

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074

АМПЛИТУДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОТОТИПОВ ПЕРЕДНИХ ГОДОСКОПОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА VM@N

© 2021 г. А. Г. Баранов^а, Ф. Ф. Губер^а, А. П. Ивашкин^а, А. В. Известный^а,
С. В. Морозов^а, А. И. Решетин^а, В. А. Басков^б, В. А. Дронов^б, А. И. Львов^б,
В. В. Полянский^б, Г. Х. Салахутдинов^{с,*}, П. Ю. Наумов^с

^а Институт ядерных исследований РАН
Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Физическая, вл. 27

^б Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

^с Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

*e-mail: saip07@mail.ru

Поступила в редакцию 23.09.2020 г.

После доработки 02.11.2020 г.

Принята к публикации 06.11.2020 г.

Описаны конструкции годоскопов ядерных фрагментов на основе кварцевых и сцинтилляционных пластин со съемом света кремниевыми лавинными фотодиодами. Годоскопы планируется использовать в эксперименте VM@N для регистрации тяжелых фрагментов ядер вблизи оси пучка тяжелых ионов. Приведены результаты измерений световых выходов элементов детекторов на основе кварцевых и сцинтилляционных пластин на пучке электронов синхротрона ФИАН “Пахра”. Результаты измерений однородности светосбора указывают на необходимость использования двухстороннего съема света с противоположных сторон годоскопов.

DOI: 10.31857/S0032816221020129

ВВЕДЕНИЕ

Исследовательская программа эксперимента VM@N (Barionic Matter at Nuclotron) [1] направлена на изучение образования (мульти) странных гиперонов и поиск гиперядер в ядро-ядерных столкновениях при энергиях ионов пучка до 4.5 АГэВ (где А – массовое число). На этой установке получены первые экспериментальные результаты в столкновениях легких ядер [2]. После завершения реконструкции бустера нуклотрона эксперименты продолжатся и на пучках тяжелых ионов (вплоть до ионов золота). Для определения центральности в ядро-ядерных столкновениях в этих экспериментах будет использоваться новый передний адронный калориметр с продольной и поперечной сегментацией (FNCal).

Схема калориметра FNCal показана на рис. 1. Калориметр состоит из 54-х отдельных модулей. Для сборки его внешней части были использованы двадцать модулей адронного калориметра эксперимента CBM (Compressed Barionic Matter) на сооружаемом ускорительном комплексе FAIR [3]. Модули имеют поперечные размеры 20 × 20 см и длину, эквивалентную 5.6 длины ядерного взаи-

модействия. Эти модули будут временно использоваться в адронном калориметре эксперимента VM@N до начала запуска эксперимента CBM на FAIR.

Внутренняя часть калориметра FNCal состоит из 34 модулей с поперечным размером 15 × 15 см и более короткой длиной, равной четырем длинам ядерного взаимодействия. Эти внутренние модули идентичны модулям передних адронных калориметров эксперимента MPD (Multi Purpose Detector) на ускорительном комплексе NICA [4]. Модули обоих типов имеют одинаковую внутреннюю структуру и состоят из слоев сцинтилляторов толщиной 4 мм, чередующихся со свинцовыми пластинами толщиной 16 мм. Модули разработаны и изготовлены в ИЯИ РАН. На рис. 16 показана фотография полностью собранного калориметра, который установлен на экспериментальной установке VM@N.

Особенностью калориметра FNCal является наличие сквозного квадратного отверстия размером 15 × 15 см в центре калориметра. Это отверстие необходимо для прохождения пучка тяжелых ионов с интенсивностью до $2 \cdot 10^6$ ионов/с на ло-

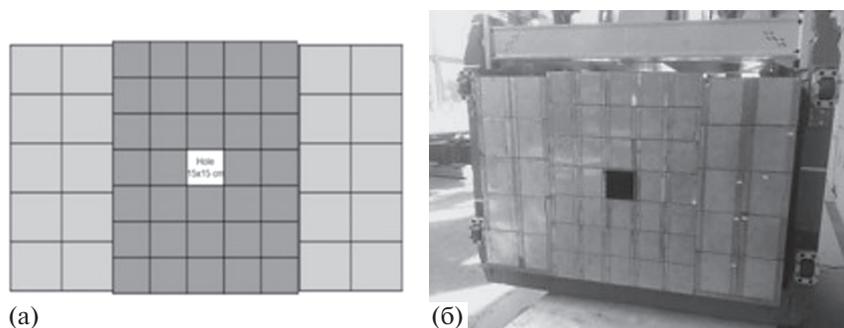


Рис. 1. Передний адронный калориметр FHCAL: **а** – схема переднего адронного калориметра; **б** – фотография собранного адронного калориметра.

