

# SiPM 耦合塑料闪烁体探测器放大电路设计

唐晨阳 陈欣南 高春宇 李雨芃 王 晓 汤秀章

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 为了解决硅光电倍增器(Silicon Photomultiplier, SiPM)受环境噪声影响大的问题,设计了一款 SiPM 耦合塑料闪烁体探测器的信号放大电路。以 AD8014 放大芯片和 CR 电路构成负反馈选通放大电路,并且与 OPA657 跨阻式放大电路进行对比。该款电路以 RC 滤波输入部分和集成运算放大器构成信号放大电路,具有快上升时间及低输入噪声;以 CR 高通滤波电路作为比较器信号输入能够有效防止信号反射。实验结果表明:该信号放大电路能够有效滤除环境噪声,并且具备快上升时间。将该电路与塑料闪烁体探测器耦合,在室温下对  $^{137}\text{Cs}$  源进行暗噪声水平和输出信号一致性测量,其输出脉冲上升时间小于 12 ns,暗噪声水平低于 30 mV,优于跨阻式放大电路。

**关键词** SiPM, 塑料闪烁体, 电路信号仿真, 暗噪声与一致性测量

**中图分类号** TL821

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030403

## Amplifier circuit for a silicon-photomultiplier-coupled plastic scintillator detector

TANG Chenyang CHEN Xinnan GAO Chunyu LI Yupeng WANG Xiao TANG Xiuzhang

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** [Background] The silicon photomultiplier (SiPM) is sensitive to environmental noise, its performance is greatly affected by ambient noise. [Purpose] This study aims to design a negative-feedback selective amplifier circuit for SiPM coupled plastic scintillator detector to reduce the noise and improve the overall performance of SiPM. [Methods] It is compared with the traditional OPA657 transimpedance feedback amplifier circuit. The circuit consisted of an RC filter input and an integrated operational amplifier AD8014 with advantages of a high gain and low input noise. The CR high-pass filter circuit was used as the comparator signal input to further filter out signal noise and prevent signal reflection from interfering with the amplifier. The experimental circuit is simulated using Micro-cap12 to obtain the relevant circuit parameters. Finally, the dark noise level and signal consistency of a  $^{137}\text{Cs}$  source at room temperature was record, and performance of this amplifier circuit for SiPM coupled plastic scintillator detector was compared with that of the traditional OPA657 transimpedance feedback amplifier circuit. [Results and Conclusions] Comparison results show that the proposed circuit effectively filters out ambient noise and exhibits a fast rise time. The output pulse rise time is found to be less than 12 ns, and the dark noise level is observed to be less than 30 mV, which are better than those of the transimpedance amplifier circuit.

**Key words** SiPM, Plastic scintillator, Circuit signal simulation, Dark noise and consistency measurements

核能开发科研基金项目(No.HNKF202225(36))资助

第一作者: 唐晨阳, 男, 1999 年出生, 2021 年毕业于南华大学, 现为硕士研究生, 核技术及应用专业

通信作者: 汤秀章, E-mail: cloudu@sina.com

收稿日期: 2023-11-16, 修回日期: 2023-12-11

Supported by the Nuclear Energy Development and Research Fund (No.HNKF202225(36))

First author: TANG Chenyang, male, born in 1999, graduated from University of South China in 2021, master student, major in nuclear technology and applications

Corresponding author: TANG Xiuzhang, E-mail: cloudu@sina.com

Received date: 2023-11-16, revised date: 2023-12-11

硅光电倍增器(Silicon Photomultiplier, SiPM)具有许多传统光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)不可比拟的优势,比如低工作偏压(30~100 V)、快速响应能力等,已经在高能物理领域得到广泛的应用。塑料闪烁体作为常用探测材料,具有较短发光衰减时间(2~20 ns)以及良好的位置分辨率,可以根据需求制成 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 等各类粒子探测器<sup>[1]</sup>,常与SiPM耦合使用<sup>[2-4]</sup>。

