

多像素光子计数器的能量分辨性能测试

柴林^{1,2} 王涵^{1,2} 吴佳玲^{1,2} 屈卫卫^{1,2,3} 文万信^{1,2,3} 张高龙⁴

1 (苏州大学 放射医学与辐射防护国家重点实验室 苏州 215123)

2 (苏州大学医学部放射医学与防护学院 苏州 215123)

3 (江苏省高校放射医学协同创新中心 苏州 215123)

4 (北京航空航天大学 物理科学与核能工程学院 北京 100191)

摘要 随着新型光电转换器件技术的快速发展,多像素光子计数器(Multi Pixel Photon Counter, MPPC)逐渐被应用到核辐射探测等相关领域。本文将MPPC分别与碘化铯(CsI)、碘化钠(NaI)以及锗酸铋($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, BGO)闪烁晶体进行光学耦合,测量 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 两种 γ 射线放射源的三个特征峰的能谱,测试结果与光电倍增管(Hamamatsu H7195)和闪烁晶体耦合所测得的结果进行了对比。此外,用自制的前置放大器与波形数字采样器(CAEN DT5730)对MPPC的输出信号进行了采集测试。结果表明:MPPC相比于光电倍增管,其能量分辨率稍差,但是具有相当的能量线性。

关键词 多像素光子计数器, 能量分辨率, 线性, 闪烁晶体, 波形数字采样器

中图分类号 O571.1, TL812⁺.1

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.090403

Energy resolution performance testing for multi-pixel photon counter

CHAI Lin^{1,2} WANG Han^{1,2} WU Jialing^{1,2} QU Weiwei^{1,2,3} WEN Wanxin^{1,2,3} ZHANG Gaolong⁴

1(State Key Laboratory of Radiation Medicine and Protection, Soochow University, Suzhou 215123, China)

2(School of Radiation Medicine and Protection, Medical College of Soochow University, Suzhou 215123, China)

3(Collaborative Innovation Center of Radiological Medicine of Jiangsu Higher Education Institutions, Suzhou 215123, China)

4(School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract [Background] With the development of semiconductor photon detector technology, a novel signal readout device named multi pixel photon counter (MPPC) has gradually been developed and applied in radiation detection. [Purpose] This study aims to verify the performance of the MPPC and compare it with photomultiplier tube (PMT) in linearity and energy resolution. [Methods] First of all, scintillation detectors with MPPC coupling with scintillation crystals such as thallium-doped sodium iodide (NaI(Tl)), CsI, and $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) crystals was constructed to test three characteristic γ -ray energy peaks of ^{137}Cs and ^{60}Co . Then the same tests were done with PMT (Hamamatsu H7195) coupling with these crystals as the parallel experiments. Simultaneously, the output signal of the MPPC was collected by using a waveform digitizer (CAEN DT5730) and a self-made pre-amplifier. [Results] The results show that the MPPC has a slightly worse energy resolution compared to that of PMT, but reserves a similar

国家自然科学基金青年基金项目(No.11705123)、江苏省自然科学基金青年项目(No.BK20160306)、国家博士后基金面上项目(No.2016M591911)、国家重大科学仪器专项(No.2013YQ04086102)资助

第一作者: 柴林, 男, 1989年出生, 2012年毕业于吉林医药学院, 现为硕士研究生, 研究领域为医学物理剂量计算及测量

通信作者: 屈卫卫, E-mail: wwqu@suda.edu.cn

收稿日期: 2018-05-21, 修回日期: 2018-07-08

Supported by National Natural Science Fund Youth Fund Project (No.11705123), Jiangsu Natural Science Fund Youth Project (No.BK20160306), China Postdoctoral Science Foundation (No.2016M591911), National Key Scientific Instrument and Equipment Development Projects (No.2013YQ04086102)

First author: CHAI Lin, male, born in 1989, graduated from Jilin Medical University in 2012, master student, focusing on dose calculation and measurement in medical physics

Corresponding author: QU Weiwei, E-mail: wwqu@suda.edu.cn

Received date: 2018-05-21, revised date: 2018-07-08

energy linearity. **[Conclusion]** This MPPC could be applied in circumstances such as the space detection and medical applications instead of PMT.

