

大尺寸 BGO-SiPM 探测器温度效应 及能量分辨研究

宋路洋¹, 苏俊^{1*}, 张立勇¹, 陈俊峰², 刘峰成¹, 覃之巍¹, 盛耀德¹, 江信之¹,
陈鑫¹, 林琴¹, 黄羿彤¹, 王琳¹, 谌阳平³, 金仕纶⁴, 卢飞⁵

(1. 射线束技术教育部重点实验室, 北京师范大学物理与天文学院, 北京 100875; 2. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 201899;
3. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 4. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000;
5. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210)

摘要: 大型闪烁体 γ 探测阵列在核物理和核天体物理等领域的实验研究中发挥着重要作用。传统的光电倍增管(PMT)体积较大, 对设计带来了诸多限制, 进而影响阵列的效率、紧凑性和颗粒度等关键性能指标的提

关键词: γ 探测阵列; 硅光电倍增器; 锗酸铋闪烁体; 温度效应; 击穿电压; 能量分辨率

中图分类号: TL812

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2025)02-0257-08

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0771

Study on Temperature Effects and Energy Resolution of Large-size BGO-SiPM Detector

SONG Luyang¹, SU Jun^{1*}, ZHANG Liyong¹, CHEN Junfeng², LIU Fengcheng¹, QIN Zhiwei¹,

SHENG Yaode¹, JIANG Xinzhi¹, CHEN Xin¹, LIN Shen¹, HUANG Yitong¹,

WANG Lin¹, SHEN Yangping³, JIN Shilun⁴, LU Fei⁵

(1. Key Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education, School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China;
3. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China; 4. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 5. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

收稿日期: 2024-11-10; 修回日期: 2024-12-16

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFA1603301, 2023YFA1606701); 国家自然科学基金(12275026)

* 通信作者: 苏俊

Abstract: The large scintillator γ -ray detector array plays an important role in studies within fields such as nuclear physics and nuclear astrophysics. The design of gamma-ray detector arrays is often constrained by the use of photomultiplier tubes (PMTs), whose substantial bulkiness introduces numerous design constraints, thereby limiting improvements in key performance metrics such as detection efficiency, compactness, and granularity. In contrast, silicon photomultipliers (SiPMs), characterized by their smaller size, offer a promising alternative that could overcome these constraints. However, in comparison to PMTs, SiPMs exhibit greater sensitivity to temperature variations. This increased sensitivity, when combined with the temperature dependence of scintillator light yields, exacerbates the operational complexity of the detection system. This study aims to investigate the effect of temperature on a large-size bismuth germanate (BGO) scintillator coupled with a SiPM array (BGO-SiPM), determine the optimal operating parameters across a range of temperatures, and assess the feasibility of using SiPMs in BGO detector arrays. A rectangular BGO scintillator with dimensions of 6 cm $\times$ 6 cm $\times$ 12 cm was coupled with an 8 $\times$ 8 channel SiPM array. The performances of the BGO-SiPM detector were tested rigorously across temperatures ranging from $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. By adjusting the operating voltage, optimal energy resolution was attained within this temperature range. For comparative analysis, the same BGO scintillator was also coupled with a PMT (BGO-PMT), and subjected to identical temperature conditions. Experimental results show that at temperatures above $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, the energy resolution of the BGO-SiPM detector deteriorated more rapidly with increasing temperature when compared to the BGO-PMT detector. This decline is primarily due to the rapid increase in SiPM dark current, which consequently reduces the signal-to-noise ratio. Notably, as the temperature drops below $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, the performance of both the BGO-SiPM and BGO-PMT detectors becomes comparable. However, the BGO-SiPM detector shows a slightly better improvement in energy resolution as temperatures decrease. This improvement is primarily due to the reduction in SiPM dark current, which enhances signal-to-noise ratio. In addition, this work investigated the temperature sensitivity of the peak channel position of the BGO-SiPM detector near $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. In conclusion, this study demonstrates that while the BGO-SiPM detector is more sensitive to temperature variations regarding peak position, potentially affecting its performance under different conditions, it provides certain advantages over the BGO-PMT detector in terms of energy resolution at lower temperatures. These findings serve as a significant reference for future applications of SiPMs in BGO detector arrays.

