从带宽和噪声两个方面设计了两类前置放大器,适用于大部分 SiPM 应用场景。跨阻放大器因为其带宽受到输入端电容的影响,难以应用于大面积的 SiPM 阵列和时间测量,但可在高增益下提供较大的带宽和带入更少的电路噪声,十分适合于中高速闪烁体与 SiPM 耦合的探测器和微弱信号的探测。而电压反馈放大器的固有噪声较大,可以满足高达 2 ns 的快信号上升时间,配合 SiPM 不同的输出模式可应用于不同的时间测量场景。后续将基于这两种前置放大器和 GAGG(Ce) 晶体,设计出一种可同时兼顾能量测量和时间测量的探测器。

作者贡献声明 龙源负责设计实施,实验测试以及撰写论文;黄跃峰提供设计思想、实验资源及技术支持,并对文章进行审阅修改;侯会良、陈永忠提供实验指导及支持性贡献。

参考文献

- 1 Piller M, Castilla A M, Merzi S, *et al.* Performance evaluation of the FastIC readout ASIC with emphasis on Cherenkov emission in TOF-PET[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2024, **69**(11): 115014. DOI: 10.1088/1361-6560/ad42fe.
- 2 Gundacker S, Heering A. The silicon photomultiplier: fundamentals and applications of a modern solid-state photon detector[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2020, **65**(17): 17TR01. DOI: 10.1088/1361-6560/ab7b2d.
- 3 Li Y Y, Li C Y, Hu K. Design and development of multi-channel front end electronics based on dual-polarity charge-to-digital converter for SiPM detector applications [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, **34**(2): 18. DOI: 10.1007/s41365-023-01168-5.
- 4 Jia J Q, Jiang J L, Liang K, *et al.* EQR SiPM with P-on-N diode configuration[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, **30**(8): 119. DOI: 10.1007/s41365-019-0644-9.
- 5 He R, Niu X Y, Wang Y, *et al.* Advances in nuclear

- detection and readout techniques[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**: 205. DOI: 10.1007/s41365-023-01359-0.
- 6 Park C, Kim C, Kim J, *et al.* Performance comparison between ceramic Ce:GAGG and single crystal Ce:GAGG with digital-SiPM[J]. Journal of Instrumentation, 2017, **12** (1): P01002. DOI: 10.1088/1748-0221/12/01/p01002.
- 7 Wang X Y, Zhang H Y, Fang D Q, *et al.* Design and performance of a high-speed and low-noise preamplifier for SiPM[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34** (11): 169. DOI: 10.1007/s41365-023-01328-7.
- 8 Morishita Y, Yamamoto S, Izaki K, *et al.* Optimization of thickness of GAGG scintillator for detecting an alpha particle emitter in a field of high beta and gamma background[J]. Radiation Measurements, 2018, **112**: 1 – 5. DOI: 10.1016/j.radmeas.2018.02.003.
- 9 Wang Z, Guo H, Qian S, *et al.* Performance study of GAGG:Ce scintillator for gamma and neutron detection [J]. Journal of Instrumentation, 2020, **15**(6): C06031. DOI: 10.1088/1748-0221/15/06/c06031.
- 10 Onsemi Silicon Photomultipliers (SiPM), High PDE and timing resolution sensors in a TSV package J-series SiPM sensors[Z/OL]. [2024-01-20]. <https://www.onsemi.cn/download/data-sheet/pdf/microj-series-d.pdf>.
- 11 Carter B, Mancini R. Op amps for everyone[M]. 5th ed. Oxford, United Kingdom Cambridge, MA: Newnes, 2018.
- 12 Kay A. Operational amplifier noise: techniques and tips for analyzing and reducing noise[M]. Oxford, Waltham, MA: Newnes, 2012.
- 13 唐晨阳, 陈欣南, 高春宇, 等. SiPM耦合塑料闪烁体探测器放大电路设计[J]. 核技术, 2024, **47**(3): 030403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030403.
TANG Chenyang, CHEN Xinnan, GAO Chunyu, *et al.* Amplifier circuit for a silicon-photomultiplier-coupled plastic scintillator detector[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(3): 030403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030403.
- 14 OPA855 8-GHz gain bandwidth product, gain of 7-V/V stable, bipolar input amplifier[Z/OL]. [2024-01-20]. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa855.pdf?ts=1710826751310&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FOPA855.
- 15 Noise analysis in operational amplifier circuits[Z/OL]. [2024-02-26]. https://www.ti.com/lit/an/slva043b/slva043b.pdf?ts=1710834665721&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.bing.com%252F.
- 16 PSpice for TI design and simulation tool[CP/OL]. Texas Instruments and Cadence, [2024-03-11]. <https://www.ti.com/tool/PSPICE-FOR-TI>.
- 17 Williams L, Kay A. TI Precision Labs -Op Amps Noise-7 [Z/OL]. [2024-02-20]. <https://www.ti.com/content/dam/videos/external-videos/1/3816841626001/4080222545001.mp4/subassets/opamps-noise-measuring-system-noise-presentation-quiz.pdf>.
- 18 尹士玉, 陈鹏宇, 马丽双, 等. SiPM低压电源模块性能研究[J]. 核技术, 2019, **42**(9): 090403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.090403.
YIN Shiyu, CHEN Pengyu, MA Lishuang, *et al.* Study of the low voltage power module for SiPM[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(9): 090403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.090403.
- 19 侯会良, 黄跃峰, 程懋松, 等. 小型智能程控 SiPM 电源设计与验证[J]. 核技术, 2020, **43**(6): 060402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.060402.
HOU Huiliang, HUANG Yuefeng, CHENG Maosong, *et al.* Design and verification of small intelligent programmable SiPM power supply[J]. Nuclear Techniques, 2020, **43**(6): 060402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.060402.
- 20 LM27762 low-noise positive and negative output integrated charge pump plus LDO[Z/OL]. [2024-02-10]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm27762.pdf?ts=1710761826350>.
- 21 Bretz T, Hebbeker T, Kemp J. Extending the dynamic range of SiPMs by understanding their non-linear behavior[EB/OL]. 2020: 2010.14886. <http://arxiv.org/abs/2010.14886v1>.
- 22 Eckert P, Schultz-Coulon H C, Shen W, *et al.* Characterisation studies of silicon photomultipliers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, **620**(2 – 3): 217 – 226. DOI: 10.1016/j.nima.2010.03.169.
- 23 Nagai A, Alispach C, Barbano A, *et al.* Characterization of a large area silicon photomultiplier[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, **948**: 162796. DOI: 10.1016/j.nima.2019.162796.