ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

УДК 539.1

УСТАНОВКА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ И СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

А.Д. Конотоп^{1,2}*, Н.С. Бойко^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409, Россия ²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 123182 Россия *e-mail: akonotop03@mail.ru

> Поступила в редакцию: 18.09.2023 После доработки: 25.09.2023 Принята к публикации: 27.09.2023

В работе представлена установка для исследования ряда параметров сборок на основе кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных кристаллов, таких как шумовые характеристики, коэффициент усиления и температурная стабильность SiPM. Установка также позволяет снимать одноэлектронные спектры, изучать энергетическое и временное разрешение, световыход, а также температурную стабильность различных сцинтилляторов. Приведена блок-схема установки, и описан принцип ее работы. Разработаны необходимые макросы для математических пакетов, а также программное обеспечение для сбора, обработки и сохранения данных с датчика температуры в виде MFC-приложения на OC Windows. Представлены результаты тестирования рабочих параметров установки, подтверждающие ее функциональность, выявлены замечания и недостатки, требующие исправлений и доработок. С помощью установки были проведены исследования по изучению температурных зависимостей, зависимостей энергетических разрешений от сцинтилляционного кристалла и от кремниевого фотоумножителя, а также получен одноэлектронный спектр для дальнейшего изучения и измерения относительного световыхода для различных сцинтилляторов на основе эталонного.

Ключевые слова: кремниевые фотоумножители, сцинтилляционные материалы, детекторы, энергетическое разрешение.

DOI: 10.26583/vestnik.2023.268

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сцинтилляционные детекторы позволяют решать огромный спектр задач. Одним из наиболее удачных решений являются установки на базе кремниевых фотоумножителей (SiPM). Благодаря малым габаритам и более высокой чувствительности они получили свое распространение не только как аналог ФЭУ, например в области мегасайенсустановок физики частиц [1], астрофизики [2–4] или ядерной медицине [5], но и в других приборах, в которых требуется детектирование очень слабых сигналов [6].

В связи с этим появляется необходимость исследовать различные параметры кремниевых фотоумножителей и сцинтилляторов, а также их сборок. До сих пор не существует готового решения в данном вопросе, и лаборатории вынуждены конструировать собственные одноразовые установки [7] или проводить испытания уже непосредственно на установках [8–10]. В связи с чем, при возникновении необходимости протестировать сборки SiPM + сцинтиллятор, также понадобилось подготовить аналогичный универсальный испытательный полигон. В качестве решения была разработана установка, которая позволяет оценивать широкий спектр параметров: шумовые характеристики, коэффициент усиления и температурную стабильность SiPM, снимать одноэлектронные спектры, изучать энергетическое и временное разрешение, световыход, а также температурную стабильность различных сцинтилляторов.

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Одним из элементов большинства установок по изучению частиц являются детекторы. Существует огромный спектр подобных приборов, разработанных под определенные задачи: искровые камеры для изучения треков частиц, счетчик Гейгера для подсчета количества частиц, масс-спектрографы для изучения концентрационного состава веществ. Для регистрации частиц и γ-квантов активно применяются сцинтилляционные детекторы. Они представляют собой сборку из сцинтилляционного материала, излучающего свет при прохождении через него частиц, и фотоумножителя, реагирующего на световой сигнал, усиливая его.

Сцинтилляционные материалы

Сцинтилляционные вещества, как было сказано, реагируют на проходящие через них потоки частиц, излучая некоторое количество фотонов, обычно пропорциональное энергии пролетающей частицы. Благодаря данному эффекту появляется возможность получать энергетические спектры. Существует большое количество сцинтилляционных материалов: пластиковые сцинтилляторы, характеризующиеся высоким световыходом и малым временем высвечивания, газовые сцинтилляторы из азота и благородных газов, имеющие еще более короткое время высвечивания. Особое место занимают неорганические сцинтилляционные кристаллы, для которых характерен высокий световыход и отличное энергетическое разрешение, что позволяет говорить о энергетических характеристиках исследуемых частиц и, соответственно, высокоточно разделять их по энергиям. В табл. 1 приведены интересующие нас характеристики некоторых сцинтилляционных материалов.

Таблица 1	. Характе	ристики с	цинтиллятор	ров [[11]	
-----------	-----------	-----------	-------------	-------	------	--

Сцинтил- лятор	Плотность, г/см ³	Время высвечи- вания, нс	Свето- выход, фот/МэВ
Полистирол	1.05	5	0.1
GAGG(Ce)	6.63	87(90 %) 255(10 %)	56*

*Среднее значение.