然而,国内的相关研究通常只是将SiPM用于计数率测量,前置放大电路多选用跨阻放大器和较大反馈电容以降低噪声水平,导致输出波形上升时间变慢。而大面积探测器阵列不仅需要高计数率还有时间同步的要求,这就要求输出信号具有快上升时间( $t_{\text{rise}} < 10 \text{ ns}$ ),以便进行后续信号的处理和分析。为满足SiPM耦合塑料闪烁体大面积探测器阵列的应用需求,研发了一款基于AD8014芯片的增益高、上升时间快、噪声水平低的信号放大电路。

## 1 探测器简介

实验使用的塑料闪烁体为北京镭蒙泰克公司的PD1150F,闪烁体衰减时间2.4 ns,发射光谱峰值范围较宽(395~425 nm),与SiPM响应光谱配合良好。

SiPM由数千个自猝灭单光子雪崩光电二极管(Single-photon avalanche photodiode, SPAD)组成,也称为像素或微单元。当入射光子的能量到一定程度时,暗电流会迅速增大,形成电子雪崩效应。大量电子雪崩效应会导致电荷的快速增加,从而形成一个可观测的电流脉冲<sup>[5]</sup>。常用的SiPM光敏面积有1 mm×1 mm、3 mm×3 mm和6 mm×6 mm三种。本实验采用爱尔兰SensL公司的MicroFC-30035-SMT。相较于其他型号SiPM, MicroFC-30035-SMT具有高增益、良好的信噪比和时间分辨率高的特点和优势。德国<sup>[6]</sup>、美国<sup>[7]</sup>和俄罗斯<sup>[8]</sup>等国实验设备上均采用该款SiPM<sup>[9-10]</sup>。

实验使用的塑料闪烁体为国产北京镭蒙泰克公司的PD1150F型,闪烁体衰减时间2.4 ns,发射光谱

峰值范围较宽(395~425 nm),与MicroFC-30035-SMT型SiPM响应光谱配合良好(响应峰值为420 nm),使用该款塑料闪烁体能够最大程度减少光探测损失,从而提高测量的灵敏度和准确性。PD1150F型具体参数如表1所示。

表1 PD1150F型塑料闪烁体参数  
Table 1 PD1150F plastic scintillator parameters

	PD1150F
相对光输出(蒽晶体)Relative light output	50%~60%
折射率Refractivity	1.58
密度Density	1.05
衰减时间Decay time / ns	2.40
衰减长度Attenuation length / m	2.44

## 2 总体设计

电路设计中,放大芯片分别为AD8014和OPA657两款信号放大电路(均为独立设计),并在Micro-cap 12中进行了电路仿真。SiPM信号放大读出电路板由以下几个部分组成:1)RC滤波部分;2)信号放大部分;3)CR耦合选通部分;4)比较器差分输出部分(仿真电路图1、2中未画出)。信号由模拟信号源产生,经过RC滤波部分初次滤波,随后进入信号放大部分降噪,再通过CR耦合部分二次滤波,最后脉冲输入到比较器部分产生差分放大信号。两者相关参数如表2所示,AD8014信号读出电路如图1所示,OPA657信号读出电路如图2所示。在图1中,脉冲信号从结点8输出;图2中,脉冲信号从结点7输出。

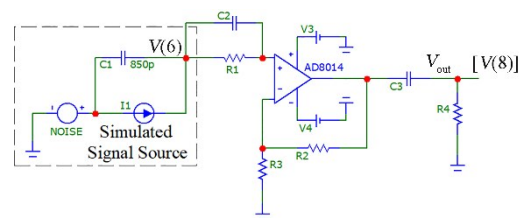


图1 AD8014信号读出电路图  
Fig.1 Circuit diagram of AD8014 signal readout

表2 AD8014、OPA657参数比较  
Table 2 Parameter comparison between the performance of AD8014 and OPA657

芯片 Chip	-3dB 带宽 -3dB Bandwidth / MHz	压摆率 Slew rate / $\text{V} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	输入电压噪声 Input voltage noise / $\text{nV} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$	电源抑制比 Power supply rejection ratio / dB
OPA657	350	700	4.8	66
AD8014	400	4 000	3.5	58

