

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕМ-ДЕТЕКТОРОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ VM@N

С. Е. Васильев^a, А. В. Галаванов^{a,б}, М. Н. Капишин^a, В. Ю. Каржавин^a,
Е. М. Кулиш^{a,1}, В. В. Ленивенко^a, А. М. Маканькин^a, А. И. Максимчук^{a,2},
С. М. Пядин^a, С. В. Хабаров^a

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Эксперимент VM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) направлен на изучение ядро-ядерных (вплоть до золото–золото) столкновений в экстремальных условиях. Высокая интенсивность взаимодействий и большая множественность заряженных частиц в каждом событии обуславливают повышенные требования к детекторам: высокое пространственное и временное разрешение, стабильную работу при загрузках до 10^6 см^{-2} . Именно по этой причине в качестве главного трекового детектора были выбраны многослойные GEM (Gas Electron Multipliers) детекторы, обладающие всеми вышеперечисленными характеристиками. Описана конструкция GEM-детекторов, используемых в эксперименте VM@N, и представлены результаты исследований их характеристик.

VM@N experiment (Baryonic Matter at Nuclotron) is aimed to study core–core (up to gold–gold) collisions in extreme conditions. High intensity of interactions and large multiplicity of charged particles in each event cause special requirements to detectors: high spatial and time resolution, stable operation at loadings up to 10^6 cm^{-2} . As soon as triple GEM (Gas Electron Multipliers) possess all above-mentioned characteristics, they were chosen as the main track detector. In the paper the construction of the VM@N GEM detectors is described and the study of their characteristics is presented.

PACS: 29.40.Cs; 29.40.Gx; 25.75.-q

ВВЕДЕНИЕ

Исследование свойств ядерной материи в экстремальных условиях — одно из наиболее интенсивно развивающихся направлений современной физики. Эксперименты по столкновению тяжелых ионов, в которых создаются условия сверхвысоких температур и плотностей, активно ведутся или планируются в различных мировых научных центрах. На изучение ядро-ядерных (вплоть до золото–золото) столкновений при больших плотностях и направлен VM@N — первый эксперимент, который начал свою работу на ускорительном комплексе «Нуклотрон–НИСА». Целью этого эксперимента является изучение взаимодействия пучков релятивистских тяжелых ионов с фиксированными мишенями. В центре внимания экспериментальных исследований находятся адроны со странностью,

¹E-mail: elena.kulich@cern.ch

²E-mail: maksymchuk@jinr.ru

которые рождаются в столкновении и не присутствуют в исходном состоянии двух сталкивающихся ядер. Диапазон энергий пучка тяжелых ионов нуклотрона соответствует $\sqrt{s_{NN}} = 2,3-3,5$ ГэВ. Такие энергии хорошо подходят для изучения странных мезонов и мультистранных гиперонов, которые рождаются в ядро-ядерных столкновениях близко к кинематическому порогу и к области энергий, где согласно предсказаниям тепловой модели вероятность рождения гиперядер максимальна [1].

В данной работе представлены результаты измерений основных характеристик детекторов центральной трековой системы эксперимента VM@N. Измерения были проведены как на частицах космических лучей, так и с использованием радиоактивных источников ^{55}Fe и ^{106}Ru .

1. ЦЕНТРАЛЬНАЯ ТРЕКОВАЯ СИСТЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА VM@N

1.1. Экспериментальная установка VM@N. Измерения будут проводиться на создаваемой для этого экспериментальной установке, расположенной на выведенном пучке нуклотрона. Схема конфигурации установки VM@N представлена на рис. 1. Детекторы данной установки должны обеспечить измерение параметров треков регистрируемых заряженных частиц, определение их импульсов (по кривизне треков в магнитном поле и полному углу отклонения после выхода из магнитного поля), а также возможность их надежной идентификации. Значение магнитного поля анализирующего магнита может варьироваться до 1 Тл, чтобы оптимизировать геометрическую эффективность и им-

