

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105880

深海瞬发俘获型中子探测器信号测量电路设计*

郑雯文^{1,2} 曹平^{1,2} 汪晓虎^{1,2}

(1. 中国科学技术大学核探测与核电子学国家重点实验室 合肥 230026; 2. 中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

摘要: 深海中蕴藏着丰富的矿产资源,掌握深海探测技术有着重要的战略意义。为了探测深海热液喷口附近的海底结核矿物,设计了搭载深海原位实验室的瞬发俘获型中子探测器的信号测量电路。探测器基于中子瞬发俘获反应原理,并利用安装在其结构内部的锗酸铋闪烁晶体,接受并分析被测核素经由中子激发后退激所产生的特征 γ 射线,以实现核素种类的鉴别。针对深海瞬发俘获型中子探测器对电子学系统的要求,使用硅光电倍增管阵列设计了8通道、低功耗的探测信号测量电子学系统原型并在实验室搭建平台对系统的电子学性能和能量分辨率进行了测试。结果表明,所设计的电子学系统与该探测器锗酸铋晶体和硅光电倍增管配套使用时,对1 275 keV 伽玛射线的能量分辨率可以达到9.9%,满足该类探测器的性能需求。

关键词: 深海;信号测量电子学;硅光电二极管

中图分类号: TL8 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 490.15

Design of signal measurement circuit for deep sea prompt Gamma ray spectrometer

Zheng Wenwen^{1,2} Cao Ping^{1,2} Wang Xiaohu^{1,2}(1. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: There are abundant mineral resources in the deep sea, and it is of great significance to master deep-sea exploration technology. In order to detect the seafloor nodule minerals near the deep-sea hydrothermal vents, a signal measurement circuit on the prompt Gamma ray detector equipped with the deep-sea in-situ laboratory was designed. The detector is based on the principle of prompt Gamma Neutron activation analysis, using BGO (Bismuth Germanium Oxide) crystals installed in its structure to receive and analyze the characteristic Gamma rays generated by the nuclear de-excitation to identify the species of nuclide. To meet the requirements of the electronic system of deep-sea prompt Gamma ray detector, Silicon Photomultipliers (SiPMs) are used to design an 8-channel, low-power signal measurement electronic system. The electronic performance and energy resolution of the system were tested in the laboratory. The results show that when the electronic system designed in this paper is used with the detector BGO crystal and SiPM, the energy resolution of the spectrometer is 9.9% @ 1 275 keV, which meets the requirement of this type of detector.

Keywords: deep sea; signal measurement electronics; Silicon Photomultiplier

0 引言

随着科技的发展和生产力的提高,人类对世界的认识不断推进。对上至外太空下至深海的探索能力已经成为衡量一个国家科技实力乃至综合国力的重要象征。由于深海中不仅存在包含锰、铁、钴、镍、铜等几十种元素在内的矿产资源,还储存有大量的海底石油、天然气、可燃冰等重要能

源,因此发展深海探测有重要的战略意义^[1]。国外例如日本利用 JAMSTEC 深海伽玛探测器、英国利用 BGS 深海伽玛探测器都开展过深海核辐射探测^[2-3]。

目前深海核辐射探测主要通过载人潜水器(human occupied vehicle, HOV)、无缆自控潜水器(autonomous underwater vehicle, AUV)、缆控潜水器(remote operated vehicle, ROV)三种平台来实现^[4]。深海原位实验室是一种

收稿日期:2021-03-03

* 基金项目:中科院先导专项 A 子课题(XDA22020061)、安徽省杰出青年科学基金项目(1808085J22)、国家自然科学基金项目(U1832117)资助

属于 AUV 的着陆器,由母船携带至目标海域后下潜,工作时与母船没有连接,依靠自身携带的电池维持运行。传统的深海核辐射探测主要是被动地探测环境中的核辐射背景及异常情况,针对深海探测中对稀土元素等特殊核素的探测需求,携带中子源,利用瞬发 γ 射线中子活化分析技术 (PGNAA) 进行探测的中子探测器是必要的。