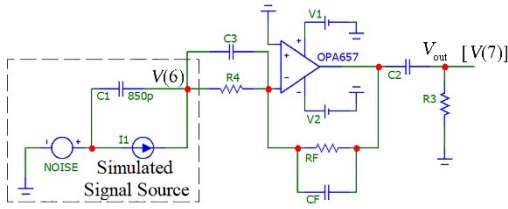


图2 OPA657信号读出电路图  
Fig.2 Circuit diagram of OPA657 signal readout

### 3 部件设计

#### 3.1 模拟信号源及电路设计

Micro-cap 12(M12)是一款功能强大的电子电路仿真软件,被用于设计、分析和优化电子电路。基于Micro-cap 12的软件仿真,为了更贴近SiPM信号放大读出电路板实际工作情况,模拟信号发生源内引入了仿真噪声源(NOISE)以及SiPM内部自带的结电容(MicroFC-30035-SMT结电容为850 pF)。模拟信号源输出脉冲信号从结点6输出,  $V(6)$ 表示结点6出的信号电压幅值,波形如图3所示。

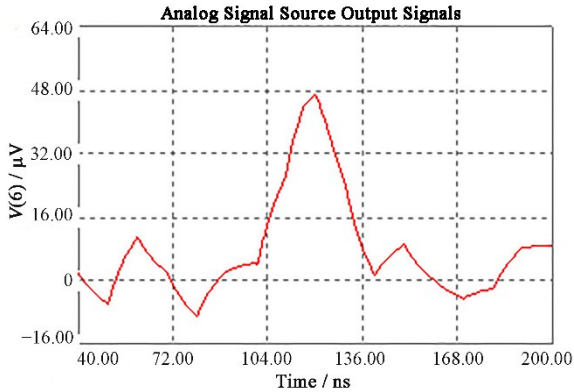


图3 模拟信号源输出脉冲波形图  
Fig.3 Diagram of analog signal-source output pulse waveform

#### 3.2 RC滤波部分

在信号进入放大器芯片之前,由于SiPM具有较大结电容以及电路本身的电阻,输入信号需要经过初级滤波电阻、初级滤波电容。对于AD8014,如图1中  $R_1$ 和  $C_2$ ;对于OPA657,如图2中  $R_4$ 和  $C_3$ 。使用初级RC的组合能够除去部分环境噪声和SiPM自身固有噪声的影响,同时对脉冲波形进行初级整形<sup>[11]</sup>。

#### 3.3 信号放大部分

放大芯片分别采用AD8014和OPA657。应用放大器原理,推算出AD8014传递函数的表达式:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{(R_4 + 1)(R_2 + R_3)}{j\omega C_3 R_2 R_4} \quad (1)$$

放大电路的噪声来源有:电路元件的自带噪声、电磁干扰、温度变化和电路串扰。电路的总输出噪声  $E_{out}$  表达式如下<sup>[12]</sup>:

$$E_{out} = \sqrt{E_v^2 \times G^2 + E_i^2 \times g^2 + \dots + E_{R_s}^2 \times G^2} \quad (2)$$

经过计算可得总电流噪声为70.3 nA,总电压噪声为50.6  $\mu$ V。为了降低放大器的输入噪声,在放大器的输入电压端使用LC滤波电路降低输入电压源的噪声和纹波,如图4所示。经测量,通过LC滤波后,输入放大器的电压纹波水平低于1%。

#### 3.4 CR耦合选通部分

这部分由  $C_3$ 、 $R_4$ 和  $R_5$ 组成,用于处理输出到比较器的信号。 $C_3$ 、 $R_4$ 耦合可以获取特定频率的信号,  $R_5$ 抑制比较器反射信号。根据计算,该耦合选通部分截止频率  $f = (2\pi RC)^{-1} = 1.1$  kHz,可以有效滤除放大器输出信号的噪声。通过隐藏较慢的充电尾部使脉冲变窄,从而允许更高频率的光子计数。阈值调节器通过可调电位器控制输出电平和脉冲数量。这部分实现了对放大器输出信号的滤波降噪和抑制比较器反射信号,CR耦合如图5所示。

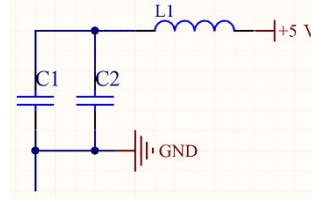


图4 放大器输入电源滤波LC电路图  
Fig.4 LC circuit diagram of amplifier input power filtering circuit

