



用于中子位置灵敏探测器的SiPM性能研究

黄畅 唐彬 蒋俊杰 蔡小杰 周诗慧 岳秀萍 陈少佳 王修库 于潜 滕海云 孙志嘉 姚泽恩

Study on the Performance of SiPM for the Neutron Position Sensitive Detector

HUANG Chang, TANG Bin, JIANG Junjie, CAI Xiaojie, ZHOU Shihui, YUE Xiuping, CHEN Shaojia, WANG Xiuku, YU Qian, TENG Haiyun, SUN Zhijia, YAO Zeen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022108>

引用格式:

黄畅, 唐彬, 蒋俊杰, 蔡小杰, 周诗慧, 岳秀萍, 陈少佳, 王修库, 于潜, 滕海云, 孙志嘉, 姚泽恩. 用于中子位置灵敏探测器的SiPM性能研究[J]. *原子核物理评论*, 2023, 40(1):66–72. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022108

HUANG Chang, TANG Bin, JIANG Junjie, CAI Xiaojie, ZHOU Shihui, YUE Xiuping, CHEN Shaojia, WANG Xiuku, YU Qian, TENG Haiyun, SUN Zhijia, YAO Zeen. Study on the Performance of SiPM for the Neutron Position Sensitive Detector[J]. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(1):66–72. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022108

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

散裂中子源高压二维位置灵敏³He探测器的实验研究

Experimental Study on Two-dimensional Position Sensitive Detector Filled with Helium-3 for the China Spallation Neutron Source
原子核物理评论. 2019, 36(3): 351–356 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.351>

基于SiPM读出的塑料闪烁体探测器时间性能研究

Time Performance Study of Plastic Scintillator Detector with SiPM Readouts
原子核物理评论. 2020, 37(3): 749–756 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC53>

基于SiPM双端读出的 γ 射线探测器研究

Study of the γ -Ray Detector of Dual-ended Readout Based on SiPM
原子核物理评论. 2020, 37(3): 757–764 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC03>

应用于热中子的nTHGEM探测器性能研究

Performance Study of nTHGEM Detector for Thermal Neutron
原子核物理评论. 2018, 35(2): 172–178 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.02.172>

一种基于SiPM的新型起始时间探测器研制

Development of a New-typed Start-time Detector Based on SiPM
原子核物理评论. 2019, 36(3): 343–350 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.343>

SiPM高压电源研制与验证

Development and Verification of SiPM High Voltage Power Supply
原子核物理评论. 2021, 38(1): 66–72 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020048>

文章编号: 1007-4627(2023)01-0066-07

用于中子位置灵敏探测器的SiPM性能研究

黄畅^{1,2}, 唐彬^{2,3,†}, 蒋俊杰⁴, 蔡小杰², 周诗慧², 岳秀萍², 陈少佳^{2,3},
王修库^{2,3}, 于潜², 滕海云^{2,3}, 孙志嘉^{2,3}, 姚泽恩^{1,†}

1. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000;
2. 散裂中子源科学中心, 广东 东莞 523803;
3. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
4. 华南师范大学信息光电子科技学院, 广州 510000)

摘要: 为满足中国散裂中子源 (China Spallation Neutron Source, CSNS) 工程材料衍射谱仪的探测器需求, CSNS 探测器组设计并研制了基于硅光电倍增管 (Silicon Photomultiplier, SiPM) 读出的闪烁体探测器。本工作针对该探测器, 选取了 Sensl MicroFJ-30035-TSV 和 Hamamatsu S13363-3050NE-16 两种型号的 SiPM, 开展了其击穿电压、增益、温度特性、暗计数率等关键性能的测试。测试结果显示, 两者单光子分辨能力, 增益、暗计数率等性能均可满足当前闪烁体探测器需求, 相同过偏压下, 前者增益高于后者, 且 Hamamatsu SiPM 增益对温度更敏感。测试了两 SiPM 的温度补偿系数分别为 22.0 mV/°C (Sensl) 和 53.6 mV/°C (Hamamatsu), 为后续 SiPM 温度补偿电路设计奠定了基础。利用研制的探测器工程样机, 在 CSNS BL09 下测试了两种 SiPM 读出的探测器对 2.8 Å 中子探测效率分别为 76% 和 68%, 为目标探测器及同类型探测器的 SiPM 选型提供了参考。

关键词: 硅光电倍增管; 增益; 雪崩临界电压; 温度特性; 中子探测

中图分类号: TL812 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.40.2022108

0 引言

中国散裂中子源 (China Spallation Neutron Source, CSNS) 是国家“十一五”期间重点建设的重大科技基础设施之一^[1], 该装置于 2018 年 8 月通过国家验收正式投入运行^[2]。CSNS 一期完成了通用粉末衍射谱仪、小角散射谱仪和多功能反射谱仪三台谱仪的建设, 为国内用户提供了先进的科研平台^[3]。工程材料衍射谱仪是 2019 年至 2024 年 CSNS 即将新建的八台合作谱仪之一, 主要用于研究材料微观结构和宏观应力、织构、相和晶粒间应力等信息^[4]。中子位置灵敏探测器是中子散射谱仪的关键器件^[5], 其主要记录经样品散射后的中子击中探测器的空间位置与飞行时间, 计算得到中子的波长、能量、衍射角度等信息, 经谱仪软件修正分析后得到样品内部结构信息与相关动力学性质。