Key words: gamma-ray detector array; silicon photomultiplier; bismuth germanate scintillator; temperature effect; breakdown voltage; energy resolution

在稀有伽马事件探测和复杂级联伽马探测实验中,伽马探测效率的不足一直是实验技术限制之一。闪烁体阵列显著提升了伽马全能峰探测效率,为解决这一问题提供了有效途径,逐渐成为核物理及核天体物理实验研究中的关键技术。近年来,闪烁体阵列的设计和研发正向高效率、高分辨、高颗粒度以及模块化方向发展,如基于NaI(Tl)闪烁体发展的SuN^[1]、MTAS^[2]、DTAS^[3]、HECTOR^[4]等,以及基于锗酸铋(BGO)闪烁体发展的LUNA-BGO^[5]、JUNA-BGO^[6]。和NaI(Tl)相比,

BGO闪烁体具有更高的伽马衰减能力,在提高探测效率和颗粒度方面具有更大的优势,因此北京师范大学联合中国科学院近代物理研究所、中国原子能科学研究院、中国科学院上海高等研究院和中国科学院上海硅酸盐研究所,采用BGO闪烁体设计研发了新型大规模模块化BGO闪烁体阵列(large-scale modular BGO detection array, LAMBDA)^[7]。

和大部分探测阵列相同,目前LAMBDA仍采用传统光电倍增管(PMT)作为光电转换器件对信

号进行读出。然而,PMT及其分压电路尺寸较大(长度通常在20 cm左右),显著增大了探测阵列的体积,从而带来了一系列问题,如需更大的屏蔽装置和安装空间等。更重要的是,因为PMT占用的体积会使得相邻探测单元之间的距离过大,阵列设计时无法沿PMT方向堆叠探测单元,从而限制了阵列的组装方式及其紧凑性。作为一种新型的光电转换器件,硅光电倍增器^[8](SiPM)相较于PMT,具有尺寸小、工作电压低、不受磁场干扰等优点,目前正逐步应用于粒子物理核物理^[9]、核医学^[10]和激光雷达^[11]等领域。若采用SiPM替代PMT作为BGO闪烁体的读出器件,可有效解决上述问题,进一步优化LAMBDA阵列的性能和使用灵活性。为便于后续描述,本文将BGO闪烁体耦合SiPM命名为BGO-SiPM探测器,耦合PMT命名为BGO-PMT探测器。

近年,已有一系列的工作对BGO-SiPM探测器的性能进行了研究。2011年,Grodzicka等^[12]利用5 mm×5 mm×5 mm的BGO闪烁体,分别耦合Hamamatsu的2×2通道MPPC阵列(多像素光子计数器,即SiPM)和PMT并进行了对比测量,得到的BGO-SiPM探测器在662 keV处的能量分辨率为10.1%,优于BGO-PMT探测器的10.4%。2017年,Grodzicka-Kobylka等^[13]将12 mm×12 mm×12 mm的BGO闪烁体分别耦合Hamamatsu的4×4通道和8×8通道的MPPC阵列,得到的BGO-SiPM探测器对662 keV的能量分辨率分别为8.8%和8.9%,均优于BGO-PMT探测器的10.0%。以上结果表明,SiPM在小尺寸BGO闪烁体的读出应用中,能量分辨率优于BGO-PMT探测器的水平。但目前SiPM在大尺寸BGO闪烁体读出应用上的研究较少,Szczesniak等^[14]利用Hamamatsu的16×16通道MPPC阵列配合3 in的BGO闪烁体使用,测得的能量分辨率为13.41%,差于BGO-PMT探测器测得的10.78%。因此大尺寸BGO闪烁体和SiPM配合使用的性能还有待进一步研究和提升。

需指出,和PMT不同,SiPM的击穿电压和噪声水平等性能参数受温度变化影响较大^[15]。一般,温度升高会导致SiPM击穿电压提高、噪声增大;反之,温度降低会使得SiPM击穿电压降低、噪声减小。这一特性导致SiPM在使用过程中一般需