вушку пучка, установленную позади калориметра, для предотвращения как радиационных поврежденных сцинтилляционных пластин центральных модулей калориметра, так и активации калориметра.

ГОДОСКОП ЯДЕРНЫХ ФРАГМЕНТОВ

Через пучковое отверстие в калориметре наблюдается значительная утечка тяжелых фрагментов, что, как следствие, приводит к немонотонной зависимости выделенной энергии в калориметре от центральности в ядро-ядерных столкновениях. Для решения этой проблемы предлагается использовать годоскоп ядерных фрагментов, установленный в отверстии калориметра, который будет измерять заряды тяжелых фрагментов-спектаторов. Эта информация с переднего годоскопа позволит, как показывают результаты моделирования, восстановить энергию фрагментов и учесть ее при реконструкции полной энергии спектаторов вместе с энергией, измеренной калориметром. При

этом зависимость суммарной энергии от центральности становится монотонной, что позволит определить центральность взаимодействия. Также показано, что для определения центральности можно использовать двумерные корреляции между выделенной энергией в калориметре и суммой зарядов фрагментов, измеренных в годоскопе [5].

Поскольку эксперименты будут проводиться с различными пучками ионов, предполагается использовать годоскопы двух типов. На пучках легких ядер будет использоваться сцинтилляционный годоскоп, а с тяжелыми ядрами – кварцевый годоскоп.

Общие структуры обоих годоскопов достаточно схожи, за исключением схемы съема сигналов. Схема и фотография годоскопа показаны на рис. 2. Он состоит из 16-ти кварцевых либо сцинтилляционных пластин длиной 160 мм, толщиной 4 мм и шириной 10 мм. Активная площадь годоскопа составляет $160 \times 160 \text{ мм}^2$. Каждая пластина годоскопа обернута отражателем – тонкой пленкой алюминированного майлара. Свет от каждой из 16-ти кварцевых пластин считывается с двух противоположных торцов двумя парами фотодиодов. Свет со сцинтилляционных пластин считывается с двух противоположных торцов одиночными фотодиодами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для определения амплитудных параметров сцинтилляционных и кварцевых детекторов годоскопа была создана установка, состоящая из двух детекторов: один – на основе кварцевой, а другой – на основе сцинтилляционной пластины. Свет с кварцевой пластины регистрировался двумя парами фотодиодов, а в сцинтилляционной – одиночными фотодиодами, установленными на противоположных торцах пластины.

В детекторах использовались лавинные фотодиоды (кремниевые фотоумножители) МРРС

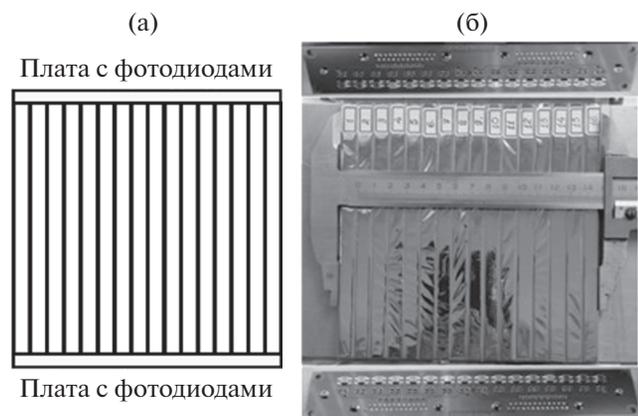


Рис. 2. Схема годоскопа ядерных фрагментов: **а** – передний годоскоп, состоящий из 16-ти кварцевых или сцинтилляционных пластин и двух электронных плат с фотодиодами, размещенными на торцах пластин; **б** – фото переднего годоскопа в процессе сборки.

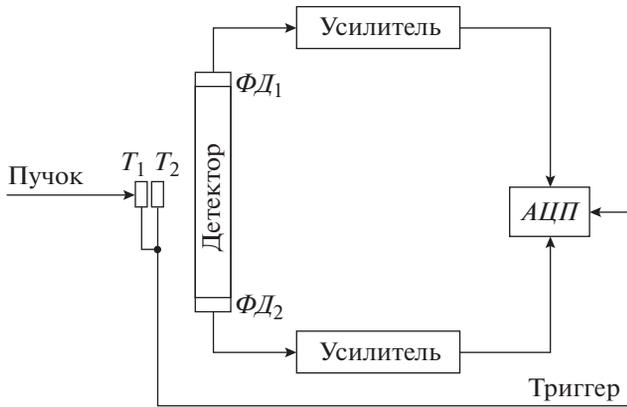


Рис. 3. Схема установки по исследованию параметров прототипов детекторов годоскопа ядерных фрагментов на пучке электронов синхротрона ФИАН “Пахра”. T_1, T_2 – пучковые сцинтилляционные триггерные счетчики (размером $10 \times 10 \times 5$ мм); $\Phi D_1, \Phi D_2$ – фотодиоды; АЦП – амплитудно-цифровой преобразователь; Детектор – кварцевая или сцинтилляционная пластина.