Key words Multi-pixel photon counter, Energy resolution, Linearity, Scintillation crystal, Waveform digitizer

闪烁晶体探测器主要为无机闪烁晶体, 它成本低以及具有工艺上制作大体积晶体的可能性, 因此被广泛应用于 γ 射线谱仪。碘化钠(NaI)、碘化铯(CsI)以及锗酸铋($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, BGO)是最常见的闪烁晶体, 应用于核辐射探测相关领域, 如航天、核医学成像及高能物理等^[1-4]。光电倍增管是闪烁晶体探测器中最常用的光电转换器件, 但是传统的光电倍增管存在一些缺点, 如: 体积大、易碎、高工作电压、对磁场的敏感性以及制造工艺复杂等。随着新型光电转换器件技术的快速发展, 硅光电倍增管(Silicon Photomultiplier, SiPM)已经得到越来越多的应用。本工作中使用的 SiPM 器件多像素光子计数器(Multi Pixel Photon Counter, MPPC)是由日本滨松光学株式会社开发的一种基于硅雪崩二极管的光子计数装置。其中每个像素(Pixel)是指一个工作在雪崩状态下的二极管探测器(Avalanche Photo Diode, APD), 每个像素包含一个淬熄电路, 发生的光子事件被高精度记录。该器件的特色是采用了盖革模式雪崩光电二极管结构来实现超低量级光探测, 从而在较小的体积、较低的工作电压和较小入射强度下具有较高的增益; 因此, 可以探测强度很弱的光信号, 且对紫外及蓝光探测效率更高。MPPC 具有耐辐照、工作电压低、功率小以及不受磁场影响等优点。基于以上优点, MPPC 已经成为核医学领域(如: Positron Emission Tomography-CT, PET-CT 或者 Single-Photon Emission Computed Tomography-CT, SPECT-CT 成像)以及空间辐射探测领域的唯一选择^[5-8]。

本工作主要从 MPPC 的基本性能着手, 对 γ 射线能谱进行测量, 目的是了解 MPPC 与光电倍增管在能量分辨率、能量线性等方面的差别, 为实验室开展的空间辐射探测器系统的研制提供参考。

1 实验测量

本测试中使用了日本滨松株式会社生产的 MPPC, 型号为 S13360-6050CS, 灵敏面积为 $6.0\text{ mm} \times 6.0\text{ mm}$, 总像素点的数量为 14 400 个, 光谱响应范围为 270~900 nm, 其中最高为 450 nm。测量中 MPPC 的供电电源使用了 ORTEC 710 插件, 该插件具有电流保护功能, 当电流大于 $20\text{ }\mu\text{A}$ 时会自动断电。为了使 MPPC 发生雪崩, 且电流不大于 $20\text{ }\mu\text{A}$, 因此在 MPPC 供电的电路中, 选择较大的

30 k Ω 电阻。MPPC 输出信号连接到谱仪放大器, 对信号进行放大。采用的主放大器型号为 ORTEC 572A, 多道分析器为 ORTEC 926B, 通过 USB2.0 电缆与计算机进行连接, 结合 MAESTRO 程序对 γ 射线能谱进行记录。测试中碘化钠晶体直径为 2.54 cm, 高度为 2.54 cm; 锗酸铋晶体直径为 2.54 cm, 高度为 2.54 cm; 碘化铯晶体直径为 3.81 cm, 高度为 3.81 cm。MPPC 或光电倍增管与闪烁晶体之间采用了美国 ELJEN TECHNOLOGY 公司生产的 EJ-550 光学硅脂作为光学耦合剂, 闪烁晶体的反光层采用铝膜以及 Teflon 对其进行包裹, 并使用铝合金外壳进行避光处理, 从而制得闪烁晶体探测器。为了得到较好的能量分辨率, 需要屏蔽地球磁场; 光电倍增管(Hamamatsu, H7195)配备了磁屏蔽外壳, 可以有效减弱磁场对电子渡越过程的影响。实验中使用 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 两种 γ 放射源对 MPPC 能量分辨率以及能量线性进行测试。实验框图如图 1 所示, MPPC 偏压电路的设计^[9]如图 2 所示。