高性能中子位置灵敏探测器是中子散射谱仪的首要

前提, 其位置分辨直接影响谱仪的分辨率。为满足 CSNS 工程材料衍射谱仪的高精度、高分辨率等设计指标要求, 中国散裂中子源探测器课题组开展了基于 ⁶LiF/ZnS(Ag) 闪烁体、波移光纤 (Wavelength Shifting Fiber, WLSF) 和光电转换器件的中子位置灵敏探测器阵列研究^[6]。该闪烁体中子探测器相对于传统的 ³He 管位置灵敏探测器, 具有更高的计数率和位置分辨率, 同时大面积制作时的成本造价更低, 能够很好满足工程材料衍射谱仪的物理需求。

为实现探测器在实际工程应用中能够通过阵列拼接覆盖平米级大面积中子探测, 探测器的光电读出器件摒弃了传统体积庞大的光电倍增管 (Photomultiplier tube, PMT) 和各通道增益均匀性差的多阳极光电倍增管 (Multi-Anode Photomultiplier tube, MA-PMT), 采用了高集成度、增益一致性好的硅光电倍增管 (Silicon Photomultiplier, SiPM)。SiPM 又称多像素光子计数器 (Mul-

收稿日期: 2022-10-17; 修改日期: 2022-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11875273, 11975255, U1932160); 广东省基础与应用基础研究基金项目 (2020B1515120025, 2022B1515120071); 核探测与电子学基础国家重点实验室项目

作者简介: 黄畅 (1993-), 男, 湖北麻城人, 在读博士, 从事中子探测器研究; E-mail: huangchann@aliyun.com

† 通信作者: 唐彬, E-mail: tangb@ihep.ac.cn; 姚泽恩, E-mail: zeyao@lzu.edu.cn

tipixel Photon Counter, MPPC)^[7], 是近年来发展的一种新型光电探测器件。其由多个工作在盖革模式下的雪崩光电二极管 (Avalanche Photodiode, APD) 集成在一个单晶硅片上组成^[8], 每个 APD 串联一个几百千欧的猝灭电阻, 所有 APD 信号并联构成 SiPM 最终输出信号^[9]。光子入射到 APD 单元上时由于光电效应产生载流子 (电子-空穴对), 载流子在电场作用下有一定概率发生雪崩, 在回路中产生一个较大的电流脉冲^[10], 随后在猝灭电阻作用下立即停止雪崩并逐步恢复电场^[11], 多个 APD 单元的信号叠加构成 SiPM 的线性响应输出^[12]。与传统 PMT 相比, SiPM 具有单光子分辨能力强、体积小、集成度高、封装工艺成熟、工作电压低、增益一致性好等优势^[13-15], 是当前闪烁体探测器的极佳选择。

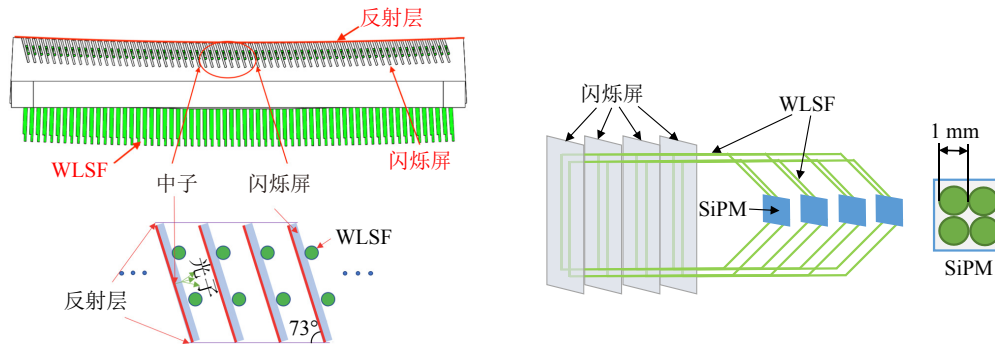


图 1 闪烁体探测器 WLSF 读出结构示意图 (在线彩图)

目前各 SiPM 厂家生产的 SiPM 主要有 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 、 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 和 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 三种规格, 而设计的闪烁体探测器采用两根直径 1 mm 的 WLSF 作为一个像素读出 (如图 1 所示), 故为保证 WLSF 与 SiPM 的良好耦合, 选取的 SiPM 像素应大于 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。而 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 像素偏大, 占用体积较大, 故本次测试选择 SiPM 灵敏面积为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。

为使工程探测器发挥最佳性能, 需选择低暗计数率 (单位时间内由 SiPM 材料内载流子的热激发等原因引起的计数)、高光子探测效率 (单位时间内 SiPM 探测到的光子数与入射到 SiPM 表面的光子数的百分比) 和高微单元密度 (SiPM 单位面积内的微像素个数) 的 SiPM。其中暗计数率会影响探测器的信噪比, 光子探测效率会影响探测器输出信号幅度从而影响探测器的中子探测效率。综合考虑 SiPM 暗计数率、微单元密度、光子探测效率、单光电子增益 (APD 单元发生一次雪崩所释放的载流子数目) 等参数, 分别选取了 Sensl MicroFJ-30035-TSV 型号和 Hamamatsu S13363-3050NE-16 型号的 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ SiPM (下文简称 Sensl SiPM 与 Hamamatsu SiPM), 厂商提供的主要性能参数如表 1 所列。