进行恒温或采取温度补偿措施,保持探测器处于稳定工作状态^[16-17]。另一方面,BGO闪烁体也具有较强的温度效应,其光产额会随温度的降低而提高^[18-20]。因此,在BGO-SiPM探测器使用过程中,以上两方面的温度效应叠加会导致探测器的工作参数选择更复杂,需进行深入系统研究。目前,LAMBDA阵列主要在实验室常温(20℃)下工作,但鉴于JUNA-BGO研制^[6]中发现低温条件下能量分辨率更佳,也计划为LAMBDA阵列研制低温恒温系统。由于采用的SiPM工作温度最低为-40℃,因此本工作主要针对BGO-SiPM在-40~20℃区间的性能进行优化测试。

本工作将大尺寸BGO闪烁体和SiPM阵列耦合组成BGO-SiPM探测器,将其置于低温恒温系统中,通过改变温度对BGO-SiPM探测器的温度效应进行研究,得到SiPM在不同温度下的最佳工作条件,并利用¹³⁷Cs标准 γ 源对其能量分辨率进行测量。另外,采用同一BGO闪烁体组装BGO-PMT探测器,在相同温度下进行测量,并将结果和BGO-SiPM探测器进行比较。

1 实验设置

本研究采用的BGO闪烁体为6 cm×6 cm×12 cm的长方体,尺寸和LAMBDA阵列模块一致,由中国科学院上海硅酸盐研究所制备。BGO闪烁体采用6 cm×6 cm的端面进行光读出,面积较大,因此SiPM选用SensL公司生产的8×8通道阵列,型号为ARRAYJ-60 035,该型号共有64个SiPM单元,每个SiPM单元尺寸为6.13 mm×6.13 mm,微单元填充因子为75%。阵列总尺寸达到50.44 mm×50.44 mm,可实现BGO读出端面的69%覆盖率,较2 in PMT的覆盖率56%更高。SiPM阵列中每个SiPM单元均提供快读出和标准读出两个信号接口,共计128路信号输出。鉴于在大尺寸闪烁体测量中,通常只关注整个闪烁体沉积的 γ 射线能量,为简化电子学系统,本工作对SiPM阵列的64路标准输出进行加和处理,最终引出一路能量信号。另外,偏压采用负偏压设置,通过64个单元的公用输出加电压。

在探测器的装配过程中,采用LAMBDA阵列研制优化过的方案^[7],包括除与光电转换器件耦合的6 cm×6 cm端面经过抛光处理外,其余5个

面均进行磨砂处理,以提高光收集效率。此外,BGO闪烁体表面(除耦合区域外)包覆了一层由3M公司生产的65 μm 厚ESR镜面反射膜,进一步增强光收集效率。BGO闪烁体与光电转换器的耦合采用了EJ公司生产的EJ-550硅脂,减小闪烁光在读出界面的全反射。

由于BGO晶体尺寸较大,利用简单的制冷模式较难实现对BGO温度的精确调控,为对BGO-SiPM的温度效应进行精细研究,本工作采用内封闭式低温恒温系统,具体实验设置如图1所示,主要由内封闭式低温恒温系统、探测器、高压电源、获取系统、放射源等部分构成。内封闭式低温恒温系统的恒温腔尺寸为50 cm $\times$ 50 cm $\times$ 60 cm,可在-70~150 $^{\circ}\text{C}$ 范围内调节,温度的设定及显示精度为0.1 $^{\circ}\text{C}$,温度稳定性为 ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。

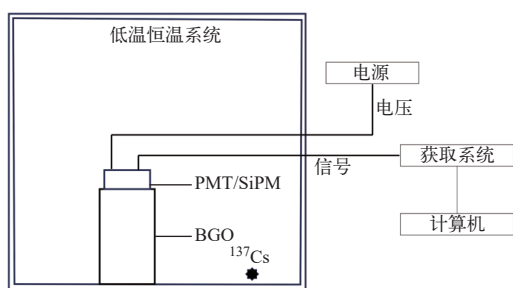


图1 实验设置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

由于SiPM的增益受工作电压影响较大,为确保SiPM阵列工作稳定,需采用高精度的电压模块进行供电,本工作中SiPM所需的电压由ISEG公司的EHS-84-01n高精度低压模块提供,其电压纹波为1 mV。PMT所需的高压由ISEG公司的EHS-F0-60p模块提供,其电压纹波为3 mV。获取系统使用了XIA公司的Pixel-16采集卡以及GDDAQ软件^[21],采集卡的采用频率为100 MHz,精度为14 bit,能对探测器信号进行数字化处理,并采用FPGA内置的梯形算法获取能量信息。放射源采用 ^{137}Cs 标准 γ 源,特征 γ 射线能量为662 keV,活度约为9 000 Bq。