Фотоумножители

Количество вышедших из сцинтиллятора фотонов достаточно мало для прямой обработки аппаратурой. Для устранения этого недостатка применяются особые фотоприемники, содержащие в своей конструкции умножители попадающих на них фотонов. Одним из подобных устройств является фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), представленный на рис. 1.



Рис. 1. Схема ФЭУ

Фотон проходит через кварцевое окно и, преодолевая полупрозрачный фотокатод, падает на динод, выбивая несколько фотоэлектронов, которые летят к следующему диноду и далее, пока волна фотоэлектронов в сотни тысяч раз большая, чем один фотон, не достигнет анода. Такие фотоприемники являются достаточно громоздкими, требуют сложных в изготовлении источников питания, а также являются достаточно хрупкими, из-за чего требуют в эксплуатации особой осторожности.

Современным решением в области детектирования слабых излучений являются кремниевые фотоумножители (SiPM), представленные ниже на рис. 2.

Данный фотоприемник представляет из себя матрицу полупроводниковых лавинных фотодиодов (ЛФД, SPAD), работающих в гейгеровском режиме. Пример принципиальной схемы Si-ФЭУ представлен на рис. 2, у разных производителей схемы могут отличаться. В схеме резистивный элемент нужен для пассивного гашения лавины. За счет своих малых габаритов и высокого коэффициента усиления (порядка 106) SiPM не только приходит на замену ФЭУ во многих задачах, но и выходит за пределы применимости этого типа фотоприемников и используется для детектирования различных слабых сигналов [12].





Рис. 2. Кремниевый фотоумножитель компании SensL (*a*) и принципиальная схема кремниевого фотоумножителя (б)

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В связи с активным применением сборок из кремниевых фотоумножителей и сцинтилляторов появляется необходимость изучать их различные характеристики. В качестве решения была разработана установка, которая позволяет оценивать обширный набор параметров: шумовые характеристики, коэффициент усиления и температурную стабильность SiPM, снимать одноэлектронные спектры, изучать энергетическое и временное разрешение, световыход, а также температурную стабильность различных сцинтилляторов.

На рис. 3 представлена блок-схема установки. В подготовленный черный ящик помещается исследуемая сборка из сцинтиллятора и кремниевого фотоумножителя. Питание осуществляется внешним лабораторным источником питания, а в качестве источника сигнала может быть использован как изотоп, так и светодиод. Сигнал с SiPM передается в электронный тракт на основе аппаратуры CAEN [13]. Данное оборудование создано специально для работы с различными кремниевыми фотоумножителями и является наиболее удобным и компактным из существующих решений. Так, сигнал с SiPM передается на усилитель, а затем раздваивается и направляется на дискриминатор, формирующий временные ворота, и анализатор импульсов, который также получает данные с дискриминатора. Такая сборка позволяет собирать как дифференциальные, так и интегральные спектры, а с прямым подключением к ЭВМ – отображать их в реальном времени в прилагаемом ПО. Контроль температуры осуществляется при помощи термодатчика AM2302 на базе микроконтроллера Arduino nano, данные с которого также передаются на ЭВМ. При помощи сторонних пакетов программ производится анализ полученных данных.

УСТАНОВКА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ И СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ



Рис. 3. Блок-схема установки

Annapamypa CAEN

Усилитель SP5600

SP5600 – блок питания и усиления общего назначения, объединяющий до двух SiPM в материнскую и дочернюю архитектуру, что позволяет легко устанавливать и заменять датчики. Базовая конфигурация имеет два канала с независимой регулировкой усиления до 50 дБ и подает напряжение смещения (до 100 В) на датчики со стабилизацией усиления. Каждый канал может обеспечивать цифровой выходной сигнал, генерируемый быстрыми дискриминаторами переднего фронта. Также возможно совпадение по времени двух каналов [4].

Анализатор импульсов DT5720А

DT5720A – 2-канальный 12-битный настольный анализатор импульсов формы волны 250 MC/s с несимметричным входным динамическим сигналом 2 V_{pp} на коаксиальных разъемах MCX. Регулировка смещения постоянного тока (диапазон ± 1 В) с помощью программируемых 16-битных ЦАП (по одному на каждый канал)

позволяет правильно выбирать биполярный $(V_{in} = \pm 1 \text{ B})$ вплоть до полного положительного $(V_{in} = 0 \div \pm 2 \text{ B})$ или отрицательного $(V_{in} = 0 \div \pm 2 \text{ B})$ качание аналогового входа без потери динамического разрешения.