本论文针对当前探测器结构所需的光读出器件, 分别选取了 Hamamatsu 和 Sensl 同规格 ($3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$) SiPM, 开展了相关性能测试, 为闪烁体探测器的 SiPM 选型提供了重要参考。

1 SiPM 选型

设计的 CSNS 工程材料衍射谱仪的闪烁体探测器结构如图 1 所示, 探测器头部由倾斜的 ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ 闪烁屏阵列和 WLSF 组成, 每块闪烁屏和紧贴的两根 WLSF 构成探测器的像素。为提高中子探测效率, 闪烁屏倾斜 73° 固定在定位槽内。两根 WLSF 均匀分布在每块闪烁屏下, 将入射粒子在闪烁屏中产生的荧光光子收集并传输至后端光电转换器件 (SiPM)。

表 1 SiPM 主要性能参数

性能参数	SiPM 型号	
	Sensl MicroFJ-30035-TSV	Hamamatsu S13363-3050NE-16
击穿电压 ^a /V	24.4±0.3	53±5
过偏压范围/V	1-6	3
增益 ^{a,b}	~6.3×10 ⁶	~1.7×10 ⁶
暗计数率 ^{a,b}	150 kHz/mm ²	500 kHz/Channel
温度系数/(mV/°C)	21.5	54
峰值波长/nm	420	450
光子探测效率 ^{a,b,c} /%	50	40
灵敏面积	3.0 mm × 3.0 mm	3.0 mm × 3.0 mm
微像素大小/μm	35	50
微像素个数	5 676	3 584
填充因子/%	75	74

^a 在特定温度条件下测试; $T_{\text{Sensl}}=21^\circ\text{C}$, $T_{\text{Hamamatsu}}=25^\circ\text{C}$ 。

^b 在特定过偏压条件下测试 $V_{\text{over-Sensl}}=6\text{ V}$, $V_{\text{over-Hamamatsu}}=3\text{ V}$ 。

^c 对峰值波长, $\lambda_{\text{Sensl}}=420\text{ nm}$, $\lambda_{\text{Hamamatsu}}=450\text{ nm}$ 。

2 SiPM 性能测试

2.1 伏安特性曲线测试

当 SiPM 偏压 V_{bias} 大于击穿电压 V_{br} 时, APD 耗尽层中的载流子在强电场作用下加速, 与晶格发生碰撞后产生更多的载流子, 引发雪崩, 使 SiPM 的电流突然增

大。通过测量 SiPM 的 $I-V_{bias}$ 曲线, 可以得到 SiPM 击穿电压 V_{br} 等参数, 从而确定 SiPM 工作电压区间。SiPM 伏安特性曲线测量的实验装置如图 2 所示, 精密高压电源 (ISEG SHR 4260) 为 SiPM 提供偏压, 同时将 SiPM 的电流与电压值反馈至 PC 上位机, 示波器 (Teledyne LeCroy 610Zi) 实时监测 SiPM 输出信号, 辅助判断 SiPM 是否进入雪崩工作状态。为消除环境温度变化对测试结果的干扰, 恒温箱为 SiPM 提供稳定的恒温环境。

测试了 SiPM 在 21.5 °C 条件下的 $I-V_{bias}$ 曲线, 结果如图 3 所示。当 V_{bias} 低于 SiPM 击穿电压时, 暗电流较小, 此时 SiPM 暗电流主要为表面漏电流, 其随着 V_{bias} 的增大而缓慢增大。当 V_{bias} 达到击穿电压时, 电流迅速增大, 此时电流值为漏电流与击穿电流之和, 且其随着偏压升高呈指数增长的趋势。从图中可以看出, 测试的 Sensl 与 Hamamatsu 两 SiPM $I-V_{bias}$ 曲线趋势接近, 与理论相符。当偏压低于击穿电压时, Sensl SiPM 的暗电流约为 0.04~0.06 μA , 而 Hamamatsu SiPM 暗电流相对较大, 约为 0.2 μA , 这可能是由其偏压较高导致表面漏

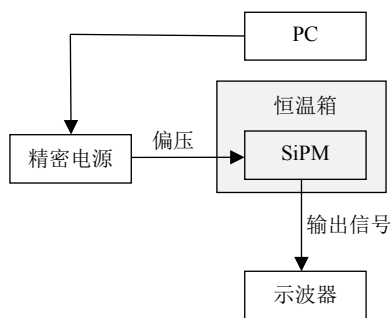


图 2 SiPM 伏安特性曲线测试装置示意图

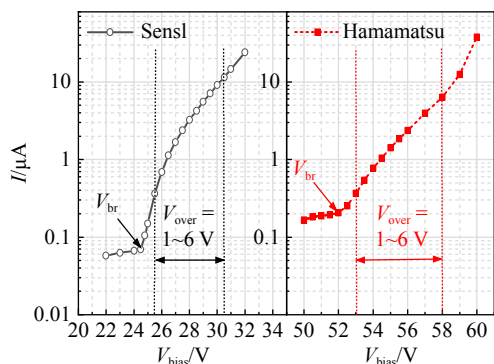


图 3 $I-V_{bias}$ 曲线测试结果 (在线彩图)

