

ВРЕМЯПРОЛЕТНАЯ СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТИЦ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ NA61/SHINE В ЦЕРН

*В. А. Бабкин^a, С. Г. Бузин^a, А. С. Бурдыко^a, М. Г. Буряков^a,
В. М. Головатюк^a, А. Дарибаева^a, А. В. Дмитриев^{a,1}, Б. В. Дубинчик^a,
П. О. Дулов^{a,6}, А. А. Зайцев^a, Р. Ю. Колесников^{a,2},
А. И. Малахов^{a,6}, М. М. Румянцев^a*

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

⁶ Пловдивский университет им. Паисия Хилендарского, Пловдив, Болгария

^e Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

На экспериментальной установке NA61/SHINE в ЦЕРН, расположенной на выведенном пучке SPS, в ходе модернизационных работ, проведенных в 2019–2022 гг. сотрудниками ЛФВЭ ОИЯИ, была создана новая система времяпролетных детекторов (ToF) на базе многозачерных резистивных плоских камер (МРПК). Новая система ToF заменила предыдущую систему на основе сцинтилляционных счетчиков. Представлено описание новой ToF-системы установки NA61/SHINE.

A new Time-of-Flight (ToF) system of the NA61/SHINE hadron spectrometer at the CERN SPS was developed in 2019–2022 by the VBLHEP JINR staff. The new ToF is based on Multigap Resistive Plate Chambers (MRPCs) technology. The system has substituted the previous system consisting of scintillation counters. We present an overview of the new NA61/SHINE ToF system.

PACS: 06.60.Jn; 07.77.Ka; 29.40.Cs

ВВЕДЕНИЕ

NA61/SHINE — установка с фиксированной мишенью, расположенная в северной зоне SPS ЦЕРН [1]. Она представляет собой многоцелевой спектрометр большого акцептанса, позволяющий измерять с высокой точностью кинематические характеристики частиц, рожденных в адрон-адронных, адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях в диапазоне значений энергии $\sqrt{S_{NN}} = 5,12–17,3$ ГэВ. Физическая программа эксперимента охватывает три области исследований: физику тяжелых ионов, физику космических лучей и физику нейтрино.

¹E-mail: admitriev@jinr.ru

²E-mail: kolesnikov@jinr.ru

Ионная программа NA61/SHINE нацелена на изучение фазовой диаграммы сильновзаимодействующего вещества. В эксперименте исследуется область фазовой диаграммы КХД путем двумерного сканирования по размеру сталкивающихся систем ($p + p$, $Be + Be$, $Ag + Sc$, $Xe + La$ и $Pb + Pb$) и энергии в лабораторной системе (13–150А ГэВ). В ближайшем будущем планируется расширить программу исследованиями столкновений $O + O$ [2]. Помимо этого программа исследования взаимодействий тяжелых ионов сосредоточена на изучении образования очарованных адронов (в основном D -мезонов) при взаимодействии свинца со свинцом при импульсе налетающей частицы 150 и 40А ГэВ/с. Целью измерений в процессе образования очарованных адронов при столкновениях $Pb + Pb$ является получение первых данных о среднем количестве очарованных кварк-антикварковых пар, образующихся в полном фазовом пространстве при столкновениях тяжелых ионов. Это, в частности, должно существенно помочь ответить на вопросы: каков механизм рождения открытого очарования, как начало деконфайнмента влияет на рождение открытого очарования и как образование кварк-глюонной плазмы влияет на образование J/Ψ [3].

В области физики нейтрино адрон-ядерные данные необходимы для точных предсказаний потоков нейтринных пучков для экспериментов в FNAL и J-PARC [4]. Кроме того, эти данные необходимы для повышения надежности программ моделирования.

Исследования по физике космических лучей заключаются в измерениях выходов адронов, необходимых для интерпретации данных об атмосферных ливнях сверхвысоких энергий, а также в измерениях сечения фрагментации для понимания данных о галактических космических лучах [5].

Во время длительной остановки (LS2) в ЦЕРН NA61/SHINE установка была значительно модифицирована. Реконструкция включала в себя: замену электроники считывания времяпроекционной системы (TPC), создание нового вершинного детектора (VD), разработку левого плеча новой времяпролетной системы (ToF-L), изготовление новых детекторов положения пучка (BPD), создание реперной камеры для измерений скорости дрейфа в TPC (GRC), модернизацию калориметра (PSD), ввод в эксплуатацию системы сбора данных, внедрение новой триггерной системы, интеграцию системы считывания на основе чипа DRS4. Схематическое изображение модернизированной установки NA61/SHINE приведено на рис. 1. Значительные усилия, которые коллаборация вложила в модернизацию, открывают новые возможности для физических исследований и обеспечивают работу эксперимента NA61/SHINE в течение следующих нескольких лет.

Группа ОИЯИ внесла существенный вклад в модернизацию установки: была ответственна за разработку, создание и ввод в эксплуатацию времяпролетной системы с высоким временным разрешением (~ 50 пс).

Основные требования, используемые при проектировании новой системы:

- 1) эффективность выше 95 %;
- 2) временное разрешение лучше 75 пс;
- 3) координатное разрешение < 10 мм;
- 4) оптимальное соотношение гранулярности считывающих электродов и количества каналов электроники для минимизации загруженности каналов (< 15 %) из-за высокой множественности частиц в центральных столкновениях ионов;
- 5) тепловыделение в непосредственной близости к TPC меньше 1 кВт.