S12572-015P производства фирмы Hamamatsu с размером активной области 3×3 мм и квантовой эффективностью около 20%. Благодаря пиксельной структуре данные фотодиоды имеют высокий коэффициент усиления, сравнимый с усилением традиционных вакуумных фотоэлектронных умножителей.

В детекторе с кварцевой пластиной каждая пара фотодиодов была параллельно объединена, так чтобы напряжение питания, а также съём сигнала были общими для обоих фотодиодов. Сигналы с каждой пары фотодиодов поступали на быстрые усилители, размещенные вблизи детектора на одной несущей раме, изготовленной из органического стекла. Схема установки приведена на рис. 3.

АМПЛИТУДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КВАРЦЕВОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО ДЕТЕКТОРА

Собранный детектор был исследован на тестовом пучке электронов с энергией 300 МэВ синхротрона ФИАН “Пахра”. Схема установки по исследованию параметров прототипов детекторов годоскопа ядерных фрагментов приведена на рис. 3.

Вид амплитудного спектра с каждой из двух пар фотодиодов кварцевого детектора представлен на рис. 4. Дискретная структура спектра отражает амплитуды сигналов, соответствующих числу зарегистрированных фотоэлектронов в фотодиодах. Как видно, параметры фотодиодов, а также низкие шумы усилителей позволяют идентифицировать вклад в сигнал от отдельного фотоэлектрона. Из соотношения количества нулевых и ненулевых событий в этом амплитудном спектре, согласно свойствам пуассоновского распределения, можно определить среднее амплитудное значение спектра.

Было определено, что среднее амплитудное значение спектра составляет 2.4 фотоэлектрона для одной пары фотодиодов и 5 фотоэлектронов при считывании кварцевых пластин с обоих торцов двумя парами фотодиодов.

Зависимости неоднородности светосбора от координаты точки прохождения пучка вдоль кварцевых пластин приведены на рис. 5. Кривые 1, 2 соответствуют величине неоднородности световыхода, полученного двумя парами фотодиодов, размещенных на противоположных торцах пластины. Кривая 3 соответствует неоднородности суммарного световыхода по сигналам фотодиодов с противоположных торцов. Поскольку пары фотодиодов размещены на противоположных торцах пластин, световыход должен быть антикоррелирован, что и наблюдается экспериментально.

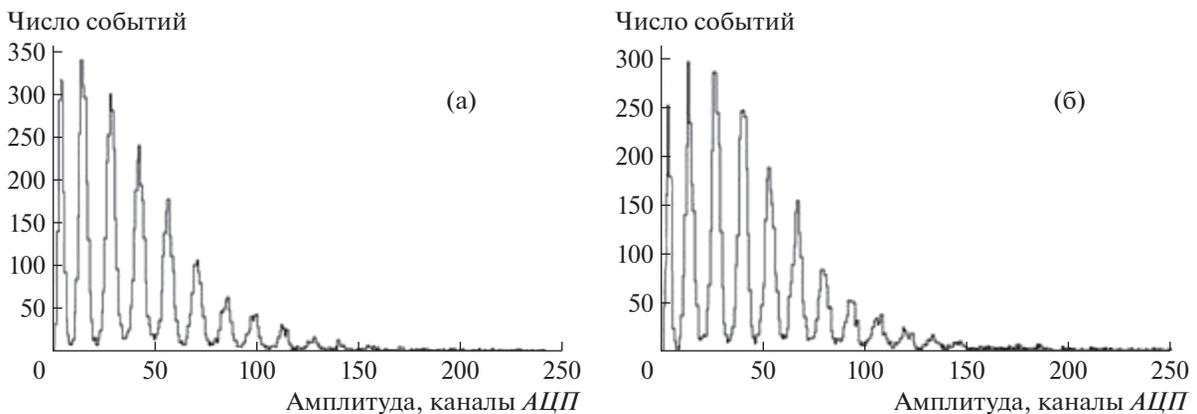


Рис. 4. Амплитудные спектры с двух пар фотодиодов при прохождении пучка электронов через центр кварцевой пластины: **а** – первая пара фотодиодов; **б** – вторая пара фотодиодов.