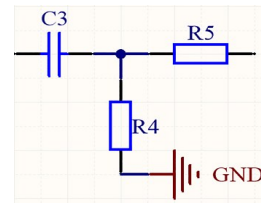


图5 CR耦合部分电路图  
Fig.5 Circuit diagram of CR coupling section

#### 3.5 比较器差分信号输出部分

差分信号输出将信号分为正负两个部分,并以差分形式输出。与单端信号输出相比,差分信号输出具有以下几个优势:抗干扰能力强、差分信号输出可以减少共模干扰的影响,因此,在许多应用中被广泛采用<sup>[13]</sup>。

通过使用M12的信号仿真分析模式可以得到  $V_{out}$  端的输出信号脉冲波形,并且在图6中可以直

测量出相同放大倍数下输出信号的上升时间以及幅值。其中,  $V(8)$  表示结点 8 处 AD8014 输出脉冲信号

幅值,  $V(7)$  表示结点 7 处 OPA657 输出脉冲信号幅值。

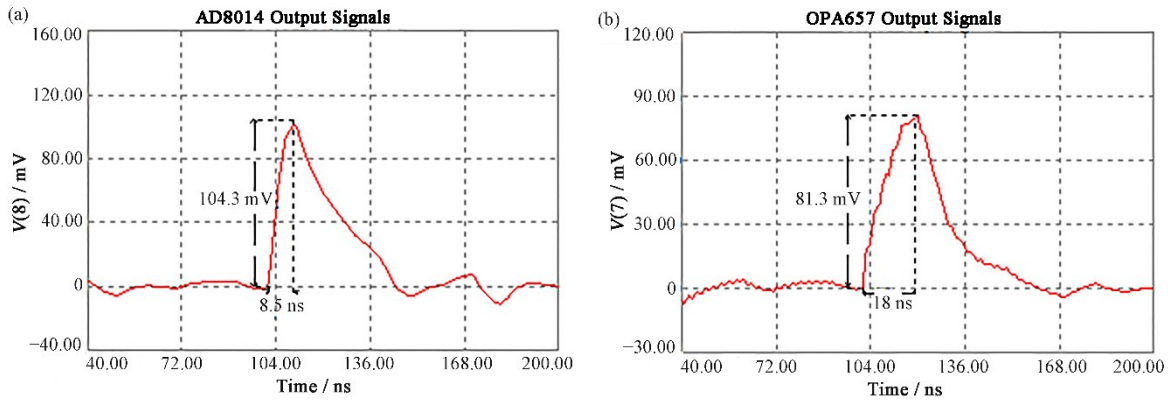


图 6 AD8014 (a) 与 OPA657 (b) 仿真输出信号图

Fig.6 DSImulated output signal diagram of AD8014 (a) and OPA657 (b) simulation output signals

## 4 主要性能测试

实验使用的塑料闪烁体条长度为 30 cm, 横截面积为 1 cm×1 cm, 其一端用铝箔覆盖, 外层使用反射材料薄膜全包裹。

### 4.1 暗噪声水平测量

在半导体中, 由于掺入杂质和物质本身的晶格缺陷, 半导体会多出两个能级: 杂质能级和缺陷能级, 载流子在能级间的跃迁和复合符合热统计规律, 这个过程产生暗噪声 (Dark noise)<sup>[14]</sup>。在未耦合塑料闪烁体条前, 通过调节触发电平, 观察到不同频率的噪声。一倍噪声频率为 200 Hz, 三倍噪声为 10~20 Hz。设置阈值为三倍噪声, 可降低噪声对计数率的影响。测量结果如图 7 所示, 三倍噪声随输入偏压而增大。相较于 OPA657 板, AD8014 板三倍噪声低于 30 mV, 峰值噪声水平降低 62%。