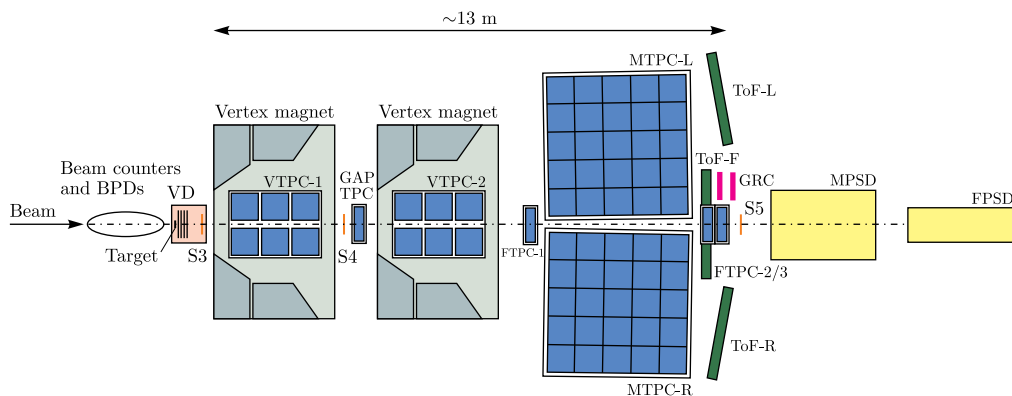


Рис. 1. Схема установки NA61/SHINE после модернизации

В данной работе приведено описание новой времяпролетной системы. Статья организована следующим образом. Разд. 1 посвящен многоззорной резистивной плоской камере (МРПК) — детектору, на базе которого разработана времяпролетная система эксперимента. В разд. 2 и 3 представлена конструкция времяпролетной системы и накамерная электроника соответственно. В разд. 4 и 5 рассмотрены сервисные подсистемы, такие как газовое оборудование, высоковольтная и низковольтная системы. Разд. 6 посвящен вводу в эксплуатацию времяпролетной системы. Завершает работу заключение с основными выводами.

1. ДЕТЕКТОР

В качестве детектора для NA61/SHINE ToF-системы выбрана многоззорная резистивная плоская камера двух конфигураций: детектор с активной областью 600×300 мм и детектор с активной областью 600×150 мм. Использование двух конфигураций МРПК необходимо для эффективного перекрытия областей с различными множествами частиц [6]. Выполненные ранее испытания прототипов МРПК показали временное разрешение ~ 52 пс и эффективность выше 99% [7].

1.1. Конструкция МРПК для NA61/SHINE. Схематическое изображение МРПК для NA61/SHINE [8] представлено на рис. 2. Детектор состоит из трех секций по пять газовых зазоров. Каждая секция состоит из двух внешних толстых стекол толщиной 0,4 мм и четырех внутренних тонких стекол толщиной 0,28 мм. Геометрические размеры стекол: $600 \times 300(150)$ мм. Размеры стекол определяют активную область МРПК. На внешние стекла наносится токопроводящая краска с поверхностным сопротивлением слоя в интервале 2–20 МОм/□ для подачи высоковольтного напряжения. Выбранный диапазон поверхностного сопротивления позволяет обеспечить прозрачность слоя для сигнала и уменьшить величину перекрестных наводок между стрипами за счет паразитной емкостной связи между стрипами и проводящим слоем. В свою очередь, внутренние неокрашенные стекла электрически не подключены.

Стекла разделены монофиламентной леской диаметром 0,2 мм для обеспечения фиксированного зазора. Все секции разделены между собой печатными платами (ПП).

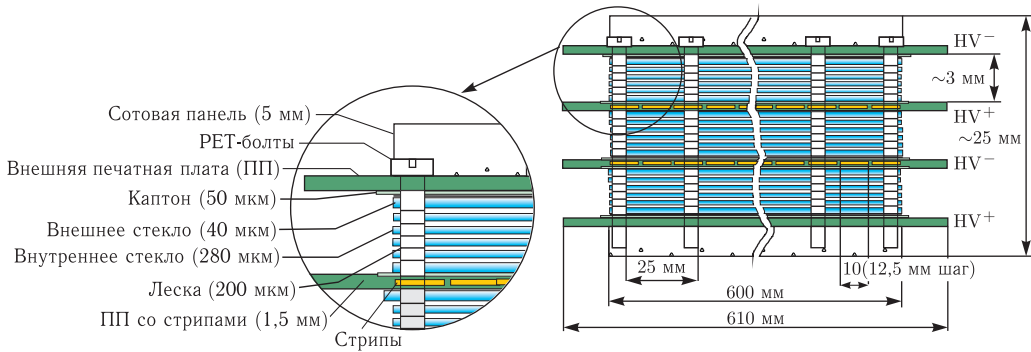


Рис. 2. Схема трехсекционной МРПК

Внешние ПП выполнены без металлизации, а внутренние имеют металлизированные считывающие электроды (стрипы) на внутреннем слое. Стрипы имеют размеры $300(150) \times 10$ мм с шагом 12,5 мм.

Считывание со стрипов осуществляется с двух сторон при помощи двойных параллельных витых пар напрямую в усилитель без использования согласующих резисторов, поскольку дифференциальный импеданс линии составит 60 Ом. Двустороннее считывание позволяет вычислять положение частицы вдоль стрипа по разнице прихода сигналов. В качестве опорного проводника для дифференциальной линии стрипов в данном случае выступает металлический корпус газового объема, который расположен на расстоянии, значительно превышающем расстояния между анодными и катодными стрипами.