实验时将探测器和放射源均置于低温恒温系统内部,高压供电和获取系统置于外部。低温腔室整体密封避光,探测器到外部的高压和信号线在穿过低温腔室体壁时进行密封,防止空气对流造成探测器结霜和内部温度变化。 ^{137}Cs 源和BGO

闪烁体的距离约10 cm,避免计数率过高引起信号堆积。为保证对比测试精度,整个测试过程中放射源和探测器相对位置保持不变。在常温下对探测器进行降噪等措施优化处理后,改变低温恒温系统的温度设置,对不同温度下的探测器性能进行测试研究。

测试过程中发现由于BGO闪烁体的体积较大,导热性能不佳,闪烁体整体温度达到均衡需要一定时间。为分析这一条件,将低温恒温系统的温度从常温升高至40 $^{\circ}\text{C}$ 后,长时间监测BGO探测器测量的 ^{137}Cs 的 γ 能谱,记录662 keV特征峰的峰道址变化。发现4 h后662 keV特征峰的峰道址稳定不变,证明BGO闪烁体的内部温度达到均衡。基于此结果,在测试中每次温度调节不超过10 $^{\circ}\text{C}$,温度达到后保持恒温4 h后再进行测量。本次实验的测量温度范围为-40~40 $^{\circ}\text{C}$,间隔10 $^{\circ}\text{C}$ 递减,共进行9个温度点的测量。在每个温度点改变SiPM的工作电压后测量 ^{137}Cs 的 γ 能谱,通过比较能量分辨率来优化BGO-SiPM探测器的工作电压参数。

此外,为对BGO-SiPM探测器中SiPM的温度效应贡献,采用同一晶体和PMT组装的BGO-PMT探测器进行对照测量,PMT采用北京滨松公司生产的CR173型号。

2 实验结果与讨论

2.1 不同温度下SiPM的击穿电压

SiPM的性能指标和所加载的过电压相关,过电压即工作电压和击穿电压的差值。一般,SiPM的击穿电压随温度降低而降低,从而影响最佳工作电压的选择。另一方面,SiPM有过电压限值,也需了解其不同温度下的击穿电压。本工作采用64个SiPM单元并联加电压方式,因此只能通过测量总暗电流和工作电压的关系研究SiPM阵列的击穿电压,会受到SiPM单元不均匀性的一定影响。测量时对SiPM阵列进行避光处理,避免光子入射引起暗电流的变化,暗电流和电压的数值均从ISEG的电源控制系统中读取。图2示出了40 $^{\circ}\text{C}$ 和20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下暗电流随工作电压的变化。可看出,在工作电压较低时,SiPM的暗电流随电压缓慢增加,当工作电压超过某特定值时,暗电流迅速上升。这一现象是电压达击穿电压后,

开始产生雪崩效应导致。因此,通过对击穿前后的趋势进行拟合并求其交点,即可得到不同温度下的击穿电压。

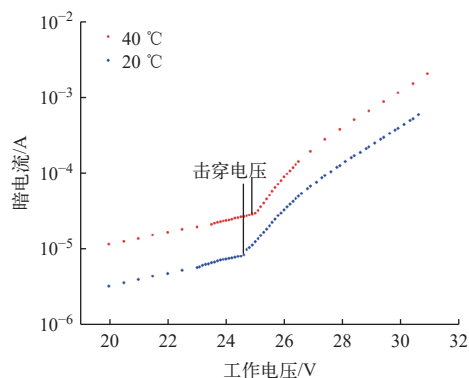


图2 不同温度下 SiPM 阵列的暗电流和工作电压的关系
Fig. 2 Dark current versus voltage plot of SiPM array at various temperatures

图3示出了 SiPM 阵列击穿电压随温度的变化关系。可看出,击穿电压和温度之间有良好的线性关系,对其进行线性拟合后得到击穿电压的温度变化系数为 $21.0 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ 。该变化系数与 SiPM 产品手册给出的典型值 $21.5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ [22] 基本一致。得到各温度下的击穿电压数据后,即可对最佳工作电压进行优化测试。