Модуль оснащен тактовым входом на передней панели и PLL для синтеза тактового сигнала от внутренних/внешних опорных сигналов. Поток данных непрерывно записывается в кольцевой буфер памяти. Когда возникает срабатывание, FPGA записывает дополнительные N выборок для пост-срабатывания и замораживает буфер, который может быть прочитан через USB или оптический канал. Сбор данных может продолжаться без мертвого времени в новом буфер [13].

Контроль температуры

Arduino nano

Arduino (рис. 4) представляет собой простейший микроконтроллер, построенный на 8-битном микропроцессоре ATmega-328P с тактовой частотой 16 МГц. За счет своей простоты, малых размеров и дешевизны данные контролле-

å

ры позволяют применять его для простых и некоторых сложных задач. Например, Arduino можно применить в качестве контроллера мониторинга, а на самом деле и регулирования, микроклимата [14].



Рис. 4. Arduino nano

Благодаря гибкости архитектуры данные с контроллера можно транслировать на ЭВМ через 232 интерфейс (СОМ), сохраняя и обрабатывая при помощи специально разработанного программного обеспечения.

1.1.1. Датчик температуры и влажности АМ2302



Рис. 5. Датчик АМ2302 В качестве датчика температуры был использован AM2302, изображенный на рис. 5, зарекомендовавший себя в других различных приборов на протяжении многих лет. Несмотря на отсутствие аккредитации в госреестре измерительных приборов из-за своей дешевизны, модуль является достаточно точ-

ным: после прогрева в течение 40–60 мин. все приборы, принадлежащие одной партии, не только показывают одинаковые параметры температуры и влажности, но и одинаково реагируют на отклонения в микроклимате с погрешностью в несколько раз меньшей, чем заявлено производителем [15].

Программное обеспечение

Для получения и обработки выходных данных с датчика было разработано специальное программное обеспечение для платформ под управлением операционной системы Windows (поддержка 32- и 64-разрядной версий). После получения сигнала с СОМ-порта последовательность данных расшифровывается, проверяется соответствие, пересчитывается контрольная сумма, и подходящие для обработки данные сохраняются в отдельный файл, пригодный для обработки в стороннем программном обеспечении (рис. 6).

Arduino Temperature&Humidity Sensor	—		\times
-------------------------------------	---	--	----------

Temperature =	0	С					
Humidity =	0	%					
						Connect	
Protocol:							
imestamp	dТ	Len	Data				

Рис. 6. Интерфейс разработанного программного обеспечения

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование температурных зависимостей

Для начала необходимо было проверить, как влияет изменение температуры на результаты набора спектров, а также убедиться в работоспособности установки, проведя некоторого рода калибровку. Для этого на сборке SiPM + сцинтиллятора при помощи нашей установки были собраны два набора данных: спектр ¹³⁷Cs без нагрева и с нагревом. Все наборы сопровождались контрольным мониторингом температуры. Полученные спектры отображены в виде гистограмм на рис. 7, а данные по изменению температуры – на рис. 8.



Рис. 7. Спектры ¹³⁷Сs при нагреве (красный) и без нагрева (синий)

УСТАНОВКА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ И СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ



Рис. 8. Мониторинг температуры в ходе сборов данных без нагрева (*a*) и с нагревом (*б*)

Исследование детекторов позитронно-эмиссионного томографа

В настоящее время в Курчатовском институте разрабатывается макет 32-канального позитронно-эмиссионного томографа на основе детекторных сборок из кремниевого фотоумножителя 3×3 мм от компании SensL и сцинтилляционного кристалла GAGG(Ce) 3×3×15 мм [16].

В ходе изучения некоторых его характеристик было выявлено характерное отклонение некоторых каналов от среднего значения по двум из них: энергетического разрешения и амплитуды энергии, что отражено на рис. 9.

Как было сказано ранее, созданная установка позволяет изучать различные сборки из кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных материалов. В связи с этим было принято решение провести испытания соответствующих детекторов на собранном оборудовании.