Отличительная особенность трехсекционной конструкции со стриповым считыванием заключается в расположении стрипов только на внутренних ПП. Это обеспечивает симметрию между стрипами, одинаковую скорость распространения сигнала и, как результат, предотвращает расхождение сигналов между анодом и катодом.

1.2. Контроль качества сборки детекторов. На рис. 3, а показаны результаты измерения поверхностного сопротивления всех окрашенных стекол. Стекла с граничными значениями поверхностного сопротивления могут использоваться на внешних платах, поскольку это не влияет на экранирование сигнала. Стекла с сопротивлением вне указанного интервала отбраковываются.

После сборки многоззорной резистивной плоскопараллельной камеры детектор проходит пять тестов на качество.

1. Оптический стенд проверки качества сборки, где секции со всех сторон проверяются на отсутствие трещин, загрязнений, равномерность ширины зазоров и правильность положения в зазорах лески. Если обнаруживаются недостатки, то детектор отправляется на их устранение или пересборку. В случае успешного прохождения теста следует монтаж высоковольтных разъемов и первичное высоковольтное тестирование.

2. Первичное высоковольтное тестирование детектора производится на воздухе при напряжении ± 3000 В на предмет возможных грубых замыканий. Ток через 1 ч после подачи напряжения не должен превышать 50 нА.

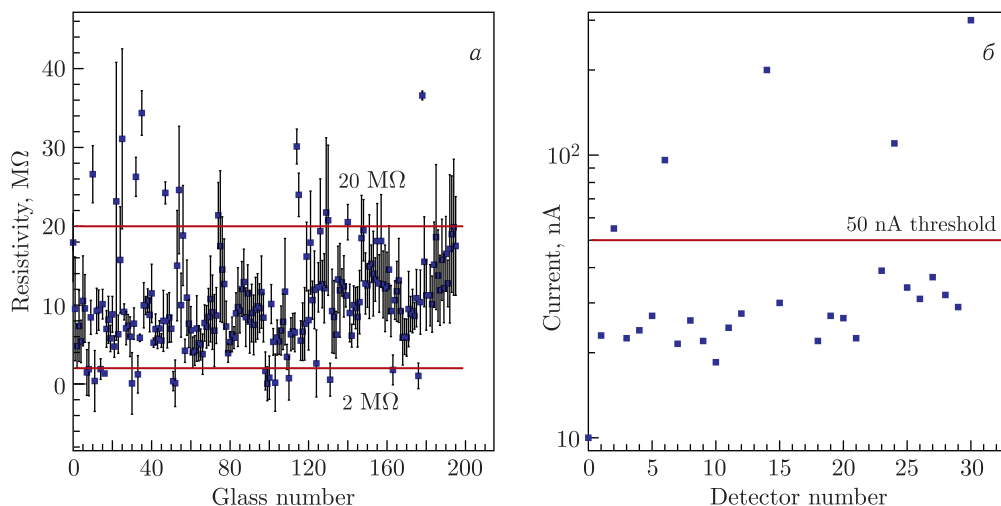


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Поверхностное сопротивление резистивного слоя всех окрашенных стекол (а) и темновой ток изготовленных детекторов (б). Красными линиями отмечены допуски

3. После прохождения первичного высоковольтного тестирования на детектор с обеих сторон припаиваются сигнальные провода и при помощи специального тестера проверяются кабели и контакты на короткое замыкание или обрыв.

4. Далее при помощи стробоскопического осциллографа с полосой пропускания до 20 ГГц измеряется импеданс линии стрипов и считывающих кабелей, а также производится проверка отсутствия сильных отражений сигнала.

5. Последняя стадия тестирования производится на стенде при помощи космического излучения. При тестировании детектора с рабочей газовой смесью и рабочим напряжением в 11,5 кВ проверяются сигнальные спектры и темновые токи. Результаты измерений темновых токов изготовленных детекторов представлены на рис. 3, б.

Результаты всех испытаний записываются в паспорт детектора. После прохождения описанной пятиступенчатой проверки детектор отправляется на чистый склад для последующей упаковки и подготовки к транспортировке в ЦЕРН.

2. КОНСТРУКЦИЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНОЙ СИСТЕМЫ

Времяпролетная система выполнена в виде двух плечей. Каждое плечо состоит из 18 индивидуальных МРПК двух типов, расположенных в три колонны внутри герметичного газового модуля. Конфигурация модуля представлена на рис. 4. Оба типа детекторов имеют по 48 стрипов, считываемых с двух сторон. Таким образом, одно плечо времяпролетной системы содержит в себе 864 считывающих стрипа или 1728 каналов электроники. Внутренний объем газового модуля без учета детекторов равен 194 × 130 × 17,5 см. Все МРПК имеют угол в $\approx 7,5^\circ$ по отношению к фронтальной панели модуля. Расположение детекторов в каждой колонне спроектировано таким образом, чтобы минимизировать потери чувствительной области вдоль