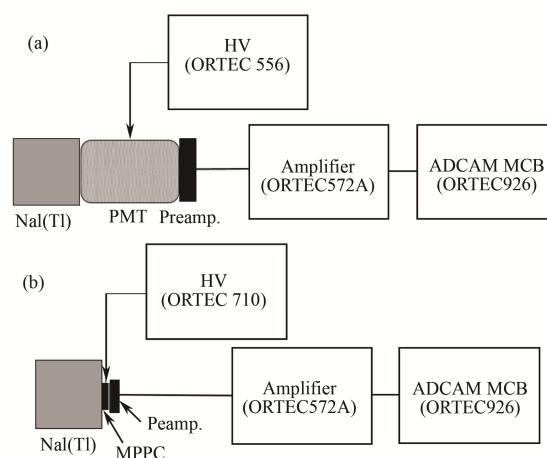


图 1 实验中 PMT 测试系统的电路搭建框图(a)以及 MPPC 测试系统的电路搭建框图(b)
Fig.1 The circuit block diagram of the PMT test system (a) and the MPPC test system (b)

本实验也通过数字波形采样器对上述三种闪烁晶体探测器进行了数据的采集。数字波形采样器是一种新型的数据获取方式, 其通过内部控制芯片现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)对采样点数据进行线性处理, 并输出所需要的波形信息。工作中选用的波形数字采样器是由意大利 CAEN 公司生产的 x730 数字波形采样器和

DPP-PSD (Digital Pulse Processing-Pulse Shape Discrimination)软件控制系统^[10]。其中数字波形采样器选择使用 USB 连接线与计算机连接, DPP-PSD 是由计算机控制的独立功能模块系统。计算机首先通过控制 DPP-PSD 系统操作界面进而控制软件记录和输出单通道或多个通道输入的信号, 然后再根据探测器输入脉冲信号信息进行相关参数的调节 (如: 触发阈值(Threshold)、长、短门宽度(Q_{long} , Q_{short})参数等), 最终实现对能量谱、时间谱、PSD 谱^[11]等信息的记录。DPP-PSD 系统操作界面具有两种显示功能: 直方图(Histogram)和示波器(Oscilloscope)模式, 前者主要控制显示时间谱、能量谱和 PSD 谱, 后者主要显示探测器输入信号的波形谱, 可以根据输入信号脉冲上升时间和下降时间大小来调节长短门参数值, 使长短门宽度都能将脉冲信号覆盖, 目的是为了提高软件系统对所需信息记录的精确度。

MPPC 输出信号是一个上升时间很快的脉冲信号, 信号幅度也比较小。为了把微弱的电流信号转

变成电压信号, 并且获得最佳的信噪比, 本次测试选用跨阻式接法放大电路对信号进行放大处理^[12], 根据输入信号幅度选择合适的放大倍数, 使信号放大到能够触发数字波形采样器触发阈值, 使其对 MPPC 输出信号相关谱进行记录, 这样可以实现更快数据采集和实验线路的简化等优点。前放电路如图 3 所示。