瞬发 γ 射线中子活化分析技术最早发表于 1965 年。1968 年 Comar 利用导管中子束实现了 PGNAA 技术。随后 PGNAA 技术不断发展,灵敏度和准确度日渐提高,美国 NIST 研究所和日本 JAERI 研究所相继建立了冷中子束的中子活化分析装置^[5]。2009 年,韩国原子能研究中心利用 Cf-252 作为中子源进行了将 PGNAA 技术应用于爆炸物检测的研究,国内东北师范大学也利用 D-D 中子发生器作为中子源将 PGNAA 技术应用于水泥生料检测。目前 PGNAA 技术已经广泛应用于探矿、无损检测、爆炸物识别等多个领域。但目前还没有在深海中使用 PGNAA 技术对海底矿物进行探测的研究报道。

本文提出了一种搭载深海原位实验室进行海底矿物核素探测的深海瞬发俘获型中子探测器测量电路设计,并在实验室进行了能谱测试。结果表明该测量电路功耗低、适合长时间自主运行,室温 ($20 \pm 5^\circ\text{C}$) 下对 1 275 keV 伽玛射线的能量分辨率可以达到 9.9%,能够满足能量分辨率 (FWHM) $\leq 10\%$ @ 2.5 MeV 的设计要求。

1 探测器工作原理和整体结构

瞬发 γ 射线中子活化分析是一种核素成分分析时常用的方法,在石油测井、煤成分分析、矿物成分分析中都有广泛的应用^[6-9]。PGNAA 的原理是利用中子与核素的原子核相互作用产生的信息来对核素进行鉴别和定量分析。中子与原子核发生核反应过程可分为散射和俘获两大类,其中散射分为弹性散射和非弹性散射。俘获反应过程中,中子可以被原子核吸收,从而形成一种中间态的核素,该核素会在 10^{-14} s 内退激,退激的同时会产生 γ 射线或新的带电粒子。通过检测这种核素退激时产生的特征 γ 射线,可以实现对核素的检测^[10-11]。

深海瞬发俘获型中子探测器主要由小型中子发生器、闪烁体探头、光电转换器件与信号测量电子学系统组成,整体结构如图 1 所示,电子学模块的实物如图 2 所示。探头使用 BGO 晶体,由于一般感兴趣核素发生俘获反应后的特征伽玛射线能量在 MeV 量级,BGO 晶体密度大、原子序数高,常用于高能伽玛射线的探测^[12]。深海探测对探测器整体的体积有较大的限制,希望探测器体积越小越好,这必然要求系统设计具备紧凑的结构。因此体积小、工作电压相对较低、对磁场不敏感的 SiPM(硅光电倍增管)被选为该探测器 BGO 闪烁体探头的光电转换器件。SiPM 又叫多像素光子计数器 (multi-pixel photon counter, MPPC),由一系列工作在盖革模式下的雪崩光二极管 (APD) 并联构成。

每一个 APD 称作一个像素,当有光子达到 APD 时,该 APD 会发生雪崩,产生输出信号。多个 APD 并联时,输出信号大小反映了入射光子的数量,实现光电倍增的功能^[13],常用于对系统体积、工作环境等有要求的场合中^[14-16]。探测器工作时,安装在其内部中心的紧凑型中子发生器将会在电子学控制电路的控制下向待测物质发射出具有一定产额的中子,该中子经过海水慢化后将与特定核素发生俘获反应并在很短的时间内释放出特征伽玛射线,这些特征伽玛射线将在探测器 BGO 晶体探头中沉积能量并产生荧光光子。荧光光子到达前端模块的 SiPM,转换成电压信号,经过模拟调理后由高速 ADC 进行模数转换,然后将获得的数字信号传输至 FPGA 进行数值积分、能谱累计等进一步处理,从而完成一次完整的信号测量采集和处理过程。信号测量电子学由前端模块和数据采集模块构成,是该类型中子探测器的关键核心电子学部件,其需要完成对光电转换信号的实时测量和处理,还需要将其按照特定的工作协议和流程要求,实现对探测器配置、控制以及最终采集测量数据的传输等功能。