### 4.2 输出脉冲与计数率

将塑料闪烁体一端涂好硅油与 SiPM 信号读出板耦合, 取偏压为 27.8 V, 将触发电平调至三倍噪声, 观察输出脉冲波形, 实际脉冲输出波形参数如表 3 所示。根据增益 (Gain) 计算公式:

$$\text{Gain} = 20 \lg(V_{\text{out}}/V_{\text{in}}) \quad (3)$$

分别计算得到两块信号读出板的增益。综合考虑两者暗噪声水平高低、上升时间快慢、信号增益大小, AD8014 板的性能优于 OPA657 板。

强光直射会造成 SiPM 读出电路损坏, 整个实验过程在暗箱中完成。如图 8 所示, 通过水平方向移动放射源 (<sup>137</sup>Cs, 豁免源) 在塑料闪烁体条上的位置, 在相同的探测时间内 (5 min) 得到不同水平位置处

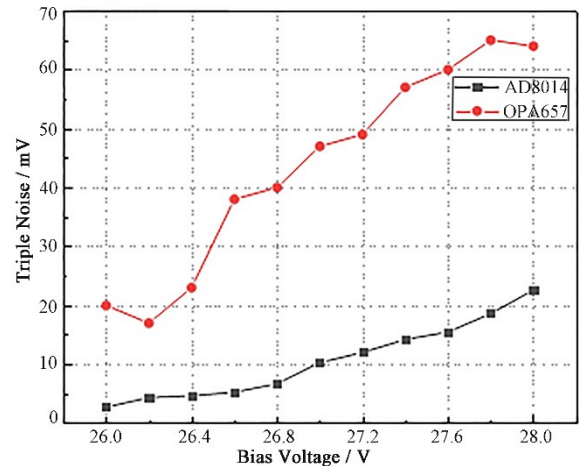


图 7 三倍噪声随偏压的变化

Fig.7 Variations of triple noise with the bias voltage

表 3 模拟波形和实验波形参数对比

Table 3 Comparison between simulated and experimental waveform parameters

	AD8014	OPA657
模拟上升时间	8.5	18.0
Simulated rise time / ns		
模拟幅值	104.3	81.3
Simulated amplitude / mV		
实验上升时间	10.6	19.7
Experimental rise time / ns		
实验幅值	107.4	84.3
Experimental amplitude / mV		
增益	66.7	64.6
Gain / dB		
-3dB 带宽	49.3	40.8
-3dB Bandwidth / MHz		

的脉冲计数。重复测量后取其计数率均值,结果如表4所示。

表4 不同距离处SiPM计数率  
Table 4 SiPM count rates at different distances

距离 Distance / cm	AD8014 计数率 AD8014 / s <sup>-1</sup>	OPA657 计数率 OPA657 / s <sup>-1</sup>
1	542.38	282.72
2	455.25	178.35
3	382.57	157.89
4	329.14	154.95
5	231.63	147.00
10	139.09	77.35
15	20.96	18.30
20	8.66	8.02
25	6.16	7.58
30	5.72	7.42

从表3可知,随着放射源离SiPM距离增加, SiPM计数率越来越小。这是由于荧光发射过程中存在一定的非辐射衰减导致实际测量到的光强度减小<sup>[15]</sup>,剧烈的光衰减发生在1~10 cm。使用AD8014和OPA657测量不同距离处计数率,测量结果显示,AD8014板比OPA657板的平均计数率提高了51%。测量结果如图9所示。