电流较大造成。由测试的 $I-V_{bias}$ 曲线结果得到 21.5 °C 条件下 Sensl 和 Hamamatsu SiPM 的击穿电压 V_{br} 分别为 24.5 和 52.0 V。SiPM 的工作偏压与击穿电压的差值被称为过偏压 V_{over} ($V_{over}=V_{bias}-V_{br}$, 其中 V_{bias} 为 SiPM 偏压, V_{br} 为击穿电压), 参考厂商给定的 SiPM 过偏压范围一般为 1~6 V, 故 Sensl 和 Hamamatsu SiPM 建议的工作偏压范围分别为 25.5~30.5 V 和 53.0~58.0 V。

2.2 增益测试

SiPM 增益测试实验装置如图 4 所示, 脉冲发生器 (Kektronix AFG3252C) 产生的脉冲信号驱动 LED 并控制其发光强度, 与其同步输出的 TTL 电平信号经 TTL 转 NIM 插件 (Ortec 499 Logic Converter) 转化为 NIM 信号后传输至门产生器 (Ortec GG8020) 将信号转化为合适宽度的 NIM 门信号作为 QDC (Mesytec MQDC-32) 的触发信号。LED 发射的蓝光通过光纤衰减后传输至被测 SiPM 灵敏区域表面, 光子在 SiPM 中产生的信号经前置放大器放大并延时后输入 QDC 被采集。实验使用前置放大器由 CSNS 电子学课题组自主研发 (本工作后续相关实验均使用该前置放大器), 经刻度后得到其放大倍数为 15 倍, QDC 量程为 500 pC, 对应 4 000 道。数据获取系统对 SiPM 信号电荷信息获取后并分析, SiPM 增益 G 通过下列公式计算:

$$G = \frac{N \cdot r}{M \cdot e}, \tag{1}$$

其中 N 为 SiPM 单光电子电荷量对应的道数; r 为 QDC 电荷转换系数, 即 QDC 每道对应电荷量; M 为信号放大倍数, 即 $M=15$; e 为电子电荷, $e=1.6 \times 10^{-19}$ C。

温度 $T=21.5$ °C 条件下, SiPM 工作电压分别为 27.5 和 55.0 V 测试得到的 SiPM 信号电荷谱如图 5 所示, 图中分立的等间距光电子峰对应不同光子数, 相邻光电子峰的峰间距为 SiPM 单光电子电荷量对应道数。从图中可以看出, 当前温度和过偏压 $V_{over}=3.0$ V ($V_{br-sensl}=24.5$ V, $V_{br-Hamamatsu}=52.0$ V) 条件下, Sensl 与 Hamamatsu SiPM 均具备较好的单光子分辨能力, 且 Sensl SiPM 单光电子增益略大于 Hamamatsu SiPM。对每个光电子峰高斯拟合, 计算相邻光电子峰峰间距并取其平均值, 由式 (1) 计算得到 Sensl SiPM 在 $T=21.5$ °C, $V=$

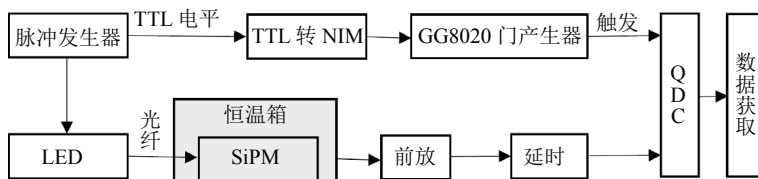


图 4 增益测试装置示意图 (在线彩图)

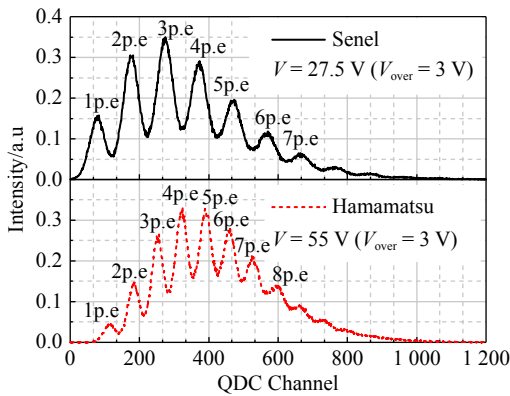


图 5 SiPM 信号电荷谱(在线彩图)

27.5 V 条件下增益为 4.95×10^6 。同理计算得到 Hamamatsu SiPM 在 $T = 21.5^\circ\text{C}$, $V = 55.0\text{ V}$ 条件下的增益为 3.48×10^6 。在 $V_{\text{over}} = 3.0\text{ V}$ 条件下, Hamamatsu SiPM 与 Sensl SiPM 增益均为 10^6 量级, Hamamatsu SiPM 增益略低于 Sensl SiPM 增益。