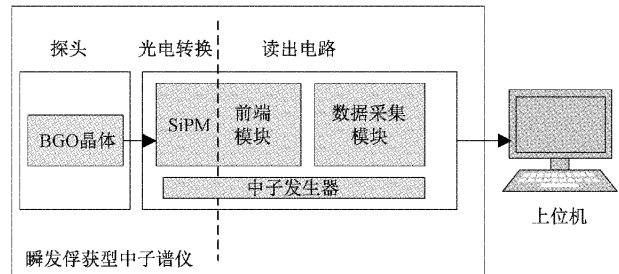


图 1 深海瞬发俘获型中子探测器的整体结构

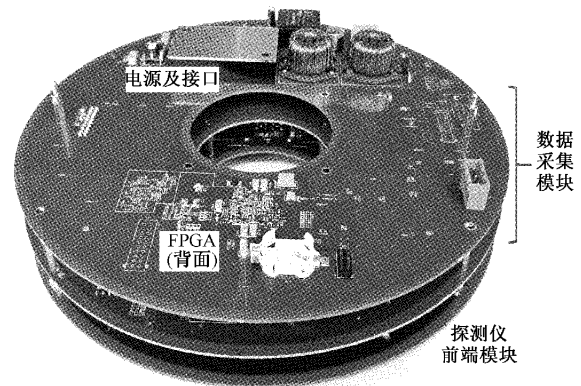


图 2 瞬发俘获型中子探测器电子学模块实物

2 信号测量电子学系统设计

信号测量电子学系统的整体结构如图 3 所示,包括探测器前端模块 (front-end module, FEM)、数据采集模块 (data acquisition module, DAM) 和上位机。前端模块接收来自探测器的电流信号,并将其转化为电压信号送入数据采集模块,同时通过温度传感器进行温度采集。数据采集

模块根据上位机或时间表指令控制整个系统的工作,主要包括指令解析,数据采集与存储,SiPM 偏置调节以及中子管的控制。

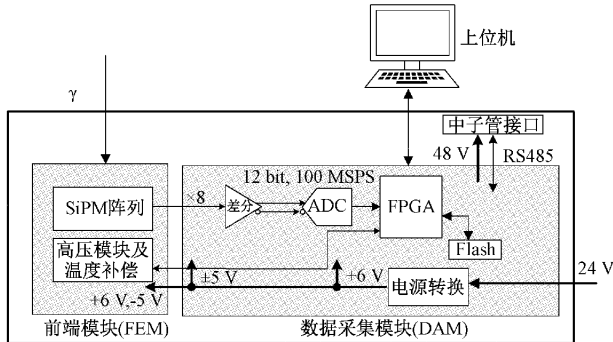


图3 信号测量电子学系统的整体结构

2.1 探测器前端模块设计

前端模块(FEM)主要包括 SiPM 与晶体之间的贴装(为 SiPM 提供摆放位置)以及 SiPM 工作所需的高压模块和温度补偿模块。前端模块的整体结构如图4所示。为了提高探测效率,使用多块晶体同时进行探测,与之相适应要使用多块 SiPM,同时每块 SiPM 要面积尽量大,尽可能多地覆盖闪烁体的荧光光子出射面。该前端模块中 SiPM 使用的是安森美半导体公司 J 系列 SiPM 阵列 ARRAYJ-60035。该系列 SiPM 传感器填充系数高,同样面积下死区小,有利于提高光电转换效率(photon detection efficiency, PDE)。