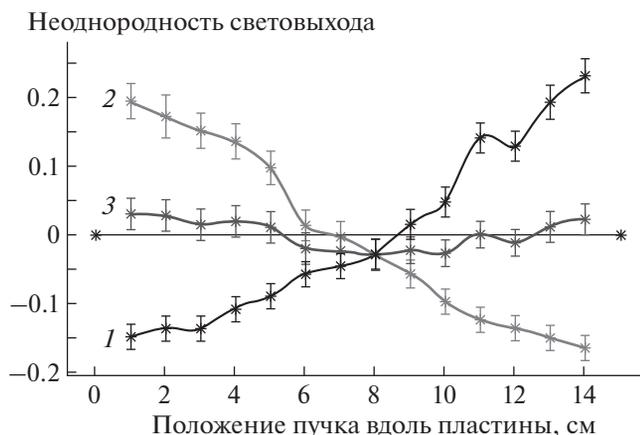


Рис. 5. Изменение неоднородности световых выходов вдоль длины кварцевой пластины. 1 и 2 — неоднородность световых выходов, полученного двумя парами фотодиодов, размещенных на противоположных торцах пластины; 3 — неоднородность суммарного световых выходов по сигналам фотодиодов с противоположных торцов.

Средний световой выход с двух торцов пластины составляет ~ 5 фотоэлектронов, что позволяет надежно регистрировать даже частицы с зарядом $Z = 1$. Поскольку интенсивность черенковского излучения пропорциональна квадрату заряда, для фрагментов с $Z = 2$ величина сигнала должна составлять уже около 20 фотоэлектронов. Отметим, что сильная зависимость амплитуды сигнала от расстояния до фотодиода может быть использована для определения координаты прохождения частицы через годоскоп.

Согласно рис. 5, в случае использования съема света только с одного торца кварцевой пластины неоднородность светосбора составляет около $\pm 20\%$, что, очевидно, является недопустимой величиной. В то же время использование двухсторонне-

го съема света с обоих торцов кварцевой пластины позволяет уменьшить неоднородность светосбора до $\pm 3\%$, что обеспечивает удовлетворительную точность определения величины заряда фрагмента.

АМПЛИТУДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА

В детекторе со сцинтилляционной пластиной световой выход на порядки превышает количество света от черенковского излучения в кварцевой пластине. Чтобы регистрировать амплитуды в пределах динамического диапазона, используемого АЦП, с противоположных торцов пластины использовалось по одному фотодиоду. Коэффициент усиления лавинных фотодиодов был снижен в несколько раз путем уменьшения напряжения питания на фотодиодах более чем на 2 В. Соответственно квантовая эффективность фотодиодов также была снижена в несколько раз. Тем не менее, амплитуда сигналов от проходящего электрона составляла сотни фотоэлектронов.

Амплитудный спектр с каждого фотодиода представлен на рис. 6. Как видно, благодаря большому количеству регистрируемых фотоэлектронов, спектр имеет непрерывную, а не дискретную структуру. Большой пик в начале шкалы соответствует нулевым сигналам в случае прохождения электронов мимо сцинтилляционной пластины.

Поскольку амплитуды сигналов составляют сотни фотоэлектронов, основная проблема в идентификации фрагментов с различными зарядами состоит не в статистических флуктуациях амплитуд сигналов, а в неоднородности светосбора вдоль длины сцинтилляционной пластины.

С этой целью были измерены амплитуды сигналов с фотодиодов при сканировании положения электронного пучка вдоль длины пластины. Зависимость относительной амплитуды сигнала