基于上述增益测试方法, 结合 $I-V$ 曲线选取合适的工作电压范围, 测试了 SiPM 增益-过偏压曲线, 结果如图 6 所示。从图中可以看出, 测试的 Sensl 与 Hamamatsu 两 SiPM 在工作偏压范围内, 增益与过偏压 V_{over} 均呈良好的线性关系, 且相同 V_{over} 条件下, Sensl SiPM 增益明显大于 Hamamatsu SiPM 增益。在 $V_{\text{over}} = 4.5\text{ V}$ 时, Sensl SiPM 增益可达到 7.45×10^6 , 比同条件下 Hamamatsu SiPM 增益 (5.12×10^6) 高约 45%。由线性拟合斜率可知, Sensl SiPM 与 Hamamatsu SiPM 增益随过偏压 V_{over} 线性升高系数分别为 1.66×10^6 和 $1.12 \times 10^6 / \text{V}$ 。

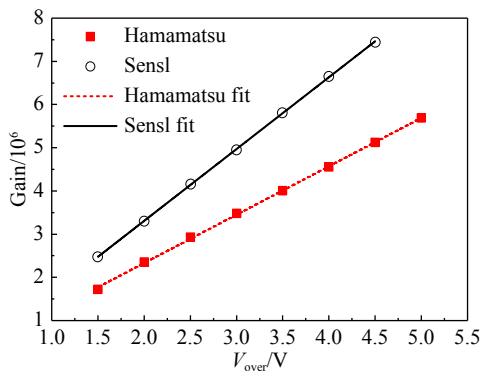


图 6 SiPM 增益-过偏压曲线(在线彩图)

2.3 增益与温度变化关系测试

SiPM 与普通的半导体器件一样, 随着温度的改变, 其许多性能参数(例如, 雪崩临界电压、增益、暗计数率等)都会变化, 其中增益随温度变化较敏感。相关研究表明, SiPM 的增益随温度升高线性减小^[16], 故可以通过温度补偿方法减小 SiPM 的增益漂移, 提高探测器的工作稳定性。掌握 SiPM 的增益与温度变化关系是开

展温度补偿的首要前提, 对探测器性能优化具有重要意义。SiPM 的增益与温度变化关系测试实验装置与增益测试实验装置相同(如图 4 所示), 通过恒温箱改变 SiPM 工作环境温度测试得到增益与温度变化关系, 结果如图 7 所示。从图中可以看出, 在 $V_{\text{over}} = 3.0\text{ V}$ 和 $V_{\text{over}} = 4.5\text{ V}$ 条件下, Sensl SiPM 与 Hamamatsu SiPM 增益均随温度升高线性下降, 与理论相符。由线性拟合斜率可知, 温度每升高 1°C , Sensl SiPM 增益减少约 3.65×10^4 , Hamamatsu SiPM 增益减少约 5.95×10^4 , 证明 Hamamatsu SiPM 增益对温度变化更加敏感。

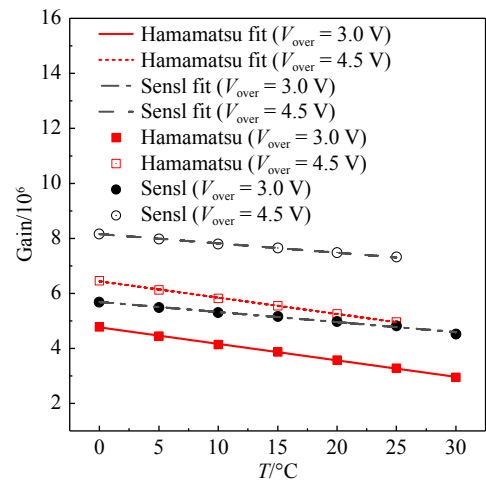


图 7 SiPM 增益与温度变化关系(在线彩图)

以 $T = 15^\circ\text{C}$, $V_{\text{over}} = 3.0\text{ V}$ 条件下增益为基准, 结合测试得到的 SiPM 增益与过偏压 V_{over} 的线性关系, 计算不同温度下, SiPM 电压补偿值, 结果如图 8 所示。从图中可以看出, Sensl SiPM 与 Hamamatsu SiPM 补偿电压均与温度保持良好线性关系, 对上述结果线性拟合得到 Sensl 与 Hamamatsu SiPM 温度补偿系数分别为 22.0 和 $53.6\text{ mV}/^\circ\text{C}$ 。

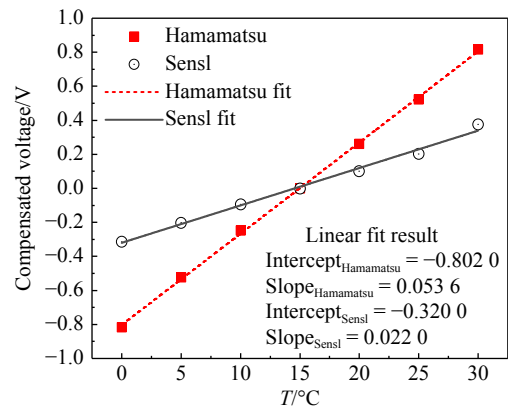


图 8 SiPM 补偿电压与温度变化关系(在线彩图)