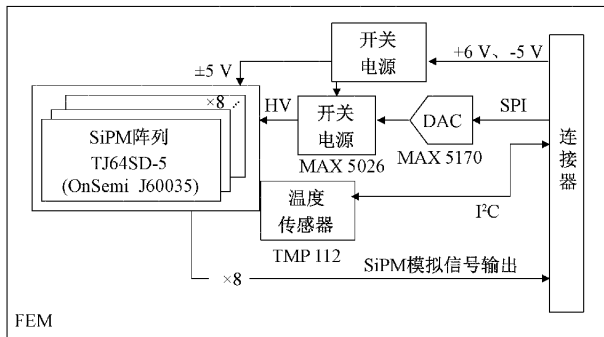


图4 前端模块整体结构

高压及温度补偿电路的功能是提供 SiPM 工作所需的电压,同时使 SiPM 的增益保持在一个稳定值。SiPM 的增益同时受到偏置电压和温度的影响。温度的变化会导致其增益的变化,从而导致得到的探测器能谱展宽。因此需要温度补偿模块随温度变化调节 SiPM 的偏置电压,使其工作在增益稳定的状态。由此设计了利用数模转换器(digital to analog converter, DAC)调节偏置电压的温度补偿模块,结构如图5所示。前端板上的温度传感器将温度信息传给数据采集板上的 FPGA, FPGA 根据 SiPM 偏置电压随温度变化关系,调节 DAC 输出电压,从而调节 SiPM 偏置电压。

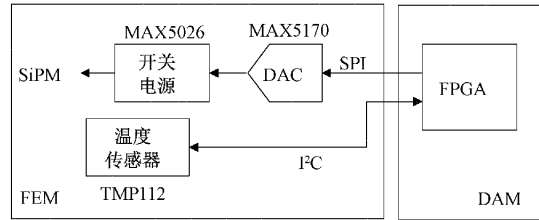


图5 高压及温度补偿模块结构

2.2 数据采集模块设计

数据采集模块接收来自前端模块的信号,经过放大、单端转差分变换后将信号送入 ADC 数字化。数字化后的信号通过 FPGA 进行处理和打包后在 Flash 中储存。

BGO 晶体与 SiPM 耦合进行数据读出,波形的上升沿约为 60~80 ns,本设计中采用了数字积分的技术路线,需要对波形进行采样。每个上升沿取至少 5 个采样点以重构原始波形,即每隔 12~16 ns 进行一次采样,对应的采样率至少约为 80 Msps,考虑到采样率留有一定余量,选用 100 Mbit/s 采样率,8 通道 12 位的 ADS5295,用于实现对探测器 8 块 BGO 晶体探头通道信号的波形进行采样。该 ADC 针对低功耗应用设计,每通道的功耗仅 80 mW。ADC 采用串行 LVDS 接口输出,减少了接口的数量。同时每通道采用两线制输出(每通道信号通过两对 LVDS 接口传输),有利于降低数据传输速率。以上特点使得该 ADC 非常适合与低成本低功耗的 FPGA 配合使用。模拟信号在数据采集模块经过 ADC 数字化后通过 LVDS 接口传输到 FPGA。FPGA 选用 Microsemi 公司生产的 IGLOO2 系列,基于低功耗 Flash 工艺的 FPGA。其低功耗的特点使得它适合长时间工作、外部电池供电的探测系统。同时该 FPGA 还具有免疫单粒子翻转的特点,十分符合辐射探测环境中的应用,数据采集模块结构如图6所示。

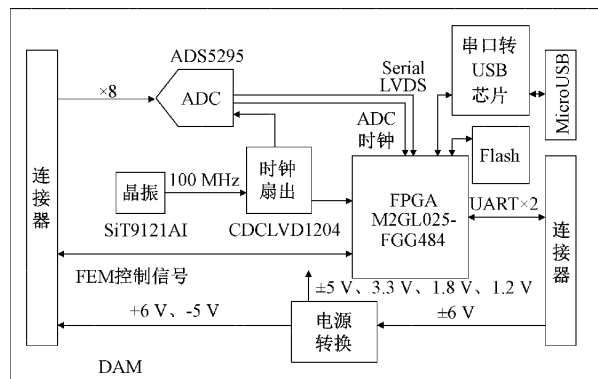


图6 数据采集模块结构

2.3 探测器采集工作流程设计

探测器中,信号采集电路系统的数据采集模块中有一片 FPGA 芯片,它是控制整个系统工作的核心,基于状态机控制整个系统的工作流程,系统的状态跳转如图7所示。上电后系统自动进入空闲模式,空闲模式下根据指令执行