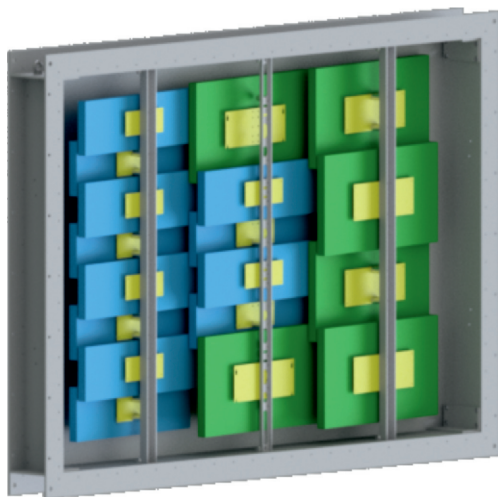


Рис. 4. Конфигурация модуля ToF, представленная в виде трехмерной модели. Поворот и расположение МРПК соответствуют ToF-L

оси X и Y . Смежные по вертикали детекторы расположены на колонне с перекрытием около 30 мм активной области между двумя соседними МРПК. Перекрытие областей между двумя колоннами составляет около 55 мм активной области. Это обеспечивает взаимную калибровку детекторов с помощью треков, проходящих через два или более детекторов.

В установке NA61/SHINE одним из требований к системе ToF является минимальная утечка рабочей смеси во внутренний объем помещения ТРС из-за наличия в газовой смеси ToF электроотрицательных компонентов, которые могут негативно повлиять на работу времяпроекционной камеры. Поэтому при проектировании модуля ToF основные усилия были направлены на достижение сочетания герметичности газового объема и максимальной «радиационной прозрачности». Созданный модуль представляет собой раму, изготовленную из алюминиевого П-профиля с толщиной стенки 8 мм, с двумя панелями спереди и сзади. Передняя и задняя панели выполнены из алюминиевой сотовой панели. Отличие задней панели от передней заключается в том, что задняя оснащена переходными платами для подключения электроники. Чтобы минимизировать количество отверстий в задней панели, переходные платы выполнены в двух конфигурациях: с парным выходом и с одиночным. Переходные платы приклеиваются к задней панели для обеспечения хорошей газонепроницаемости. Перед установкой все переходные платы проверяются на утечку газа через контакты. В торцах модуля с двух сторон предусмотрены входной и выходной газовые разъемы, выполненные по стандартам KF16 и KF40 соответственно. Также на модуль установлены четыре герметичных GES-разъема для подачи высоковольтного питания детекторам.

На основе технической документации создана модель с описанием ToF-системы в среде Geant4. Модель с учетом всех материалов полностью воспроизводит реальную времяпролетную систему.

3. НАКАМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Накамерный предусилитель времяпролетной системы разработан в виде 16-канального аналогового усилителя. Мотивацией для выбора вышеуказанного считывания было наличие DAQ системы, основанной на 32-канальных модулях оцифровки сигнала DRS4 [9]. Модуль оцифровки с частотой дискретизации 5 GSPS и полосой пропускания 750 МГц был разработан группой электроники DPNC (Университет Женевы) для эксперимента NA61/SHINE. Преимущество этого типа считывания заключается в том, что концепция оцифровки формы сигнала способна предоставить дополнительную информацию о сигналах и процессах в МРПК по сравнению с широко распространенной методикой дискриминации [10].

Упрощенная блок-схема предусилителя представлена на рис. 5. Предусилитель питается двумя значениями напряжения +5 В (~ 1,35 А) и -5 В (0,235 А). Первый каскад предусилителя Analogue Front-End (AFE) разработан на основе дифференциального усилителя ADL5565 с рабочей частотой 6 ГГц и входным импедансом 67 Ом [11]. Выходные сигналы с AFE транслируются через дифференциальные параллельные пары длиной 13 м ко второму каскаду предусилителя. Использование дифференциального сигнала позволяет уменьшить влияние внешних синфазных наводок, что актуально ввиду длинной кабельной линии. Поскольку входной каскад DRS4 модулей реализован с возможностью принимать сигналы в униполярном режиме, необходимо согласовать дифференциальный сигнал после AFE с входом системы сбора данных. Второй каскад выполняет роль переходного адаптера Analogue Back-End (ABE) и выполнен на базе 1 ГГц усилителя AD8009 с низким уровнем искажений [12]. Таким образом, электронные схемы (AFE и ABE) и кабель выполнены как единое устройство. Дополнительно такое решение позволяет значительно снизить рассеиваемую мощность вблизи детекторной системы, что является одним из требований к системе ToF. Рассеиваемая мощность на стороне детектора составит ~ 200 мВт/канал, а общая рассеиваемая мощность — около 500 мВт/канал.