2.4 暗计数率测试

暗计数是 SiPM 主要噪声来源, 其主要是由半导体

内部产生的热激发电子在高场区发生雪崩导致^[17]。随偏压增加，SiPM 内部由热激发导致的雪崩概率增加，暗计数率显著增加。由于热激发电子产生的噪声源大多在单光子级别，故将阈值设置在单光子级别以上可以大幅度减少 SiPM 暗计数，但过高的阈值会对正常信号产生影响，研究 SiPM 的暗计数率特征，有助于信号的准确测量，对提高探测器信噪比有重要意义。SiPM 暗计数率测试实验装置如图 9 所示，SiPM 热激发噪声信号经前置放大器放大和反向后输入低阈甄别器 (CAEN N844)，最后通过计数器测量不同阈值下 SiPM 暗计数率。实验使用前置放大器与 SiPM 增益测试前置放大器相同，N844 低阈甄别器阈值配置范围 0~255 mV，计数器为 ORTEC 871，饱和计数率约 10 MHz。

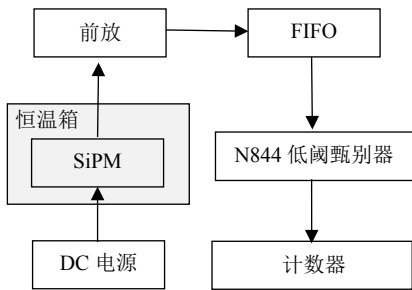


图 9 SiPM 暗计数率测试实验装置示意图(在线彩图)

在 $T=21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $V_{\text{over}}=5.0\text{ V}$ 条件下分别测试了不同阈值条件下 Sensl 与 Hamamatsu SiPM 暗计数率，结果如图 10 所示。从图中可以看出，当阈值较低时 (10 mV)，Sensl 与 Hamamatsu SiPM 暗计数率均较高 (约 10 kHz)，应用于闪烁体探测器时，该阈值下探测器将无法正常工作。随阈值升高，SiPM 暗计数率迅速降低，当阈值大于 70 mV 时，Sensl 与 Hamamatsu SiPM 暗计数率均低于 1 Hz，且相同阈值条件下 Hamamatsu SiPM 暗计数率略低于 Sensl SiPM 暗计数率。

基于已研制的 SiPM 读出的 ${}^6\text{LiF}:\text{ZnS}(\text{Ag})$ 闪烁体中子探测器样机的中子信号特征，探测器阈值通常设置

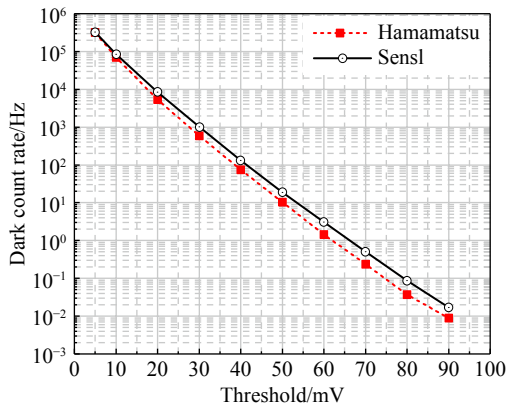


图 10 SiPM 暗计数率与过偏压及阈值关系(在线彩图)

为 70~90 mV，由上述测试结果可知，该阈值条件下 Sensl 与 Hamamatsu SiPM 暗计数率均能满足探测器需求。

3 SiPM 应用于闪烁体探测器测试

由第 2 节 SiPM 性能测试结果可知，Sensl SiPM 与 Hamamatsu SiPM 均具有较好的单光子分辨能力，在合理的偏压和阈值条件下，二者暗计数率均可以满足探测器需求，且 Sensl SiPM 相对于 Hamamatsu SiPM 具有更高的增益。为进一步考察 Sensl 与 Hamamatsu SiPM 应用于闪烁体探测器的实际性能表现，利用 CSNS 探测器课题组自主设计的闪烁体探测器工程样机，分别测试了 Sensl 与 Hamamatsu SiPM 作为光电转换器件时闪烁体探测器的热中子探测效率。闪烁体探测器工程样机结构如图 11 所示，其主要由 ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ 闪烁屏、WLSF 阵列、光电转换器件以及后端读出电子学组成。为提高探测效率，闪烁屏切割为独立像素 (像素大小 $3\text{ mm} \times 100\text{ mm}$)，并倾斜 73° (闪烁屏与水平面夹角) 形成斜入射的百叶窗结构。入射中子与 ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ 闪烁屏中的 ${}^6\text{Li}$ 反应产生次级带电粒子，次级粒子在 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 闪烁体中沉积能量产生蓝光光子，WLSF 阵列将各闪烁屏像素产生的光子吸收重发射并传输至后端光电转换器件产生电脉冲信号，经电子学放大、整形及甄别处理后，得到入射粒子位置与时间信息。

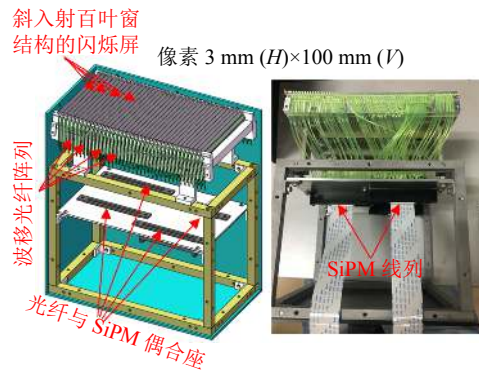


图 11 闪烁体探测器工程样机结构图与实物图(在线彩图)