参数配置或进入数据采集模式。

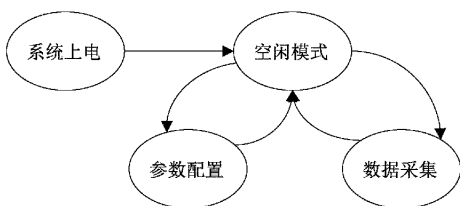


图 7 系统状态跳转图

数据采集模块的逻辑结构如图 8 所示。主要包括 ADC 接口模块、数据处理与打包模块、指令解析模块和通信与控制模块。

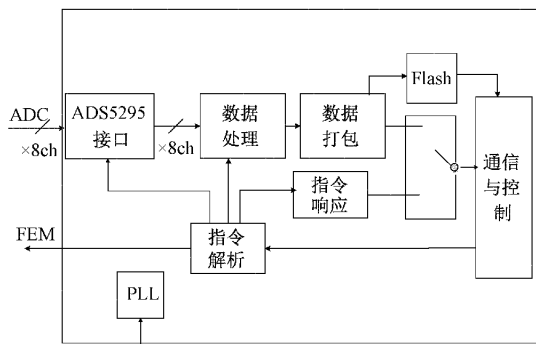


图 8 数据采集模块的逻辑结构

指令解析模块根据接收到的 ADC 配置信息、触发阈值、采集模式等参数控制系统工作。开始采集后,当外部信号触发时,FPGA 根据采集模式进行波形采集或能谱累积。ADC 接口模块负责 ADC 与 FPGA 之间的通信,包括接收 ADC 传输的两线制数据,进行解析和拼接后得到 ADC 单通道数据,传到数据处理模块进行进一步处理,同时也负责将 FPGA 下发指令下发到 ADC 实现 ADC 配置。数据处理模块接收到有效数据后,经过触发判选,将有效信号波形或计算后得到的能谱信息传递给数据打包模块并进一步存储到 Flash 中或直接上传到上位机。

通信与控制模块负责 FPGA 与上位机的通信,该模块接收来自上位机的指令,下发到指令解析模块进行解析,同时也负责将采集到的信息进行上传。该模块中还包含一个独立工作的 RTC 芯片提供当前时间,指令解析模块可以根据配置好的时间表控制系统工作。由于水下工作供电能力有限,为了降低功耗,保证系统长时间运行,探测器采用间歇工作的模式,每隔一段时间采集一次数据。在采集数据的间隙,由该模块控制关闭系统的绝大部分电源来降低功耗。

数据采集模块同时还负责前端板上温度补偿模块的控制。系统工作时期,前端板的温度传感器通过 1°C 接口将温度信息传入 FPGA 进行实时分析与控制。

3 系统测试

为了保证在实际工作时系统能够准确可靠地运行,需

要先在实验室中对系统的性能指标进行测试。因此搭建了如图 9 所示的测量系统测试平台。测试平台由信号源、窄带滤波器、电子学系统和上位机组成。静态性能参数和动态性能参数是衡量信号测量电子学系统中 ADC 采样和量化过程精度的重要指标,首先对测量电路自身的电子学性能进行测试。