Чтобы выяснить, какая из частей детектора вносит отклонения, необходимо организовать проверку каждой из них: кремниевый фотоумножитель или сцинтилляционный кристалл. Для этого были сняты две серии измерений на одном SiPM для разных сцинтилляторов и наоборот.



Рис. 9. Зависимость амплитуды (*a*) и энергетического разрешения (*б*) от номера канала

Для начала, под контролем температуры, чтобы при необходимости внести поправки, а также оценить возможные отклонения и разбросы данных, на выбранном кристалле за одинаковое время были сняты спектры цезия-137 (¹³⁷Cs), один из которых отображен на рис. 10.



Как и ожидалось, система все это время находилась при одинаковой температуре, что подтверждают данные мониторинга, отображенного на рис. 11. Флуктуации температуры в начале измерений могут быть связаны с незначительными отклонениями из-за недостаточного прогрева аппаратуры или допустимой погрешностью измерений.

Полученные данные были обработаны и аппроксимированы гауссом методом Хи-квадрат. Отсюда получены значения положения пиков и энергетических разрешений, по которым были построены соответствующие зависимости параметров от номера SiPM (рис. 12).



Рис. 11. Зависимость температуры в установке от времени





Рис. 12. Зависимость положения пика (*a*) и энергетического разрешения (б) детектора в зависимости от SiPM

Для выбранного кремниевого фотоумножителя и разных сцинтилляционных кристаллов были сняты аналогичные зависимости, аппроксимированы, а полученные данные положений пика и энергетических разрешений отражены на графиках, представленных на рис. 13.





Рис. 13. Зависимость энергетического разрешения (*a*) и положения пика (*б*) детектора в зависимости от SiPM

Получение одноэлектронного спектра

Как было описано ранее, конструкция позволяет использовать в качестве источника сигнала не только радиоактивные источники, но и светодиод для получения одноэлектронного спектра, изображенного на рис. 14.



Рис. 14. Одноэлектронный спектр

ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из полученных наборов спектров при различных температурах, результаты совпадают с теоретическими изысканиями: при нагреве наблюдается смещение положения пика в спектре, что связано с изменением чувствительности самих кремниевых фотоумножителей с изменением температуры. Однако в данном эксперименте проявился первый недостаток нашей установки - невозможность поддерживать нагрев достаточно хорошо, как видно из соответствующих графиков мониторинга температуры. Для этого необходимо установить некоторого рода систему регулирования микроклимата в целях поддержания необходимых для экспериментов параметров среды, в том числе и с возможностью охлаждения.

Говоря о результатах изучения детекторов томографа, можно заметить, что картина оказывается явно неоднозначной: как видно из полученных данных, такого рода отклонения явно не зависят ни от кремниевого фотоумножителя, ни от сцинтиллятора, применяемого на конкретном детекторе. Несомненно, каждый из этих факторов вносит свои поправки, хотя влияние явно недостаточно. Таким образом, возможной причиной подобного рода разбросов может являться плохой контакт между кремниевым фотоумножителем и сцинтиллятором, что вызывается грубым позиционированием элементов. Для решения данного вопроса было принято решение использовать в дальнейшем оптический клей, свойства которого будут изучены отдельно.

Получив одноэлектронный спектр на нашей установке, появляется возможность с достаточной точностью совершить калибровку измерительной шкалы, благодаря которой при помощи эталонного сцинтилляционного кристалла с известным световыходом можно производить измерение относительного световыхода для любого известного кристалла.

В целом, для более точных измерений на самой установке, необходимо продумать каретковую конструкцию для исследуемых сцинтилляторов и кремниевых фотоумножителей. В этом случае получится добиться более точного позиционирования исследуемых компонентов, что существенно улучшит результаты наборов данных.

Для расширения функционала установки имеет смысл добавить дополнительный разъем для кремниевого умножителя, что позволит проводить дополнительные измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам работы было создано универсальное полноценное рабочее устройство, позволяющее выполнять ряд задач по тестированию сцинтилляционных кристаллов и кремниевых фотоумножителей. Установка была проверена на реальных рабочих задачах, в ходе которых подтвердилась ее функциональность, выявлены замечания и недостатки, требующие исправлений и доработок. Для обработки данных были разработаны необходимые макросы для математических пакетов, а также программное обеспечение для сбора, обработки и сохранения данных с датчика температуры в виде MFC-приложения на OC Windows. Ожидаемые результаты в целом достигнуты, а также поставлены новые задачи по доработке и улучшению установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ghezzi A*. Precision Timing with LYSO: Ce Crystals and SiPM Sensors in the CMS MTD Barrel Timing Layer // 2021 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), IEEE. 2021. Pp. 1–4.