利用 CSNS 提供的慢化准直脉冲中子束，在 CSNS BL09 中子束线上，分别测试了使用 Sensl 与 Hamamatsu SiPM 时 ($V_{\text{over}}=5\text{ V}$ ， $\text{Threshold}=70\text{ mV}$)，闪烁体探测器相对 ${}^3\text{He}$ 管探测器 (LND 252299，气压 $20.2 \times 10^5\text{ Pa}$ ，直径 1 英寸) 的热中子探测效率。CSNS BL09 出口处中子束斑直径为 $\phi 20\text{ mm}$ ，中子注量率约为 $10^6\text{ n/cm}^2\cdot\text{s}$ ，中子波长范围 $0.1\sim 10\text{ \AA}$ 。已知使用的 ${}^3\text{He}$ 管探测器对目标能量中子 (波长大于 1 \AA) 探测效率接近 100%，故可以计算得到闪烁体探测器的绝对中子探测

效率, 测试原理及方法参考文献 [18]。图 12 为测试得到的经锗 [220] 单色器单色后的中子飞行时间谱(插图 为 1.4 Å 衍射峰的局部放大图), 从图中可以看出, 闪烁体探测器与 ^3He 管探测器测试得到的中子飞行时间谱基本一致, 均能明显观测到 1.4 与 2.8 Å 单色中子峰, 且峰位一致性很好, 证明 Sensl 与 Hamamatsu SiPM 均能使闪烁体探测器正常工作。已知实验所使用 ^3He 管探测器对 1.4 及 2.8 Å 中子的探测效率为接近 100%, 计算得到 Sensl 与 Hamamatsu SiPM 作为光电转换器件时闪烁体探测器对 2.8 Å 中子的探测效率分别为 76% 和 68%, 对 1.4 Å 中子的探测效率分别为 59% 和 47%。

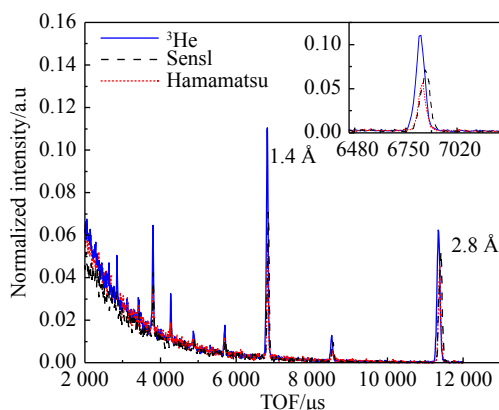


图 12 ^3He 管探测器及闪烁体探测器测得中子飞行时间谱(在线彩图)

对比测试结果可以看出, 使用 Sensl SiPM 作为光电转换器件时, 闪烁体探测器热中子探测效率高于使用 Hamamatsu SiPM 时的探测效率, 由 2.2 节增益测试结果可知, Sensl SiPM 在相同 V_{over} 条件下的增益明显高于 Hamamatsu SiPM, 这可能是造成使用 Sensl SiPM 作为光电转换器件时, 闪烁体探测器探测效率稍高的主要原因。

4 总结

本文针对用于 CSNS 工程材料衍射谱仪的闪烁体中子位置灵敏探测器对高性能 SiPM 阵列的需求, 开展了 SiPM 主要性能参数研究。结合探测器设计需求, 选取了 Sensl MicroFJ-30035-TSV 和 Hamamatsu S13363-3050NE-16 两种型号的 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ SiPM, 测试并比较了其击穿电压、增益、暗计数率等性能参数, 研究了 SiPM 增益与温度变化关系及温度补偿系数。测试结果显示, Sensl 与 Hamamatsu SiPM 击穿电压分别为 24.5 和 52.0 V, 建议工作偏压范围为 25.5~30.5 V 和 53.0~58.0 V, 两者均有较好的单光子分辨能力。相同过偏压同条件下, Sensl SiPM 增益高于 Hamamatsu SiPM 增益,

当过偏压为 4.5 V 时, 二者增益分别为 7.45×10^6 和 5.12×10^6 ($T = 21.5\text{ }^\circ\text{C}$)。Sensl 与 Hamamatsu SiPM 增益随温度均呈线性下降趋势, 且 Hamamatsu SiPM 增益对温度更敏感, 二者温度补偿系数分别为 22.0 和 53.6 mV/ $^\circ\text{C}$, 为后续 SiPM 温度补偿电路设计提高了重要参考。在过偏压为 5 V, 阈值大于 70 mV 条件下, Sensl 与 Hamamatsu SiPM 暗计数率均低于 1Hz, 满足 CSNS 工程材料衍射谱仪的闪烁体探测器需求。

在 CSNS 的 BL09 慢化准直中子束线上开展了基于 2 种 SiPM 读出的闪烁体探测器工程样机探测效率测试。测试结果显示, 使用 Sensl SiPM 时闪烁体探测器探测效率高于 Hamamatsu SiPM, 对 2.8 和 1.4 Å 中子的探测效率分别为 76% 和 59%。基于上述测试结果, 确定了 Sensl MicroFJ-30035-TSV SiPM 作为 CSNS 工程材料衍射谱仪大面积闪烁体探测器阵列的光电转换器件, 同时也为其他基于 SiPM 读出的探测器的 SiPM 选型提供了参考。