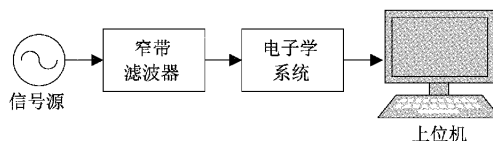


图 9 电子学性能测试方案

3.1 静态性能测试

ADC 微分非线性(differential nonlinearity, DNL)是指 ADC 实际输出的码宽与理想量化电平间的误差,而 ADC 的积分非线性(integral nonlinearity, INL)是指 ADC 输出信号偏离理想线性传输曲线的最大值。INL 和 DNL 是反映测量系统精度的重要指标。为了评估电子学系统的静态性能,由信号源 SMA100 产生频率为 2.4 MHz 的正弦波信号经过同轴电缆和窄带滤波器后输入待测 ADC 中,记录 ADC 采集到的波形并由板上 FPGA 并进一步传给上位机,由数据分析软件处理得到测试结果。利用码密度法测试得到 ADC 的积分非线性和微分非线性,结果如图 10 和 11 所示。ADC 的积分非线性范围在 -1.5 最小有效位(LSB)到 $+1.5$ LSB 之间。微分非线性范围在 -1 LSB \sim $+1$ LSB 之间。测试结果表明,该测量电子学系统具有很好的线性度,电子学系统本身引起的误差远小于 BGO 晶体本征能量分辨率带来的误差,对系统能量分辨率测试影响很小,能够满足能量分辨率(FWHM) $\leq 10\%$ @ 2.5 MeV 的设计要求。

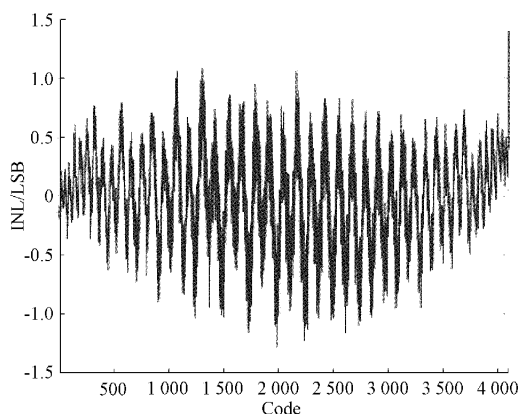


图 10 ADC 的积分非线性测试结果

3.2 动态性能测试

有效位是指考虑噪声和谐波后 ADC 实际有效位数,有效位反映了 ADC 的实际测量精度,由于有效位同时受到噪声和谐波的影响,因此是动态性能测试中主要关心的指

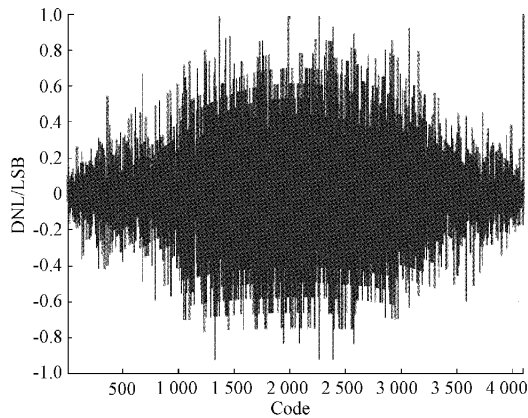


图 11 ADC 的微分非线性测试结果

标。用信号源输出频率为 2.4 MHz 的正弦波信号,经 ADC 采集后发送到上位机,利用频谱分析的方法对系统的电子学动态性能进行测试。测试采集 16 384 个采样点,得到系统的典型频谱图测试结果和有效位,结果如图 12 所示。经过分析可以得到 ADC 实际工作的有效位为 9.24。由于 BGO 闪烁体的固有分辨率在 10% 量级,为了使电子学系统本身的误差不影响到探测器,ADC 的分辨率需要达到固有分辨率的 2~3 倍,即 8 位即可满足。测试结果表明,ADC 的有效位满足电路测量需求。