2. Ozaki K, Kazama S., Yamashita M., Itow Y., Moriyama S. Characterization of new silicon photomultipliers with low dark noise at low temperature // Journal of Instrumentation, 2021. Vol. 16. № 3. P. 03014.

3. Chung C., Backes T., Dittmar C., Karpinski W., Kirn T. and etc. The Development of SiPM-based fast time-of-flight detector for the AMS-100 experiment in space // Instruments, 2022. Vol. 6. № 1. P. 14.

4. Ozaki K., Kazama S., Yamashita M, Itow Y., Moriyama S. Characterization of new photo-detectors for the future dark matter experiments with liquid xenon // Journal of Physics: Conference Series, 2020. Vol. 1468. P. 012238. doi:10.1088/1742-6596/1468/1/012238

5. Salvador B., Pineda D.A. E., Fernandez-Maza L., Corral A. Monitoring of microfluidics systems for PET radiopharmaceutical synthesis using integrated silicon photomultipliers // IEEE Sensors Journal, 2019. Vol. 19. № 17. Pp. 7702–7707.

6. Ravil Agishev *and etc.* Lidar with SiPM: Some capabilities and limitations in real environment // Optics & Laser Technology, 2013. № 49. Pp. 86–90.

7. Полещук Р. Разработка фотонных методов для экспериментального комплекса Центра подземной физики СUPP. М.: ФГМУН ИЯИ РАН, 2015.

8. *Poleshchuk O. and etc.* Performance tests of a LaBr3:Ce detector coupled to a SiPM array and the GET electronics for γ -ray spectroscopy in a strong magnetic

field // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021. Vol. 987.

9. Bonanno G., Marano D., Belluso M., Billota S. and etc. Characterization Measurements Methodology and Instrumental Set-Up Optimization for New SiPM Detectors. Part I: Electrical Tests // IEEE Sensors Journal, 2014.

10. Bonanno G., Marano D., Belluso M., Billota S. and etc. Characterization Measurements Methodology and Instrumental Set-Up Optimization for New SiPM Detectors. Part II: Optical Tests // IEEE Sensors Journal, 2014. Vol. 14. № 10. Pp. 3567–3578.

11. Корнеев А. Универсальная модель световыхода пластмассовых и жидких органических сцинтилляторов для электронов и тяжелых заряженных частиц. [Электронный ресурс]. URL: https://nauchkor. ru/uploads/documents/569832da5f1be74d9300005b.pdf (дата обращения: 10.08.2023). 12. Акимов Ю. Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2014.

13. Guide SP5600AN Educational Kit – Premium Version Guide. CAEN Educational, Italy 2016.

14. Arduino nano Datasheet, Arduino Inc. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.arduino.cc/hard ware/nano (дата обращения: 10.08.2023).

15. Temperature and humidity module AM2302 Product Manual, Aosong (Guangzhou) Electronics Co. Ltd., Guangzhou, China (2015). [Электронный ресурс]. URL: https://aosong.com/en/ (дата обращения: 10.08.2023).

16. Конотоп А. Характеристики 32-канального макета ПЭТ на основе сцинтиллятора GAGG в сочетании с SiPM. [Электронный ресурс]. URL: https://indico.particle.mephi.ru/event/311/contributions/ 3497 (дата обращения: 10.08.2023).

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI», 2023, vol. 12, no. 3, pp. 143-152

NSTALLATION FOR TESTING SILICON PHOTOMULTIPLIER AND SCINTILLATION CRYSTALS

A. D. Konotop^{*a,b**}, N. S. Boyko^{*a,b*}

^aNational Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, 115409, Russia ^bNational Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, 123182 Russia *e-mail: akonotop03@mail.ru

Received September 18, 2023; revised September 25, 2023; accepted September 27, 2023

The paper presents an installation for studying a number of parameters of assemblies based on silicon photomultipliers and scintillation crystals, such as noise characteristics, gain and temperature stability of SiPM. The installation also allows you to shoot single-electron spectra, study energy and time resolution, light output, as well as temperature stability of various scintillators. A block diagram of the installation is given and the principle of its operation is described. The necessary macros for mathematical packages have been developed, as well as software for collecting, processing and storing data from a temperature sensor in the form of an MFC application on Windows OS. The results of testing the operating parameters of the installation, confirming its functionality, are presented, comments and shortcomings requiring corrections and improvements are identified. With the help of the installation, studies were carried out on the study of temperature dependences, the dependences of energy resolutions on the scintillation crystal and on the silicon photomultiplier, and a single-electron spectrum was obtained for further study and measurement of the relative light output for various scintillators based on the reference.