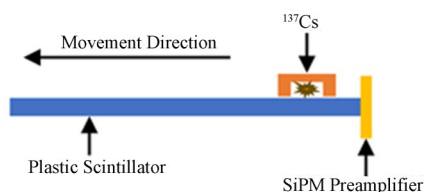


图8 计数率实验测量示意图

Fig.8 Schematic diagram of counting rate measurement

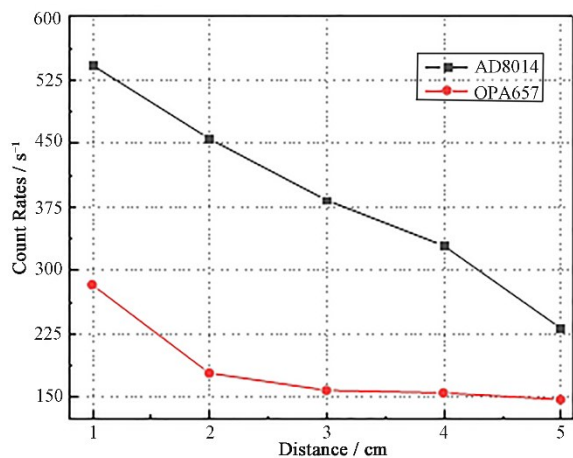


图9 不同距离处SiPM计数率变化

Fig.9 Variations in SiPM count rates at different distances

### 4.3 信号一致性

在SiPM和读出板组成阵列或系统中必须保持不同组件之间的信号特性一致。通过测量SiPM信号读出板的一致性,这有助于减少由于组件不一致性引起的误差。实验前,将塑料闪烁体条两端的铝膜除去,然后两端各耦合一块AD8014读出板,在相同实验条件下,测量不同位置处的计数率,计数率结果如表5所示。在一致性测量中,两端计数率比之前单端测量明显减少。在荧光产生后,信号会分流到两端,因此,每个端口接收到的信号强度可能会减弱,导致整体计数率降低。结果表明, SiPM信号读出板在对称位置上计数率相近,相对误差为6%,该款信号读出板的一致性较好,一致性测量结果如图10所示。

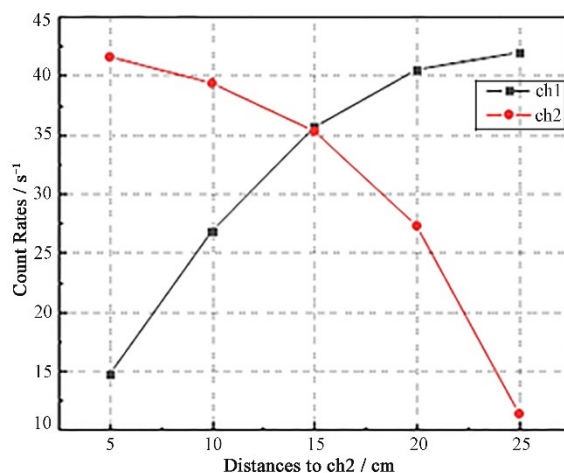


图10 SiPM读出板信号一致性测量

Fig.10 SiPM readout board signal consistency values

## 5 结语

本文设计了一款SiPM耦合塑料闪烁体探测器的信号放大读出电路,该电路基于AD8014运算放大芯片,配合CR高通滤波电路,其输出信号平均计数率高于300 s<sup>-1</sup>、暗噪声低于30 mV,兼具上升时间快、输入噪声低的特点。与采用OPA657芯片的传统跨阻放大电路相比,上升时间减少了52%,自研放大电路的峰值暗噪声下降了62%,平均计数率增加了51%,并且具有良好的一致性,满足了研发基于SiPM耦合塑料闪烁体大面积探测器阵列的计数和时间同步需求。后续将采用一种新型高速低噪声前置放大器<sup>[16]</sup>,有望进一步提高该探测器的性能。