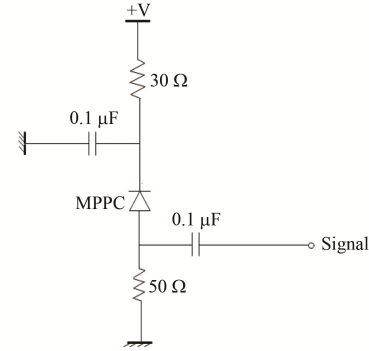


图 2 MPPC 信号读出电路
Fig.2 The MPPC signal readout circuit

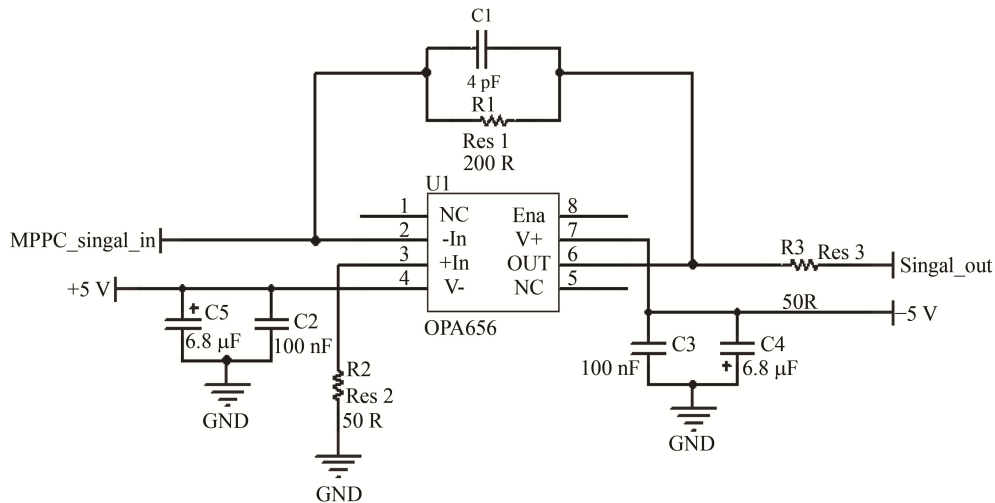


图 3 MPPC 信号放大电路
Fig.3 Readout circuit of the pre-amplifier for MPPC

该电路选择美国 TI 公司生产的 OPA656 芯片作为跨阻放大电路设计的核心芯片, 该芯片具有高增益稳定带宽, 以及良好的光学应用精度, 适合应用于弱光检测。电路中 C1 (4 pF) 电容主要是作为补偿电容, 目的为了防止电路本身产生自激。C2-C5 为电源滤波电容, 其中 C4、C5 选用钽电解电容, 主要用于过滤电源中的低频噪声, C2、C3 选用瓷片电容, 主要用于过滤电源中的高频噪声。实验过程中, 信号传输线选用特性阻抗为 50 Ω 的同轴电缆屏蔽线, 考虑信号在传输过程中损失最小, 在输出端

选用连接 50 Ω 电阻, 主要用于阻抗匹配。

2 结果与讨论

采用基于 C++ 语言的 ROOT 分析软件^[13]对数据进行了分析。通过扣除本底, 并用多高斯函数对特征 γ 射线的全能峰进行拟合, 得到不同条件下 MPPC 和光电倍增管对 γ 射线的能量分辨率(Full Width with Half Maximum, FWHM)。对比每种耦合方式的能量分辨率, 如表 1 所示。

表 1 三种闪烁晶体分别通过两种光电转换器件进行能量分辨率测试的结果(%)

Table 1 Energy resolution of three scintillation crystals with two kinds of photon-electron converter (%)

晶体 Crystal	光电器件 Photodevice	662 keV (^{137}Cs)	1 173 keV (^{60}Co)	1 332 keV (^{60}Co)
NaI	MPPC	11.8	8.1	5.3
	PMT	8.5	5.2	3.8
CsI	MPPC	13.5	10.8	12.2
	PMT	10.1	8.8	10.5
BGO	MPPC	18.9	10.9	12.0
	PMT	10.8	11.7	11.6

由表 1 数据对比发现,在多数情况下光电倍增管相比于 MPPC 具有更好的能量分辨率。造成 MPPC 能量分辨率与光电倍增管有较大差别的原因有以下几个方面:第一, MPPC 供电电路带来的噪音对测试结果存在影响,需要后续的改进;第二, MPPC 由于灵敏面积的限制,接收光的面积与闪烁晶体的尺寸有差别,造成光传输的损失以及散射。后续使用中,采用光导能够解决这个问题。其中,通过传统多道分析器测量 MPPC、光电倍增管分别与 NaI 晶体耦合得到的能谱如图 4 所示。通过对全能峰的面积进行积分可以得到光电倍增管与 MPPC 的光电转换效率的比较,效率转换如图 5 所示。