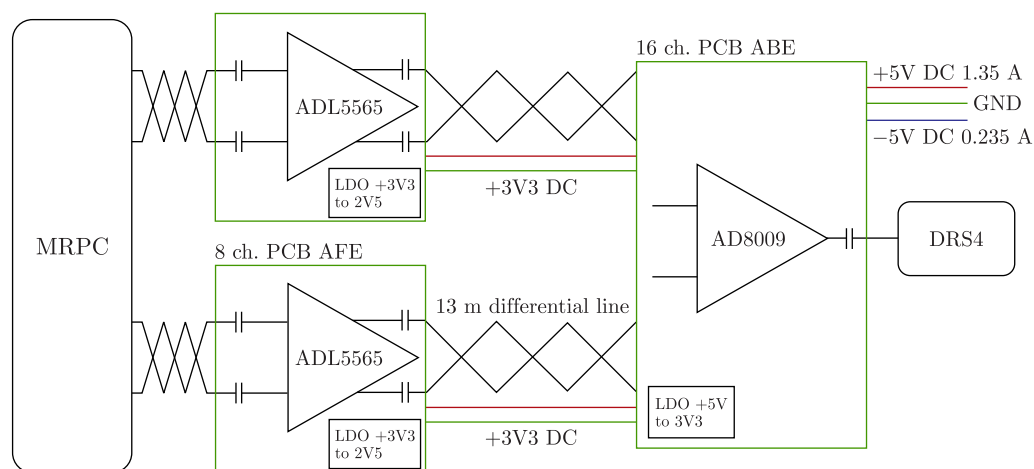


Рис. 5. Упрощенная блок-схема аналогового предусилителя

Измерения характеристик вышеуказанного устройства (AFE, кабель и ABE) были проведены с генерируемыми сигналами в лабораторных условиях. Прямоугольный импульс длиной 500 нс формируется цифровым генератором задержки DG645 и подается на дифференциальный формирователь заряда. Полученный сигнал имеет время нарастания 0,5 нс и ширину 1–2 нс, что имитирует форму реального сигнала с МРПК. После этого импульс разделяется прецизионным пассивным делителем для получения двух идентичных импульсов с зарядом 50 фКл. Данные сигналы подаются на два канала предусилителя. После усиления на первом каскаде (AFE) прохождения кабеля и второго каскада (ABE) сигналы оцифровываются с помощью осциллографа Lecroy WavePro 404HDR для дальнейшего анализа. Измеренная величина среднеквадратичного отклонения разницы времен между передними фронтами сигналов с двух каналов электроники составляет порядка 10,47 пс при усилении 20–22 дБ. Поскольку входные сигналы идентичны, временное разрешение одного канала составляет $10,47/\sqrt{2} = 7,4$ пс.

4. ГАЗОВАЯ СИСТЕМА

Времяпролетной системе на основе детекторов МРПК для работы необходима газовая смесь. Стандартная рабочая смесь состоит из 90% $C_2H_2F_4$ (фреон-134а), 5% $i-C_4H_{10}$ (изобутан) и 5% SF_6 (гексафторид серы). Газовая система спроектирована с возможностью варьирования количества изобутана и гексафторида серы: от 0 до 5% и от 0 до 10% соответственно [13].

Газовая система является рециркуляционной и герметичной для предотвращения попадания в газовую смесь воздуха и влаги. Внутренний объем газового модуля составляет $\sim 0,5$ м³ каждый (объем, занимаемый в модулях непосредственно МРПК,

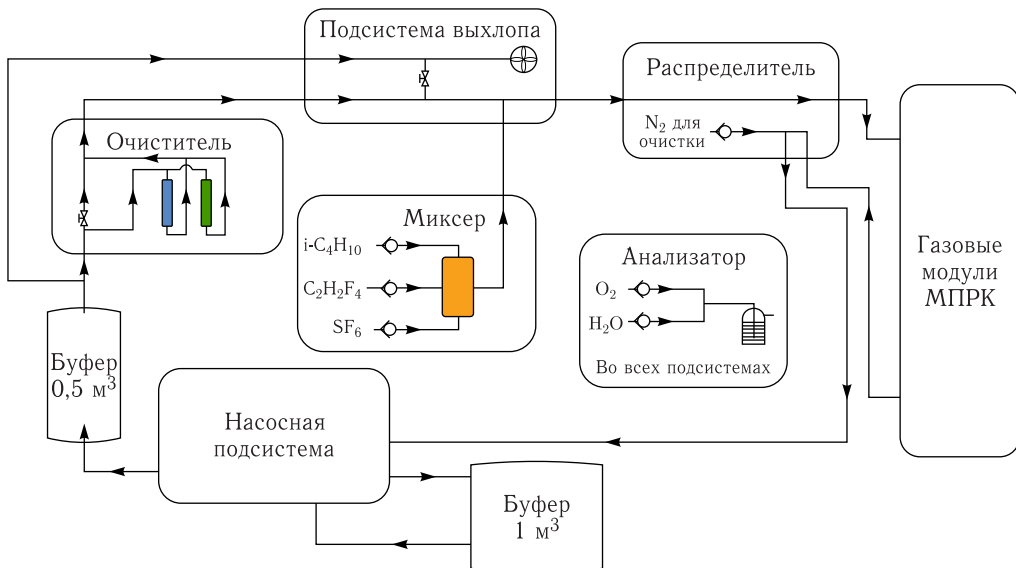


Рис. 6. Упрощенная блок-схема газовой системы времяпролетной системы NA61/SHINE

не учитывается). Требование рециркуляции газовой смеси выставлено из-за того, что фреон-134а и гексафторид серы являются парниковыми газами. Схематическое изображение газовой системы дано на рис. 6.