Keywords: silicon photomultipliers, scintillation materials, detectors, energy resolution.

REFERENCES

1. *Ghezzi A*. Precision Timing with LYSO: Ce Crystals and SiPM Sensors in the CMS MTD Barrel Timing Layer. 2021 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), IEEE. 2021. Pp. 1–4.

2. Ozaki K., Kazama S., Yamashita M., Itow Y., Moriyama S. Characterization of new silicon photomultipliers with low dark noise at low temperature . Journal of Instrumentation, 2021. V. 16. No. 3. P. 03014. 3. Chung C., Backes T., Dittmar C., Karpinski W., Kirn T. and etc. The Development of SiPM-based fast time-of-flight detector for the AMS-100 experiment in space. Instruments, 2022. V. 6. No. 1. P. 14.

4. Ozaki K., Kazama S., Yamashita M, Itow Y., Moriyama S. Characterization of new photo-detectors for the future dark matter experiments with liquid xenon. Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1468. P. 012238. doi:10.1088/1742-6596/1468/1/012238.

5. Salvador B., Pineda D.A. E., Fernandez-Maza L., Corral A. Monitoring of microfluidics systems for PET radiopharmaceutical synthesis using integrated silicon photomultipliers. IEEE Sensors Journal, 2019. V. 19. No. 17. Pp. 7702–7707.

6. Ravil Agishev *and etc.* Lidar with SiPM: Some capabilities and limitations in real environment. Optics & Laser Technology, 2013. No. 49. Pp. 86–90.

7. Poleshchuk R. Razrabotka fotonnyh metodov dlya eksperimental'nogo kompleksa Centra podzemnoĭ fiziki CUPP. [Development of photonic methods for the experimental complex of the Underground Physics Center CUPP]. Moscow, FGBUN IYI RAN Publ., 2015.

8. Poleshchuk O. and etc. Performance tests of a LaBr3:Ce detector coupled to a SiPM array and the GET electronics for γ -ray spectroscopy in a strong magnetic field. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021. V. 987.

9. Bonanno G., Marano D., Belluso M., Billota S. and etc. Characterization Measurements Methodology and Instrumental Set-Up Optimization for New SiPM Detectors. Part I: Electrical Tests. IEEE Sensors Journal, 2014.

10. Bonanno G., Marano D., Belluso M., Billota S. and etc. Characterization Measurements Methodology and Instrumental Set-Up Optimization for New SiPM Detectors. Part II: Optical Tests . IEEE Sensors Journal, 2014. V. 14. No. 10. Pp. 3567–3578.

11. Korneev A. Universal'naya model' svetovyhoda plastmassovyh i zhidkih organicheskih scintillyatorov dlya elektronov i tyazhyolyh zaryazhennyh chastic [Universal model of light output of plastic and liquid organic scintillators for electrons and heavy charged particles]. Available at: https://nauchkor.ru/uploads/documents/569832da5f1be74d9300005b.pdf (accessed 10.08.2023).

12. Akimov YU. Fotonnye metody registracii izluchenij [Photonic methods of radiation registration]. OIYAI, Dubna. 2014.

13. Guide SP5600AN Educational Kit – Premium Version Guide. CAEN Educational, Italy, 2016.

14.Arduino nano Datasheet, Arduino Inc. Available at: https://docs.arduino.cc/hardware/nano (accessed 10.08.2023).

15. Temperature and humidity module AM2302 Product Manual, Aosong (Guangzhou) Electronics Co. Ltd., Guangzhou, China (2015). Available at: https://aosong.com/en/ (accessed 10.08.2023).

16. Konotop A. Harakteristiki 32-kanal'nogo maketa PET na osnove scintillyatora GAGG v sochetanii s SiPM [Characteristics of a 32-channel PET layout based on a GAG scintillator in combination with SiPM]. Available at: https://indico.particle.mephi.ru/event/311/ contributions/3497 (accessed 10.08.2023).