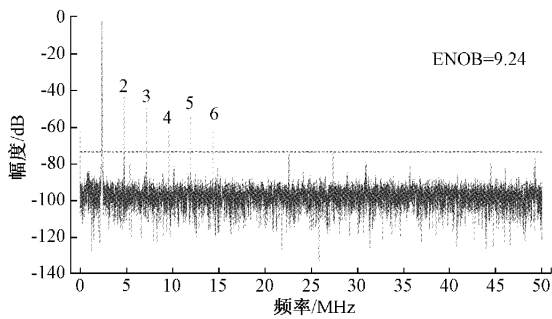


图 12 2.4 MHz 正弦波采样频谱图

3.3 探测器能谱测试

完成电子学系统自身的性能测试后,还需要对整个探测系统工作时的能量分辨率进行测试,以验证探测器信号测量电路的基本功能。为此搭建了如图 13 所示的测试平台,测试平台由放射源、BGO 闪烁体、电子学系统和上位机组成。室温下,选择全能峰能量较高的放射源 Na-22 对探测器系统进行测试。测试现场如图 14 所示。

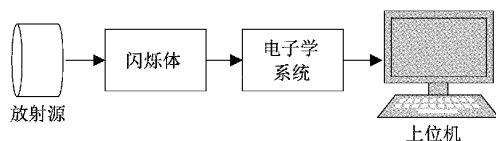


图 13 系统能谱测试方案

测试使用的 BGO 晶体直径为 3.81 cm,高 2.54 cm。测试时,将 BGO 晶体与 SiPM 通过光导耦合。波形采集模

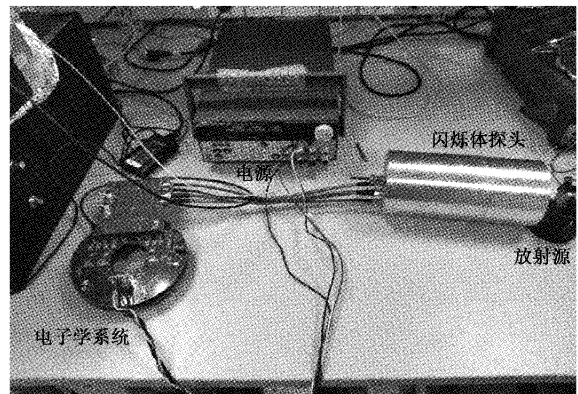


图 14 深海瞬发俘获型中子探测器测试现场

式下,可以得到典型波形如图 15 所示。室温下,使系统持续稳定工作 8 h,累积的能谱如图 16 所示。测试结果表明, SiPM 偏压为 30 V 时测得该系统对能量为 1 275 keV 的伽玛射线分辨率为 9.9%。由于能量分辨率与探测 γ 射线能量是相关的,其他条件不变时,能量越高,能量分辨率越好。由于探测结核矿物时感兴趣的稀土元素的瞬发 γ 射线特征能量大部分在 2~9 MeV 之间,因此对探测器对瞬发中子活化分析中测量高能 γ 射线的能量分辨率将好于 9.9%,能够满足测量时的实际应用需求。