Газовая система включает в себя:

1) стойку контроля на основе контроллеров массового расхода (MFC) с двумя режимами работы. Один — для контроля «малого продува», используемый во время нормальной рециркуляции газовой смеси, другой — для «сильного продува», необходимый во время заполнения газовых модулей или осушения системы азотом;

2) смешивающий модуль (миксер), удовлетворяющий директиве АТЕХ (директива по оборудованию и работе в потенциально взрывоопасной среде). Данное требование связано с нахождением в составе смеси изобутана;

3) инфракрасный анализатор, необходимый для постоянного контроля за содержанием изобутана iC_4H_{10} с целью не превышения его концентрации в газовой смеси выше огнеопасного предела в 5%;

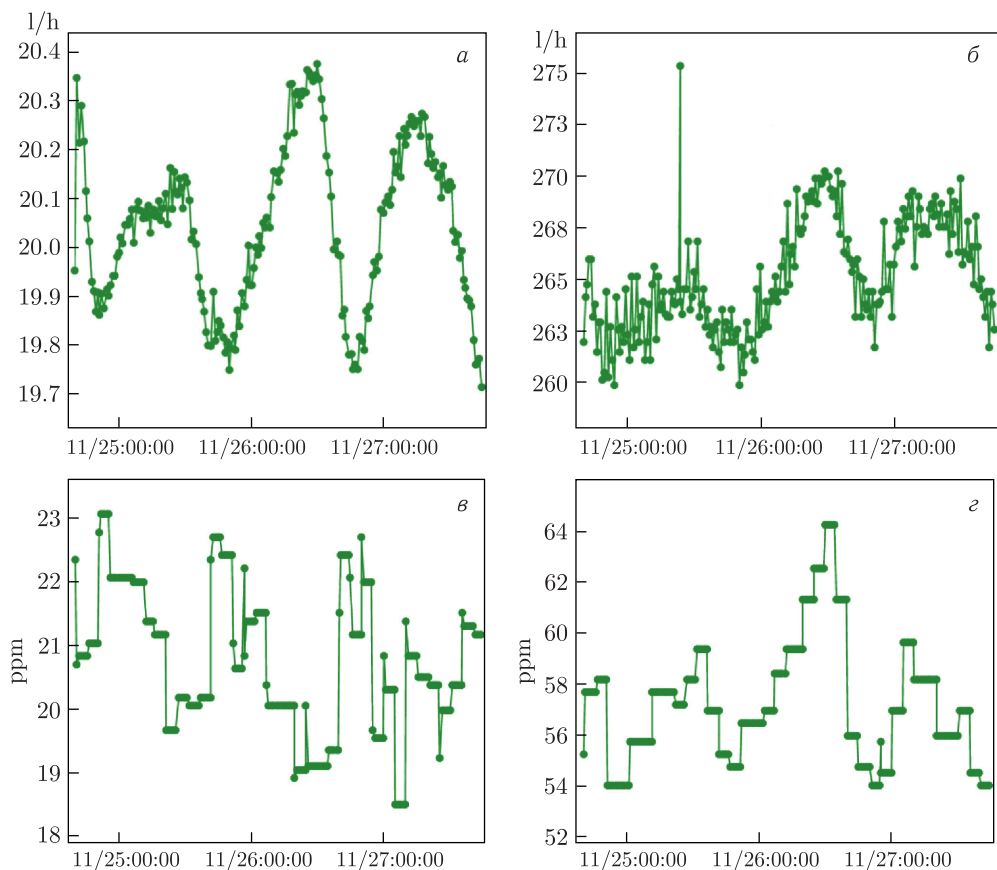


Рис. 7. Рабочие показатели газовой системы за 3 сут (25.11.2022–27.11.2022). Представлены величина добавленного свежего газа (а) и общий поток смеси через времяпротечную систему (б). Внизу расположены измерения содержания воды (в) и кислорода (г) в системе до очистителя

4) анализатор H_2O и O_2 , который измеряет концентрацию влаги и кислорода в разных точках системы: возле смесителя, перед и после очистителя, на выходе к распределителю. Измерения выполняются последовательно;

5) модуль распределения. В случае обесточивания газовая система будет отключена. Рабочее давление в газовом модуле будет поддерживаться за счет резервного газа $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$;

6) очиститель АТЕХ с установленными картриджами для адсорбции кислорода и влаги;

7) модуль выхлопа отработанной смеси;

8) два буферных бака;

9) насосная подсистема.

Поскольку газовое оборудование, согласно правилам безопасности, расположено в специально оборудованном помещении, дополнительно проведена специальная газовая линия для обеспечения подачи необходимой смеси до газовых модулей системы детекторов ToF. Непосредственно в зоне установки времяпролетной системы предусмотрено разделение общей линии подачи газа на индивидуальные линии для каждого модуля.

Газовая система успешно введена в эксплуатацию в 2021 г. За время работы рабочее давление газовой смеси в модулях не отклонялось от атмосферного на величину более 5 мбар. Общий проток газа в системе составлял ~ 265 л/ч, а проток свежеступающей смеси ~ 20 л/ч, полная замена газовой смеси осуществлялась один раз каждые сутки. Наличие влаги в смеси не превышало 0,01% (100 ppm), а кислорода 0,02% (200 ppm). Рабочие показатели газовой системы приведены на рис. 7.

5. СИСТЕМА ПИТАНИЯ

Детекторы МРПК времяпролетной системы работают при приложенном к ним дифференциальном напряжении до ± 6 кВ, т. е. при разности потенциалов ~ 12 кВ на каждой из трех секций с 5 зорами. Максимальная ожидаемая загрузка детекторов времяпролетной системы заряженными частицами в эксперименте NA61/SHINE предполагается порядка $\phi = 300$ Гц/см² [7]. Средний заряд, возникающий в МРПК при пролете минимально ионизирующей частицы, составляет $q = 20$ пКл. Соответственно, максимальный возможный ток, протекающий через один детектор, равен $I = Q/t = q\phi S$, где S — активная площадь детектора. Максимальный ток для детектора с активной областью 600×300 мм составляет 10,8 мкА, для детектора с активной областью 600×150 мм — 5,4 мкА. Ток через всю высоковольтную систему равен 129,6 мкА. То есть полная мощность высоковольтного питания составляет около 1,5 Вт. Таким образом, высоковольтные источники питания должны быть маломощными, но с точностью измерения токов порядка единиц наноампер.