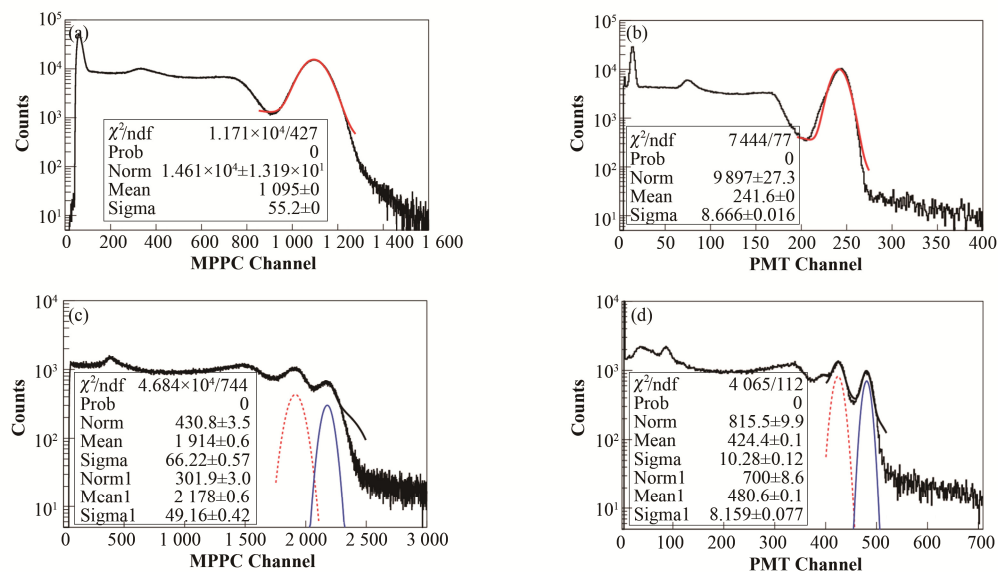
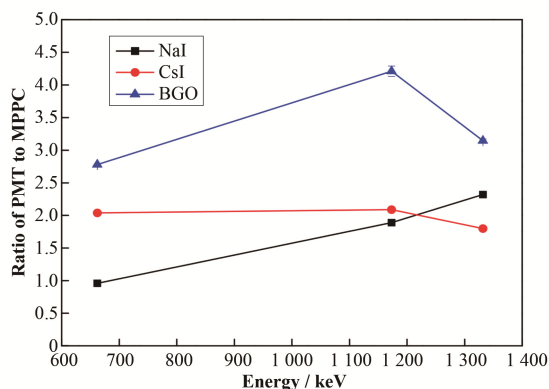
图 4 多道分析器测量的 NaI 闪烁晶体分别与 MPPC 耦合的 ^{137}Cs (a) 以及 ^{60}Co 能谱(c), 以及与光电倍增管耦合的 ^{137}Cs (b) 以及 ^{60}Co 的能谱(d)Fig.4 Energy spectra for ^{137}Cs (a) and ^{60}Co (c) source with NaI crystals coupling with MPPC, and energy spectra for ^{137}Cs (b) and ^{60}Co (d) source with photomultiplier tube

图 5 三种闪烁晶体分别通过光电倍增管与 MPPC 进行光电转换得到的几种特征峰的全能峰计数比值

Fig.5 The ratio of full-energy peak area obtained by PMT and MPPC coupled with NaI, CsI and BGO crystals

从图 5 可以看到,对于 CsI 晶体可以近似看到比值为 2。BGO 则表现出较大的波动; NaI 晶体的结果对 ^{60}Co 的两个特征峰也近似在 2。由此说明,光电倍增管的光电转换效率为 MPPC 的两倍左右。

能量线性是能谱型探测器的关键指标,为此本实验对 MPPC 耦合 NaI 晶体进行能量线性测试。将三个特征 γ 射线峰位置的道数值与能量之间的关系进行拟合,拟合结果表明 MPPC 对 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 三个特征 γ 射线的能量呈线性,如图 6 所示。由图 6 可以发现, MPPC 在两种 γ 射线放射源的测量中,保持了很好的线性关系,能够用于能谱的测量。

基于数字波形采样器快速波形采集的特点,结合 DPP-PSD 控制软件,通过 MPPC 输出信号的脉冲时间信息和幅度信息来调节长短门宽度(Q_{long} ,

Q_{short})和触发阈值(Threshold),使数字波形采样器记录相应特征 γ 射线能谱、PSD谱。其中, MPPC耦合 NaI 晶体并与数字波形采样器连接,所得到的 γ 射线能谱和 PSD 谱,如图 7 所示。

从图 7 可以看出,使用数字波形采样器得到的能量分辨率和传统多道分析器的结果很接近。图 6(c)中 PSD 谱能很容易看到 ^{137}Cs 的全能峰,将 PSD 进行对 X 轴投影,可以得到图 7 中(a)的能谱。测试中数字波形采样器能够实现与主放大器匹配传统多道相同的测量结果,且大大简化了电子学的线路。