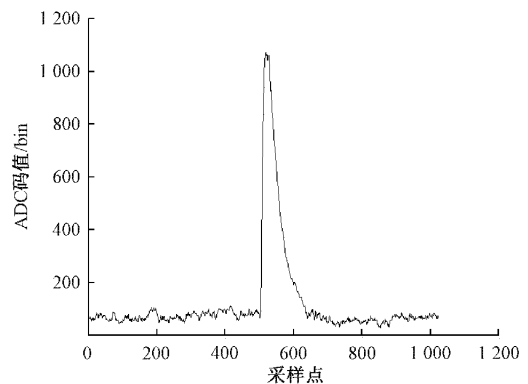


图 15 实验室测试信号波形

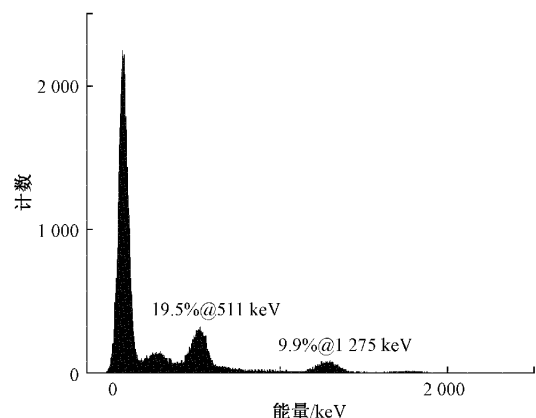


图 16 Na-22 能谱测试结果

4 结 论

本文设计了一种应用于深海特殊环境下利用瞬发 γ 中子活化分析技术进行核素种类鉴别的中子探测仪信号测量电子学系统,包括基于SiPM的前端采集模块和基于Microsemi IGLOO2系列FPGA的信号采集电路设计,并在实验室搭建平台进行了测试。测试结果表明,该系统具有体积小、低功耗、供电要求低的特点,能够在深海环境下进行长期自主运行,同时可以满足系统的能量分辨率要求,证实了本文方法的可行性,为深海环境下的PGNAA技术应用提供了参考。

参考文献

- [1] 杨建民,刘磊,吕海宁,等. 我国深海矿产资源开发装备研发现状与展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 9-17.
- [2] HATTORI M, OKANO M, TOGAWA O. Sea bottom gamma ray measurement by NaI (Tl) scintillation spectrometers installed on manned submersibles, ROV and sea bottom long term observatory[C]. International Symposium on Underwater Technology, IEEE, 2000.
- [3] JONES D G. Development and application of marine gamma-ray measurements; A review[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2001, 53(3):313-333.
- [4] 刘涛,王璇,王帅,等. 深海载人潜水器发展现状及技术进展[J]. 中国造船, 2012(3):239-249.
- [5] 陈达,贾文宝. 应用中子物理学[M]. 北京:科学出版社, 2015:238-239.
- [6] 李晋宇,马双宝. 基于脉冲中子源的元素分析测井仪设计[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(6): 72-75,100.
- [7] 龚亚林,宋青锋,刘永超,等. 中子活化分析技术在煤质在线检测中的应用[J]. 现代矿业, 2019, 35(2): 251-252.
- [8] 刘永超,张伟. PGNAA技术对铜精矿元素及水分进行在线检测的应用研究[J]. 现代矿业, 2020, 36(9): 245-247.
- [9] 刘永超,宋青锋,李岩峰,等. 中子活化分析技术在煤质检测中的应用[J]. 水泥技术, 2020(5):61-65.
- [10] 陈伯显,张智. 核辐射物理及探测学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2011: 438-439.
- [11] 王兴华,孙洪超,姚永刚,等. PGNAA方法学的发展与现状[J]. 同位素, 2014(4):251-256.
- [12] 徐旺,李晋宇,刘伟. 元素分析测井仪井下稳谱算法设计[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(8):72-76.
- [13] 殷登平,胡春周,胡小波,等. 硅光电倍增器(SiPM)研究进展[C]. 第十五届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集, 2010:251-256.
- [14] 李维姣,邹小玫,王威琪,等. 基于SiPM的阵列式X射线背散探测器设计[J]. 仪器仪表学报, 2016, 17(5):1034-1041.
- [15] 惠德彬,赵志文. 时间相关光子计数探测器电路的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2016, 39(11):135-139.
- [16] KATAOKA J, KISHIMOTO A, FUJITA T, et al. Recent progress of MPPC-based scintillation detectors in high precision X-ray and gamma-ray imaging[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, DOI: 10.1016/j.nima.2014.11.004.

作者简介

郑雯文, 硕士研究生, 主要研究方向为核探测与核电子学。

E-mail: zhengww@mail.ustc.edu.cn

曹平(通信作者), 副教授, 主要研究方向为高速数据采集、高精度时钟分发和同步、开源测控等。

E-mail: cping@ustc.edu.cn