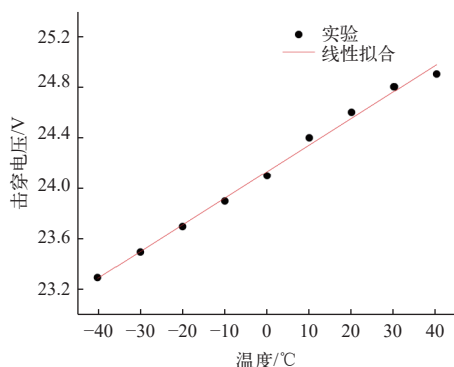


图3 SiPM 阵列的击穿电压和温度的关系
Fig. 3 Breakdown voltage versus temperature plot of SiPM array

另外,从图2还可看出, 20°C 下 SiPM 整体暗电流明显低于 40°C 下的结果,说明 SiPM 暗电流随温度降低而减小。图4示出了不同过电压下 SiPM 阵列的暗电流随温度的变化。可看出,在同一温度下, SiPM 的暗电流随过电压的提高而增大;在相同过电压下,暗电流随温度的升高而增大。

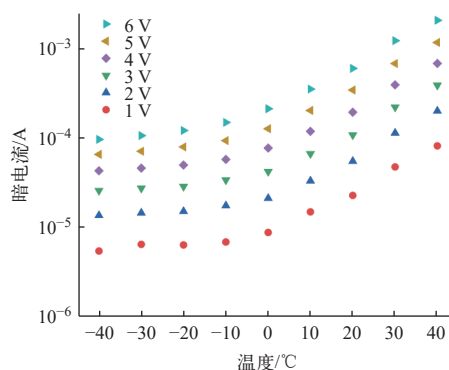


图4 不同过电压下 SiPM 阵列暗电流和温度的关系
Fig. 4 Dark current versus temperature plot for SiPM array at different overvoltages

大,且在 0°C 以上增速变大。

2.2 工作电压的优化

即使在同一温度下,不同的过电压下 SiPM 的光子探测效率(PDE)和暗电流均不同,造成 BGO-SiPM 探测器的能量分辨发生变化。为对 SiPM 的工作条件进行优化,得到最佳能量分辨率下的过电压参数,对各温度下的探测器能量分辨和过电压之间的关系进行研究。能量分辨率是通过对于 ^{137}Cs 的 662 keV 特征峰进行高斯拟合得到的,结果如图5所示。

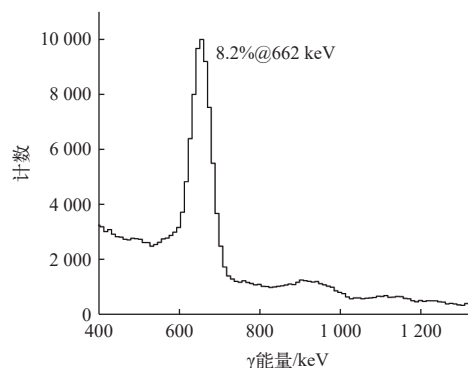


图5 -20°C 时 BGO-SiPM 探测器测得的 ^{137}Cs 源 γ 能谱
Fig. 5 Gamma energy spectrum of ^{137}Cs source measured by BGO-SiPM detector at -20°C

以 -40°C 和 10°C 温度点的测量为例,图6示出了 BGO-SiPM 探测器在不同过电压下的能量分辨率。可看出,能量分辨率随过电压的变化整体呈现中间低、两边高的趋势。分析其原因, SiPM 的 PDE、暗电流、串扰、后脉冲均随过电压的提升而增大。当过电压较低时,暗电流、串扰、后脉冲较少,对能量分辨率的贡献有限,因此 PDE 增大

带来的统计增强效应占优势,使得能量分辨率提升。但当过电压继续上升时,虽然PDE的提高仍在改进统计效应,但暗电流、串扰、后脉冲快速增大后,它们对能量分辨率的贡献变得不可忽略,总体造成能量分辨率反而略微变差。通过对图6显示的数据及其他温度下的数据进行拟合分析,找到每个温度下的最佳过电压参数。