Высоковольтное питание времяпролетной системы реализовано на базе модульных источников питания WIENER Mprod iSeg EHS4080n(p). Модуль имеет 4 канала с выходным напряжением до 8 кВ, током до 1 мА и точностью измерения тока 2 нА. Потребляемое питание высоковольтного модуля при малой мощности нагрузки составляет ~ 10 Вт/канал). Для оптимального использования модулей высоковольтного

питания к одному каналу одной полярности высоковольтных источников подключаются одновременно несколько детекторов через модуль-распределитель с возможностью отключения тока для каждого отдельного детектора.

Система низковольтного питания, как и высоковольтная система, создана на основе модульных источников WIENER Mpod iSeg MPV8008I с максимальным напряжением 8 В на канал. Низковольтные источники питания во времяпролетной системе необходимы для питания накамерной электроники. Так как число предусилителей в одном модуле 108, было решено питать их напрямую от источника питания без использования дорогих преобразователей постоянного напряжения.

Низковольтное питание транслируется от источников через специализированные четырехканальные кабели длиной 20 м и распределяется непосредственно вблизи предусилителей с помощью распределительной платы. На каждый канал источника в кабеле используется три жилы, общее погонное сопротивление которых составляет ~ 28 Ом/км. Соответственно, полное сопротивление жил для одного канала питания составляет 1,5 Ом. Дополнительно, для каждого канала присутствует обратная связь, измеряющая напряжение на конце кабеля со стороны нагрузки, поэтому источник автоматически компенсирует падение напряжения на кабеле. Таким образом, независимо от длины кабеля, на распределительной плате напряжение всегда будет соответствовать установленному на источнике. Естественно, если падение напряжения не превышает максимальное значение напряжения источника (8 В).

От распределительной платы питание на предусилители подводится через метровые кабели общим сопротивлением $\sim 0,5$ Ом/м. Один положительный канал источника используется для питания трех предусилителей. В свою очередь, один отрицательный канал источника используется для питания девяти усилителей. Данная конфигурация позволяет подключить девять предусилителей, используя четыре канала источника. Среднее энергопотребление низковольтного питания одного детектора составляет порядка 76 Вт, где ~ 26 Вт — потери на кабеле.

6. ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

Левое плечо новойToF-системы успешно установлено на месте предыдущего в 2021 г., позади двух основных времяпроекционных камер (МТРС) на расстоянии от точки взаимодействия ~ 13 м (рис. 8). В качестве несущей конструкции выступила существующая стальная ферма, разработанная для более объемного и массивного 891-канального сцинтилляционного детектора [14]. Данная ферма оснащена системой ползунковых механизмов, которые обеспечивают возможность перемещений и поворотов всей фермы в горизонтальной плоскости для юстировки положения всей конструкции.

Ввод в эксплуатацию первого плечаToF-L состоялся летом 2022 г. После первоначального этапа ввода в эксплуатацию система оказалась стабильной и никаких аппаратных неисправностей не было обнаружено.

После ввода в эксплуатацию всей обновленной установки NA61/SHINE были успешно проведены два сеанса набора данных. В рамках нейтринной программы накоплено более 180 млн взаимодействий протонов с импульсом 31 ГэВ/с на копии

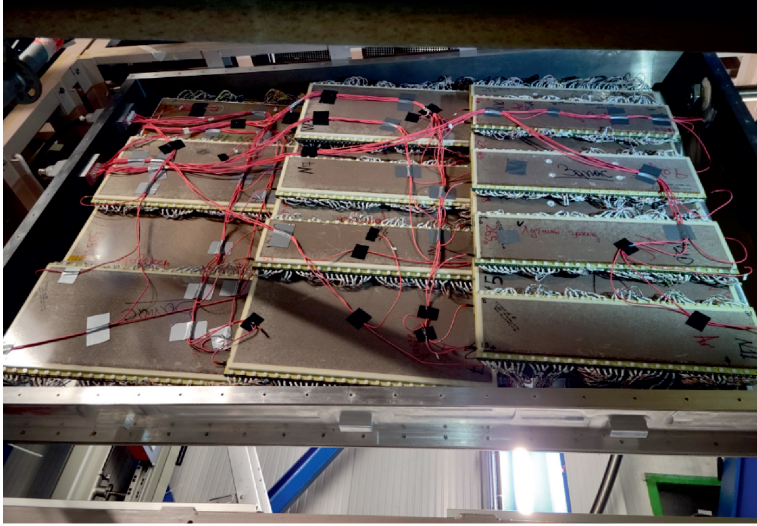
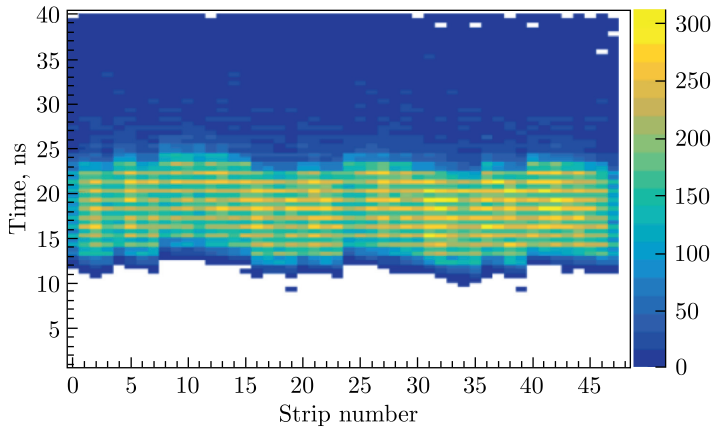