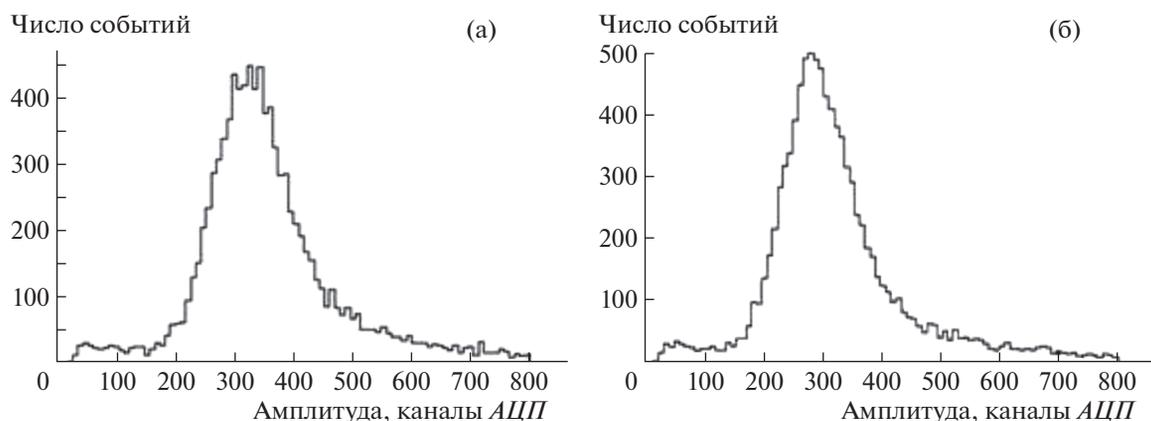


Рис. 6. Амплитудные спектры с первого (а) и второго (б) фотодиода в случае прохождения пучка электронов через центр сцинтилляционной пластины.

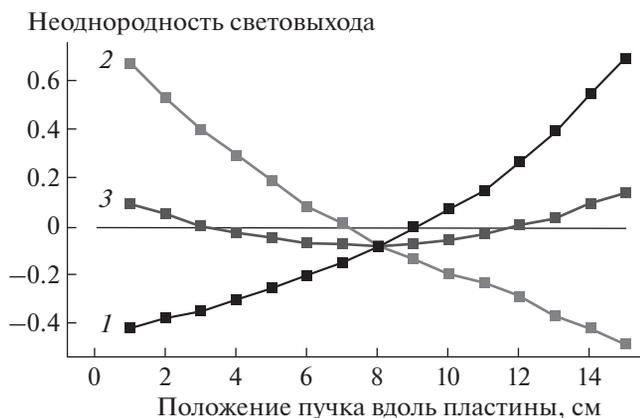


Рис. 7. Зависимости неоднородности световыхода сигнала от координаты точки прохождения пучка вдоль оси сцинтилляционной пластины. 1 и 2 – неоднородность световыхода сигналов с фотодиодов, размещенных на противоположных торцах пластины; 3 – неоднородность суммарного световыхода по сигналам фотодиодов с противоположных торцов.

от координаты точки прохождения пучка вдоль оси пластины показана на рис. 7. Как видно, амплитуда сигнала при положении пучка вблизи фотодиода практически в 2 раза превышает амплитуду с противоположного конца сцинтилляционной пластины. Данная особенность может быть использована для восстановления координаты точки прохождения фрагментов вдоль оси пластин годоскопа. Усредненная вдоль длинной стороны пластины неоднородность светосбора составила для сцинтилляционного детектора $\pm 10\%$. Большую величину неоднородности сцинтилляционной пластины по сравнению с кварцевой пластиной можно объяснить большим коэффициентом поглощения света в сцинтилляторе из-за наличия сцинтилляционных и спектросмещающих добавок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные на пучке электронов тесты прототипов сцинтилляционного и кварцевого детекторов годоскопа ядерных фрагментов показали необходимость использования двухстороннего съема света с кварцевых и сцинтилляционных пластин. Полученные световыход и однородность светосбора позволят надежно идентифицировать заряд фрагментов во всем диапазоне, начиная с легких фрагментов и заканчивая ядрами золота. С целью дальнейшего увеличения светового выхода кварцевого детектора предполагается использовать новейшие кремниевые фотоумножители S14160-3015PS фирмы Hamamatsu (Япония) с квантовой эффективностью регистрации света в 1.5 раза выше, чем у фотодиодов, использованных в данной работе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа частично поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований № 18-02-40081-мега, № 18-02-40061-мега и № 18-02-40079-мега.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. BM@N collaboration. Conceptual design report of BM@N. Russia, 2013. <http://nica.jinr.ru/files/BM@N/BMN-CDR.pdf>
2. *Kapishin M.* Studies of baryonic matter in the BM@N and MPD experiments at Nuclotron/NICA. PoS(CORFU2018)188, 2019.
3. Technical design report for the CBM Projectile Spectator Detector (PSD) / Ed. by F. Guber, I. Selyuzhenkov. GSI-2015-02020. GSI Darmstadt, 2015.
4. *Ivashkin A., Finogeev D., Golubeva M., Guber F., Izvestnyy A., Karpushkin N., Morozov S.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2020. V. A 958. P. 162240. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.05.081>
5. *Guber F., Finogeev D., Golubeva M., Ivashkin A., Izvestnyy A., Kapishin M., Karpushkin N., Morozov S., Petukhov O.* // JINST. 2020. V. 15. № 5. C05020. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/05/C05020>