参考文献:

- [1] WEI J, CHEN H S, CHEN Y W, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2009, 600(1): 10.
- [2] WANG J L. *Scientific Chinese*, 2017, 69(5): 7. (in Chinese) (王晋岚. *科学中国人*, 2017, 69(5): 7.)
- [3] WEI J, FU S N, TANG J Y, et al. *Chinese Phys C*, 2009, 33(11): 1033.
- [4] WEI J, FANG S X, CAO J S, et al. *J Korean Phys Soc*, 2007, 50(5): 1377.
- [5] TANG J J, WANG T, ZHANG Q, et al. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(1): 78. (in Chinese) (唐军杰, 王拓, 张强, 等. *发光学报*, 2013, 34(1): 78.)
- [6] TANG B, SUN Z J, HUANG C, et al. *Second Symposium on Novel Technology of X-Ray Imaging*, 2019: 11068.
- [7] NAGANO T, YAMAMOTO K, SATO K, et al. Improvement of Multi-Pixel Photon Counter(MPPC)[C]//2011 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, Valencia, Spain, 2011:1657.
- [8] ROSADO J, ARANDA V M, BLANCO F, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2015, 787: 153.
- [9] ZHANG G Q, ZHAI X J, ZHU C J, et al. *International Journal of Quantum Information*, 2012, 10(3): 1230002.
- [10] CHEN Z H, YU Y H, LI G P, et al. *Atom Energy Sci Technol*, 2020, 54(2): 340. (in Chinese) (程泽辉, 余玉洪, 李公平, 等. *原子能科学技术*, 2020, 54(2): 340.)
- [11] SCHAART D R, VAN DAM H T, SEIFERT S, et al. *Physics in Medicine and Biology*, 2009, 54(11): 3501.
- [12] LIU Z, DOROU K, AUFRAY E, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2015, 787: 240.
- [13] ADAMO G, AGRO D, STIVALA S, et al. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, 60(11): 3718.
- [14] KARDYNAL B E, YUAN Z L, SHIELDS A J. *Nature Photonics*, 2008, 2(7): 425.
- [15] RENKER D, LORENZ E. *Journal of Instrumentation*, 2009, 4(4):

- P04004.
- [16] DAI Z, QUAN L, CHENG X L, et al. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2015, 34(3): 298. (in Chinese)
(戴泽, 全林, 程晓磊, 等. *飞行器测控学报*, 2015, 34(3): 298.)
- [17] PARK H M, JOO K S. *Nucl Instr and Meth A*, 2015, 781: 1.
- [18] HUANG C, TANG B, LIU Y, et al. *Nuclear Physics Review*, 2019, 36(2): 190. (in Chinese)
(黄畅, 唐彬, 刘云, 等. *原子核物理评论*, 2019, 36(2): 190.)

Study on the Performance of SiPM for the Neutron Position Sensitive Detector

HUANG Chang^{1,2}, TANG Bin^{2,3,†}, JIANG Junjie⁴, CAI Xiaojie², ZHOU Shihui², YUE Xiuping², CHEN Shaojia^{2,3},
WANG Xiuku^{2,3}, YU Qian², TENG Haiyun^{2,3}, SUN Zhijia^{2,3}, YAO Zeen^{1,†}

(1. *School of Nuclear Science and Technology, University of Lanzhou, Lanzhou 730000, China;*

2. *Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, Guangdong, China;*

3. *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

4. *School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510000, China)*

Abstract: In order to fulfill the requirements of the engineering material diffraction spectrometer of China Spallation Neutron Source(CSNS), a new integrated and modular scintillator detector based on Silicon Photomultiplier(SiPM) readout is designed and constructed by the Neutron Detector Group of the CSNS. In this paper, the characteristics such as breakdown voltage, gain, temperature characteristics and dark count rate of Sensl MicroFJ-30035-TSV and Hamamatsu S13363-3050NE-16 model SiPM are tested. The results show that the performance of the two SiPM including the single-photon resolution, gain, dark count rate can meet the requirements of the scintillator detector. The gain of Sensl SiPM is higher than that of Hamamatsu SiPM in the same overbias and the latter is more sensitive to temperature. The temperature compensation coefficient of the Sensl and Hamamatsu SiPM are 22.0 and 53.6 mV/°C respectively, which will provide reference for the design of temperature compensation circuit of SiPM. The prototype of a scintillator detector based on the above two SiPM readout was developed and the detection efficiency of the detector has been tested on the BL09 of CSNS. The results show that the detection efficiency of detector equipped with Sensl SiPM or Hamamatsu SiPM is 76% and 68% for 2.8 Å neutrons, respectively. The results of this paper will provide reference for the selection of SiPM for the developed scintillator detector and other SiPM-based detectors.

Key words: silicon photomultiplier tube; gain; avalanche breakdown voltage; temperature characteristics; neutron detection

Received date: 17 Oct. 2022; **Revised date:** 11 Nov. 2022

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11875273, 11975255, U1932160); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation(2020B1515120025, 2022B1515120071); State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics Foundation

† **Corresponding author:** TANG Bin, E-mail: tangb@ihep.ac.cn; YAO Zeen, E-mail: zeyao@lzu.edu.cn