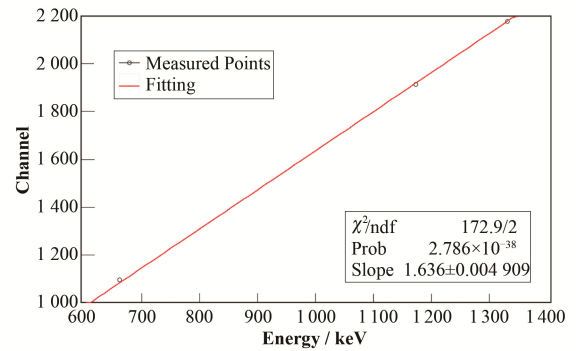


图 6 MPPC 与 NaI 晶体耦合的能量线性的结果
Fig.6 Energy linearity of the coupling of MPPC with NaI(Tl) crystals

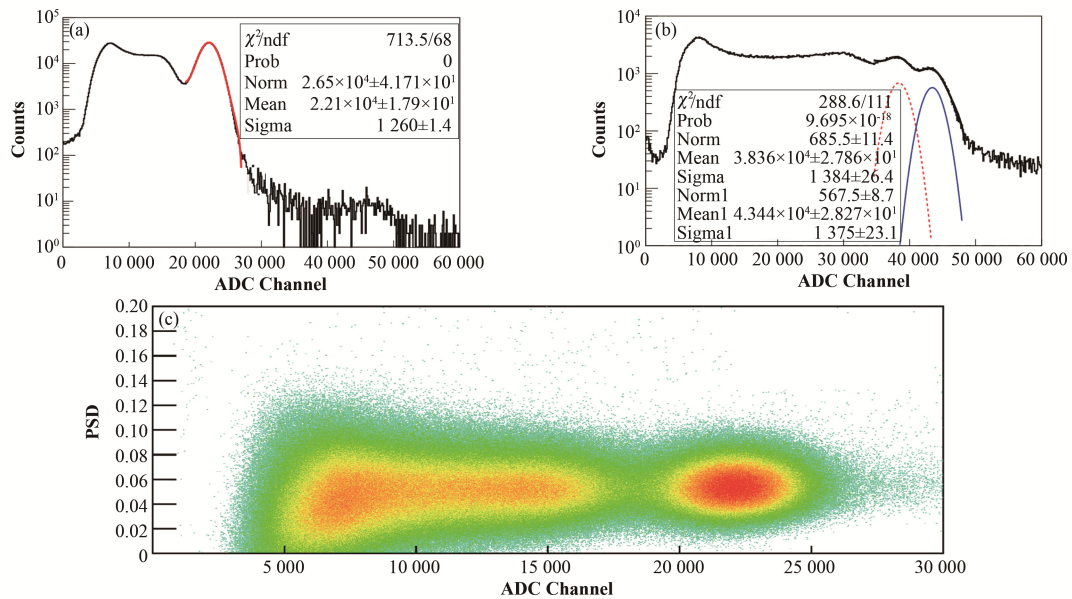


图 7 NaI 闪烁晶体与 MPPC 耦合并用数字波形采样器采集 ^{137}Cs (a)以及 ^{60}Co (b)能谱、以及 ^{137}Cs PSD 谱记录图(c)
Fig.7 Spectra of ^{137}Cs (a) and ^{60}Co (b) sources with NaI scintillation crystals coupling with MPPC which were obtained by CAEN desktop digitizer. The PSD spectrum of ^{137}Cs source is shown at the bottom (c)

3 结语

MPPC 与 NaI、CsI 及 BGO 晶体进行耦合,测量了 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 两种放射源的三个特征 γ 射线能量峰,并与光电倍增管和闪烁晶体耦合(Hamamatsu H7195)进行对比,得到了 MPPC 与光电倍增管的能量分辨率性能的差别。实验表明:相同测试环境下, MPPC 测得的 γ 放射源的能量分辨率低于光电倍增管所测量的结果,但 MPPC 有着与光电倍增管相当的能量线性。分辨率的差别可能来自于光导或者偏压电路和前放的噪音。MPPC 具有体积小、耐辐照、工作电压低、时间响应好等优点,因此 MPPC 能够用代替常规的光电倍增管于传统的核辐射探测领域。同时,数字波形采集器结合自制的前置放大器能够实现对 MPPC 脉冲信号的读出,并与传统的主