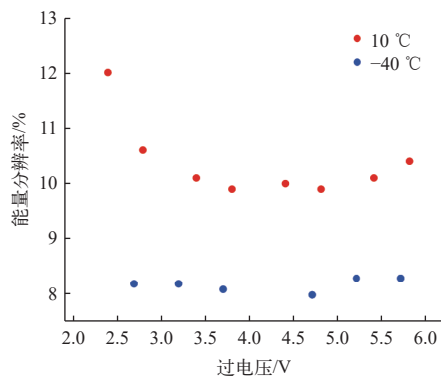


图6 -40 °C 和 10 °C 条件下 BGO-SiPM 探测器能量分辨率随过电压的变化

Fig. 6 Energy resolution of BGO-SiPM detector as a function of overvoltage at -40 °C and 10 °C

2.3 不同温度下 BGO-SiPM 探测器的最佳能量分辨率测量

采用最佳过电压参数,在各温度下利用 BGO-SiPM 探测器对 ^{137}Cs 源进行测量,得到其最佳能量分辨率,结果如图7所示,可看出,随着温度的降低能量分辨率显著提升。这一方面由 SiPM 的性能提升所致,更重要的原因是 BGO 自身的光产额增加而带来的统计提升效应^[19]。为更好探讨 SiPM 在其中的贡献,采用 PMT 读出进行对照测试。为确保条件一致, BGO-PMT 和 BGO-SiPM 探测器采用同一块 BGO 闪烁体,在相同的温度条件下进行测量。 BGO-PMT 探测器的测量结果也显示在图7中,和 BGO-SiPM 探测器的能量分辨率进行对比。

从图7可看出,与 BGO-PMT 探测器相比, BGO-SiPM 探测器的能量分辨率受温度变化的影响更大。在-40~40 °C, BGO-SiPM 探测器的绝对变化幅度为 8.4%,远大于 BGO-PMT 探测器的 4.4%。在 20 °C 以上, BGO-SiPM 探测器的能量分辨率迅速变差,主要原因是在该温度区间内 SiPM 的暗电流随温度的上升快速提高(图4),导

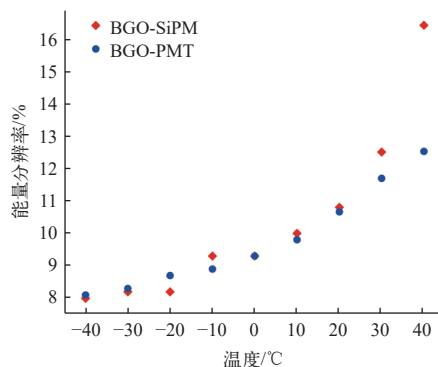


图7 不同温度下 BGO-SiPM 与 BGO-PMT 探测器的能量分辨率对比

Fig. 7 Comparison of energy resolution between BGO-SiPM and BGO-PMT detectors at different temperatures

致 BGO-SiPM 探测器信噪比下降。在-40~20 °C,二者能量分辨率差别较小,但随温度下降, BGO-SiPM 探测器的能量分辨率的提升速度略优于 BGO-PMT 探测器的,到-20 °C 及以下时, BGO-SiPM 探测器的能量分辨率超过 BGO-PMT 探测器。例如,在-20 °C 时, BGO-SiPM 探测器实现了 $(8.2\pm 0.1)\%$ 的能量分辨率,优于 PMT 的能量分辨率 $(8.7\pm 0.1)\%$ 。说明除去 BGO 闪烁体自身的温度特性, SiPM 的温度效应,如暗电流随温度下降而降低等,也对探测器能量分辨率的提升起到了一定作用。因此,在低温条件下,使用 SiPM 替代 PMT 作为 BGO 闪烁体的光电读出器件可实现更优的探测性能。

2.4 BGO-SiPM 探测器的峰道址温漂效应

在实际的应用中,由于 BGO 光产额的温度效应,温度漂移会导致 γ 峰位的漂移^[20],从而对长时间的实验测量造成影响,并导致能量分辨率下降。如前文所述, SiPM 的击穿电压随温度的上升而增大,如果使用时保持工作电压不变,则会导致过电压降低,从而导致 SiPM 的增益下降。 SiPM 增益和 BGO 光产额的温度效应正向叠加,进一步加剧 BGO-SiPM 探测器的峰道址温漂效应。为探讨这一效应,在 20 °C 附近小范围改变温度,并保持其他条件不变,对 ^{137}Cs 的 662 keV 特征峰的址进行测量,结果如图8所示。