Рис. 8. Левое плечо времяпролетной системы NA61/SHINE

Рис. 9. Пример контроля качества набранных данных с одного МРПК-детектора ToF-L для РbРb при энергии 150 ГэВ/нуклон. По оси X представлен номер стрипа, по оси Y — время прихода сигнала

мишени эксперимента T2K. Физический набор данных по программе сильных взаимодействий, расширенной исследованием образования D -мезонов в столкновениях ядер Рb при энергии 150 ГэВ/нуклон, успешно завершен в конце 2022 г. с накопленной статистикой порядка 56 млн событий. Пример контроля качества набранных данных с одного МРПК-детектора ToF-L для РbРb при энергии 150 ГэВ/нуклон представлен на рис. 9. Неравномерность обусловлена отсутствием калибровочных коррекций.

Работы по изготовлению второго плеча (ToF-R) времяпролетной системы завершены. Наличие второго плеча ToF-R позволяет полностью перекрыть акцептанс установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новая $1728 \times 2 = 3456$ канальная времяпролетная система эксперимента NA61/SHINE создана на базе многоазорной резистивной плоской камеры с аналоговым считыванием. Особенность дизайна системы заключается в использовании аналогового накамерного усилителя и системы сбора данных на основе модуля DRS4. В результате этой работы создана принципиально новая концепция времяпролетного детектора МРПК, сочетающая в себе эффективность регистрации частиц при интенсивностях до 2 кГц/см^2 , временное разрешение лучше 52 пс и координатное разрешение в плоскости детектора лучше 5 мм .

После ввода в эксплуатацию обновленной установки в 2022 г. успешно проведены два сеанса набора данных: в рамках программ исследований по нейтринной физике и по тяжелым ионам.

Благодарности. Представленные результаты были получены в ЛФВЭ ОИЯИ. Авторы выражают благодарность В. А. Матвееву за финансовую поддержку работы; Н. Горбунову за интерес к данной работе и ценные комментарии по содержанию работы; М. Гадзитскому за поддержку и интерес к работе; М. Куих и П. Подласки (University of Warsaw), а также Р. Шукевичу и М. Куховичу (University of Wrocław) за помощь при вводе в эксплуатацию установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abgrall N. et al. (NA61/SHINE Collab.). NA61/SHINE Facility at the CERN SPS: Beams and Detector System // J. Instrum. 2014. V. 9. P. P06005; arXiv:1401.4699 [physics.ins-det].*
2. Addendum to the NA61/SHINE Proposal: Request for Oxygen Beam in Run 3. Rep. CERN / Executor M. Gazdzicki. Geneva, 2022; <https://cds.cern.ch/record/2810689>.
3. *Aduszkiewicz A. et al. A High-Resolution Pixel Silicon Vertex Detector for Open Charm Measurements with the NA61/SHINE Spectrometer at the CERN SPS. arXiv:2302.00563. 2023.*
4. Addendum to the NA61/SHINE Proposal: A Low-Energy Beamline at the SPS H2. Rep. CERN / Executor Y. Nagai. Geneva, 2021; <https://cds.cern.ch/record/2783037>.
5. *Unger M. et al. (NA61/SHINE Collab.). New Results from the Cosmic-Ray Program of the NA61/SHINE Facility at the CERN SPS // PoSI. 2020. V. CRC2019. P. 446; Proc. of the 36th Intern. Cosmic Ray Conf. (ICRC 2019). arXiv:1909.07136.*
6. Study of Hadron–Nucleus and Nucleus–Nucleus Collisions at the CERN SPS: Early Post-LS2 Measurements and Future Plans. Rep. CERN / Executor A. Aduszkiewicz. Geneva, 2018. <https://cds.cern.ch/record/2309890>.
7. *Babkin V. et al. Beam Test Results of the MRPC Prototype for the New NA61/SHINE ToF System // Nucl. Instr. Meth. A. 2022. V. 1034. P. 166735.*
8. *Babkin V. et al. Triple-Stack Multigap Resistive Plate Chamber with Strip Readout // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 824. P. 490–492.*
9. Report from the NA61/SHINE Experiment at the CERN SPS. Rep. CERN / Executor A. Aduszkiewicz. Geneva, 2016; <https://cds.cern.ch/record/2222876>.
10. *Liu J. et al. Design of a Prototype Readout Electronics with a Few Picosecond Time Resolution for MRPC Detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 2019. V. 925. P. 53–59.*
11. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADL5565.pdf>
12. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8009.pdf>

13. *Schmidt B.* EP-DT Annual Report 2021. 2022. <https://cds.cern.ch/record/2813398>.
14. *Afanasyev S. et al.* Multichannel Time-of-Flight Detector for NA49 Hadron Spectrometer at CERN // JINR Rapid Commun. 1997. V. 5[85]. P. 69.

Получено 15 августа 2023 г.