放大器匹配传统多道分析器具有相同的性能,且提高效率。

参考文献

- 1 许浒,程翀,刘翎箭,等. 闪烁体耦合 SiPM 测量 γ 能谱的模拟研究[J]. 核技术, 2017, 40(1): 010401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.010401.
XU Hu, CHENG Chong, LIU Lingjian, *et al.* Simulation study of scintillation crystal photocoupling with SiPM for gamma spectrometry[J]. Nuclear Techniques, 2017, 40(1): 010401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.010401.
- 2 Huang T C, Fu Q B, Lin S P, *et al.* NaI(Tl) scintillator read out with SiPM array for gamma spectrometer[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2017, 851: 118–124. DOI: 10.1016/j.nima.2017.01.068.
- 3 Shirakawa Y. Developments of directional detectors with

- Nal(Tl)/BGO scintillators[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2004, **213**: 255–259. DOI: 10.1016/S0168-583X(03)01603-3.
- 4 丁洪林. 核辐射探测[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.
DING Honglin. Nuclear radiation detection[M]. Harbin: Harbin University of Engineering Press, 2010.
- 5 Soto O, Rojas R, Kuleshov S, *et al.* Novel hamamatsu multi-pixel photon counter (MPPC) array studies for the GlueX experiment: new results[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2014, **739**: 89–97. DOI: 10.1016/j.nima.2013.12.032.
- 6 Kato T, Kataoka J, Nakamori T, *et al.* Development of a large-area monolithic 4×4 MPPC array for a future PET scanner employing pixelized Ce:LYSO and Pr:LuAG crystals[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2011, **638**(1): 83–91. DOI: 10.1088/0031-9155/54/11/015.
- 7 Eraerds P, Legré M, Rochas A, *et al.* SiPM for fast photon-counting and multiphoton detection[J]. Optics Express, 2007, **15**(22): 14539–14549. DOI: 10.1364/OE.15.014539.
- 8 谢肇恒, 周坤, 李素莹, 等. 用于核医学成像的硅光电倍增管光电探测器的研究进展[J]. 中国医疗设备, 2016, **31**(9): 73–79. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1633.2016.09.019.
XIE Zhaoeng, ZHOU Kun, LI Suying, *et al.* Progress in the research of silicon photomultiplier photodetectors for nuclear medicine imaging[J]. China Medical Equipment, 2016, **31**(9): 73–79. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1633.2016.09.019.
- 9 马付平, 张广鑫, 张高龙, 等. 多像素光子计数器(MPPC)的性能测试[J]. 物理与工程, 2015, **25**(4): 38–41. DOI: 10.3969/j.issn.1009-7104.2015.04.008.
MA Fuping, ZHANG Guangxin, ZHANG Gaolong, *et al.* Performance test of multi-pixel photon counter (MPPC)[J]. Physics and Engineering, 2015, **25**(4): 38–41. DOI: 10.3969/j.issn.1009-7104.2015.04.008.
- 10 常乐. EJ339A 俘获门控探测器的性能研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2015.
CHANG Le. Research on the performance of EJ339A capture door control detector[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2015.
- 11 常乐, 刘应都, 杜龙, 等. EJ301 液体闪烁体探测器的波形甄别和能量刻度[J]. 核技术, 2015, **38**(2): 020501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.020501.
CHANG Le, LIU Yingdu, DU Long, *et al.* Pulse shape discrimination and energy calibration of EJ301 liquid scintillation detector [J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(2): 020501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.020501.
- 12 谭晓明, 蒲忠胜, 魏志勇, 等. SiPM 核辐射探测器电路设计[J]. 核电子学与探测技术, 2016, **36**(4): 371–375. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.04.006.
TAN Xiaoming, PU Zhongsheng, WEI Zhiyong, *et al.* Circuit Design for SiPM Nuclear Radiation Detector [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, **36**(4): 371–375.
- 13 Brun R, Rademakers F. ROOT - an object oriented data analysis framework[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1997, **389**: 81–86. DOI: 10.1016/S0168-9002(97)00048-X.