由图8可看出,峰道址和温度之间有良好的线性关系,对其进行线性拟合后得到在 20 °C 附近, BGO-SiPM 探测器的温漂效应约 1.8%/°C,明显高于 BGO-PMT 的典型值 0.016%/°C^[20]。其原因

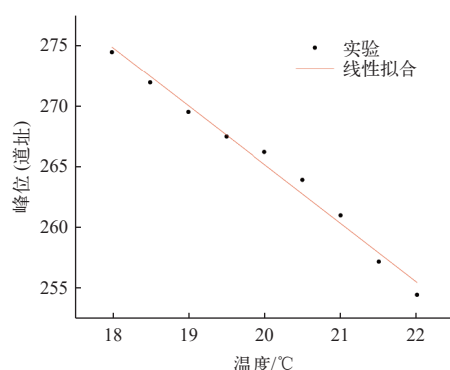


图8 BGO-SiPM探测器在20 °C附近峰道址温漂效应

Fig. 8 Temperature drift effect of peak position near 20 °C for BGO-SiPM detector

在于SiPM显著的增益温度效应。因此在将来的实际应用中,必须采取措施降低这一效应的影响。可采用的措施有:1)利用恒温装置稳定探测阵列的温度,如将温度变化控制在 ± 0.1 °C内,即可将峰道址变化控制在0.2%以内,远小于BGO-SiPM探测器的典型能量分辨率(10%),对探测器性能造成的影响很小;2)加装温度反馈补偿系统,即实时监测测量探测器温度,并根据温度变化调整SiPM的工作电压,使得峰道址保持不变^[16]。调整工作电压后,会使得过电压稍微偏离当前温度下的最佳参数,但由于能量分辨率在最佳过电压附近变化较小(图6),因此影响不大。

3 结语

本工作将尺寸为6 cm×6 cm×12 cm的大尺寸BGO闪烁体和SensL公司的8×8 SiPM阵列耦合,组成了BGO-SiPM探测器并对其在不同温度下的工作条件和性能进行了测试。通过改变环境温度,对SiPM阵列的击穿电压和温度的关系进行了标定。在-40~40 °C每隔10 °C对BGO-SiPM的工作电压进行了优化。利用最佳工作电压,测试了BGO-SiPM探测器在各个温度下的最佳能量分辨率,并与同一闪烁体组装的BGO-PMT探测器的结果进行了对比。结果表明,在20 °C以上,BGO-SiPM探测器的能量分辨率较差,在-20 °C及以下,BGO-SiPM探测器的能量分辨率略优于BGO-PMT探测器。这说明在低温条件下采用SiPM替代PMT作为BGO闪烁体的光电转换器件,能有效提升探测器的能量分辨率。但SiPM增益的温度效应和BGO光产额的温度效应正向叠

加,显著增强了BGO-SiPM探测器的峰道址温漂效应,实际应用中必须采取措施解决。以上工作为SiPM在BGO闪烁体阵列的应用上提供了重要的实验数据。

参考文献:

- [1] SIMON A, QUINN S J, SPYROU A, et al. Summing NaI(Tl) gamma-ray detector for capture reaction measurements[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2013, 703: 16-21.
- [2] RASCO B C, FIJAŁKOWSKA A, KARNY M, et al. The nonlinear light output of NaI(Tl) detectors in the modular total absorption spectrometer[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2015, 788: 137-145.
- [3] GUADILLA V, ALGORA A, TAIN J L, et al. First experiment with the NUSTAR/FAIR decay total absorption γ -ray spectrometer (DTAS) at the IGISOL IV facility[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2016, 376: 334-337.
- [4] REINGOLD C S, OLIVAS-GOMEZ O, SIMON A, et al. High efficiency total absorption spectrometer HECTOR for capture reaction measurements[J]. *The European Physical Journal A*, 2019, doi: 10.1140/epja/i2019-12748-8.
- [5] CASELLA C, COSTANTINI H, LEMUT A, et al. A new setup for the underground study of capture reactions[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2002, 489(1/2/3): 160-169.
- [6] SU J, ZHANG H, LI Z, et al. First result from the Jinping Underground Nuclear Astrophysics experiment JUNA: Precise measurement of the 92 keV $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ resonance[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(2): 125-132.
- [7] SHENG Y D, SONG L Y, SU J, et al. The large-scale modular BGO detection array (LAMBDA) design and test[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2024, doi: 10.1007/s41365-024-01574-3.
- [8] PIEMONTE C, GOLA A. Overview on the main parameters and technology of modern Silicon Photomultipliers [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2019, 926: 2-15.
- [9] SIMON F. Silicon photomultipliers in particle and nuclear physics[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2019, 926: 85-100.
- [10] LECOQ P, GUNDACKER S. SiPM applications in positron emission tomography: Toward ultimate PET time-of-flight resolution[J]. *The European Physical Journal Plus*, 2021, doi: 10.1140/epjp/s13360-021-01183-8.