**作者贡献声明** 唐晨阳负责文章撰写、实验和数据处理;陈欣南和高春宇负责具体实验指导和文章检查;李雨芾负责数据处理指导;王晓协助实验完成;汤秀章负责实验设计、指导和检查。

## 参考文献

- 1 丁洪林. 核辐射探测器[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.  
DING Honglin. Nuclear radiation detector[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010.
- 2 D'Errico M. Muography applied to archaeology: search and 3D reconstruction of hidden cavities[J]. Nuovo Cimento Colloquia and Communications in Physics, 2020, **43**(4-5): 126 - 136. DOI: [10.1393/NCC/I2020-20126-0](https://doi.org/10.1393/NCC/I2020-20126-0).
- 3 罗旭佳, 王权晓, 田恒, 等. 基于塑料闪烁体的宇宙射线缪子成像系统的研制[C]. 中国核科学技术进展报告(第七卷)—中国核学会2021年学术年会论文集第7册, 2021: 176-183. DOI: [10.26914/c.cnkihy.2021.067024](https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2021.067024).  
LUO Xujia, WANG Quanzhao, TIAN Heng, *et al.* Development of a cosmic ray muon imaging system based on plastic scintillators[C]. Chinese Nuclear Society Report on the Progress of Nuclear Science and Technology in China (Volume 7) - Volume 7 of the Proceedings of the 2021 Academic Annual Meeting of the Chinese Nuclear Society, 2021: 176-183. DOI: [10.26914/c.cnkihy.2021.067024](https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2021.067024).
- 4 Carnesecchi F, Agrawal N, Alici A, *et al.* Experimental study of the time resolution of SiPM coupled to scintillator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, **982**: 164484. DOI: [10.1016/j.nima.2020.164484](https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164484).
- 5 何伟基, 司马博羽, 程耀进, 等. 基于盖格-雪崩光电二极管的光子计数成像[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(8): 1831 - 1837. DOI: [10.3788/ope.20122008.1831](https://doi.org/10.3788/ope.20122008.1831).  
HE Weiji, SIMA Boyu, CHENG Yaojin, *et al.* Photon counting imaging based on GM-APD[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, **20**(8): 1831 - 1837. DOI: [10.3788/ope.20122008.1831](https://doi.org/10.3788/ope.20122008.1831).
- 6 Achenbach P, Biroth M, Lauth W, *et al.* Gain stabilization and noise minimization for SiPMs at cryogenic temperatures[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, **912**: 110 - 111. DOI: [10.1016/j.nima.2017.10.080](https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.10.080).
- 7 Mitchell L, Philips B, Johnson W N, *et al.* Radiation damage assessment of SiPMs for scintillation detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, **1040**: 167163. DOI: [10.1016/j.nima.2022.167163](https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167163).
- 8 Arkhangel'skiy A I, Arkhangel'skaja I V, Merphi J, *et al.* The application of sensl silicon photomultipliers in GAMMA-400 satellite project[J]. Physics Procedia, 2015, **74**: 390 - 393. DOI: [10.1016/j.phpro.2015.09.205](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.205).
- 9 文星, 刘江涛, 刘鑫, 等. GRM在轨标定探测器的设计和实现[J]. 原子能科学技术, 2019, **53**(6): 1091 - 1097. DOI: [10.7538/yzk.2018.youxian.0531](https://doi.org/10.7538/yzk.2018.youxian.0531).  
WEN Xing, LIU Jiangtao, LIU Xin, *et al.* Design and implementation of In-orbit calibration detector of GRM [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, **53**(6): 1091 - 1097. DOI: [10.7538/yzk.2018.youxian.0531](https://doi.org/10.7538/yzk.2018.youxian.0531).
- 10 Li S Y, Smoot G F, Grossan B, *et al.* Program objectives and specifications for the Ultra-Fast Astronomy observatory[C]//AOPC 2019: Space Optics, Telescopes, and Instrumentation. July 7-9, 2019, **11341**: 513 - 521. DOI: [10.1117/12.2548169](https://doi.org/10.1117/12.2548169).
- 11 Wembe Tafo E, Su H, Peng Y, *et al.* A low noise charge sensitive preamplifier with switch control feedback resistance[J]. Nuclear Science and Techniques, 2008, **19**(1): 39 - 44. DOI: [10.1016/S1001-8042\(08\)60019-6](https://doi.org/10.1016/S1001-8042(08)60019-6).
- 12 王经瑾, 范天民, 钱永庚. 核电子学[M]. 北京: 原子能出版社, 1985.  
WANG Jingjin, FAN Tianmin, QIAN Yonggeng. Nuclear electronics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1985.
- 13 丁卫撑, 王义, 黄洪全, 等. 一种应用于多气隙电阻板室探测器的前端电子学模块[J]. 核技术, 2012, **35**(12): 941-944.  
DING Weicheng, WANG Yi, WANG Hongquan, *et al.* A front-end electronics module for multi-gap resistive plate chambers[J]. Nuclear Techniques, 2012, **35**(12): 941-944.
- 14 尹士玉, 陈鹏宇, 马丽双, 等. SiPM低电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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.090403).
- 15 Bhattacharyya R, Maulik A, Adak R P, *et al.* Attenuation of electromagnetic radiation in nuclear track detectors[J]. Journal of Instrumentation, 2021, **16**(6): T06001. DOI: [10.1088/1748-0221/16/06/t06001](https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/06/t06001).
- 16 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 Technology, 2023, **34**(11): 169. DOI: [10.1007/s41365-023-01328-7](https://doi.org/10.1007/s41365-023-01328-7).