- [11] AGISHEV R, COMERÓN A, BACH J, et al. Lidar with SiPM: Some capabilities and limitations in real environment[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 49: 86-90.
- [12] GRODZICKA M, MOSZYŃSKI M, SZCZĘŚNIAK T, et al. 2×2 MPPC arrays in gamma spectrometry with CsI(Tl), LSO:Ce(Ca), LaBr₃, BGO[C]//2011 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. Valencia, Spain: IEEE, 2011: 1683-1692.
- [13] GRODZICKA-KOBYLKA M, SZCZESNIAK T, MOSZYŃSKI M. Comparison of SensL and Hamamatsu 4×4 channel SiPM arrays in gamma spectrometry with scintillators[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2017, 856: 53-64.
- [14] SZCZESNIAK T, GRODZICKA-KOBYLKA M, MOSZYŃSKI M, et al. Performance of 2 inch and 3 inch scintillation detectors with SiPM light readout[C]//2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC). Atlanta, GA, USA: IEEE, 2017, doi: [10.1109/NSSMIC.2017.8533100](https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2017.8533100).
- [15] ZHANG Z, WANG D, FENG S, et al. A portable neutron gamma discrimination detector based on NaI and SiPM[J]. *Journal of Instrumentation*, 2022, doi: [10.1088/1748-0221/17/06/T06005](https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/06/T06005).
- [16] 雷文明, 李京伦, 艾宪芸, 等. SiPM-GAGG(Ce) 探测器 γ 能谱稳谱方法研究[J]. *原子能科学技术*, 2023, 57(7): 1425-1434.
LEI Wenming, LI Jinglun, AI Xianyun, et al. Study on gamma spectrum stabilization method for SiPM-GAGG(Ce) detector[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2023, 57(7): 1425-1434(in Chinese).
- [17] 刘涛, 肖明, 胡锐. 一种温度自适应硅光电倍增管偏压设计及验证[J]. *核电子学与探测技术*, 2024, 44(3): 479-485.
LIU Tao, XIAO Ming, HU Rui. Design and verification of SiPM temperature-adaptive bias voltage[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2024, 44(3): 479-485(in Chinese).
- [18] GIRONNET J, MIKHAILIK V B, KRAUS H, et al. Scintillation studies of Bi₄Ge₃O₁₂ (BGO) down to a temperature of 6 K[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2008, 594(3): 358-361.
- [19] BOATNER L A, NEAL J S, KOLOPUS J A, et al. The characterization of scintillator performance at temperatures up to 400 degrees centigrade[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2013, 709: 95-107.
- [20] 裴常进, 苏俊, 李志宏, 等. 大尺寸 BGO 晶体的温度特性研究[J]. *原子能科学技术*, 2018, 52(52): 140-144.
PEI Changjin, SU Jun, LI Zhihong, et al. Study of temperature sensitivity of large BGO crystal[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, 52(52): 140-144(in Chinese).
- [21] WU H, LI Z, WU J, et al. A general-purpose data acquisition system and a waveform analysis algorithm based on digitization[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(27): 3553-3560.
- [22] Onsemi. Silicon Photomultipliers (SiPM): High PDE and timing resolution sensors in a TSV package[EB/OL]. <https://www.onsemi.com/products/sensors/photodetectors-sipm-spac/silicon-photomultipliers-sipm/j-series>.