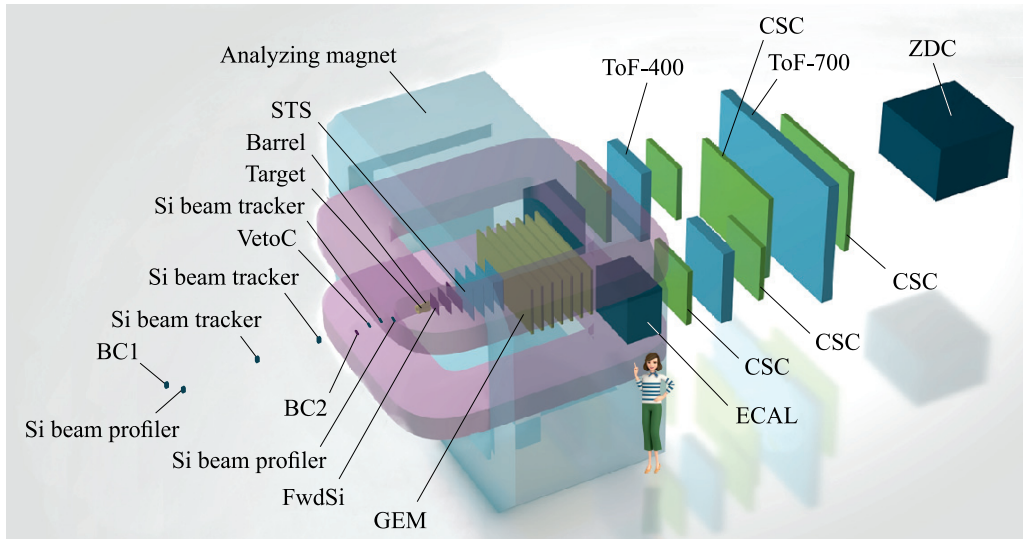


Рис. 1. Схема экспериментальной установки VM@N: FwdSi (Forward double-sided silicon strip detectors) — передние двухсторонние кремниевые детекторы; STS (Silicon Tracking System) — кремниевая трековая система; GEM (Gas Electron Multipliers) — газовые электронные умножители; CSC (Cathode Strip Chambers) — катодно-стриповые камеры; ToF-400, ToF-700 — многозаронные резистивные плоские камеры; ECAL (Electromagnetic Calorimeter) — электромагнитный калориметр; ZDC (Zero Degree Calorimeter) — калориметр нулевого угла; BC1, BC2, VetoC — группа триггерных счетчиков

пульсное разрешение для различных реакций и энергий пучка. Измерения параметров треков регистрируемых заряженных частиц будут проводиться с помощью семи плоскостей GEM-детекторов, расположенных за мишенью внутри магнита, и шести плоскостей CSC, расположенных вне магнитного поля. Кроме того, между мишенью и трековой системой на базе GEM-детекторов будут установлены плоскости FwdSi и STS для улучшения точности восстановления треков частиц и вершины взаимодействия. Времяпролетные детекторы ToF-400 и ToF-700 позволят разделять адроны (π , K , p) и легкие ядра с импульсом до нескольких ГэВ/с. Калориметр ZDC предназначен для определения прицельного параметра столкновения путем измерения энергии частиц-фрагментов, образовавшихся после столкновения с мишенью. Детектор T0 будет использован для измерения степени центральности столкновения тяжелых ионов, формирования стартового сигнала для времяпролетной системы, а также совместно со счетчиками BC1, BC2, VetoC для формирования триггера. Для устранения фона от взаимодействия пучка тяжелых ионов с воздухом будет установлен вакуумный ионопровод.

1.2. Основные требования к детекторам центральной трековой системы эксперимента BM@N. Трековая система эксперимента BM@N позволит проводить точные измерения импульсов каскадных распадов мультитранных гиперонов и гиперъядер, возникающих в центральных Au–Au-столкновениях. Все физические измерения будут проводиться в условиях высокой интенсивности пучка ионов (10^6 с $^{-1}$) и большой множественности заряженных частиц. Такая задача предполагает использование детекторов с возможностью распознавания множества треков.

Таким образом, основные требования к трековой системе:

- возможность стабильной работы в условиях высоких нагрузок (до 10^5 Гц/см 2);
- высокое пространственное и импульсное разрешение;
- геометрическая эффективность более 95 %;
- максимально возможный аксептанс в пределах апертуры анализирующего магнита установки BM@N;
- способность стабильно работать в магнитном поле до 1 Тл.

Именно по этой причине в качестве главного трекового детектора были выбраны многослойные GEM, обладающие всеми вышеперечисленными характеристиками.

1.3. Конструкция многослойных GEM-детекторов. В связи с конструктивными особенностями канала BM@N разработаны GEM-детекторы с активной областью двух разных размеров (163×45 см и 163×39 см), для того чтобы охватить максимально возможный аксептанс в пределах размеров апертуры анализирующего магнита. Производство и сборка детекторов располагается в ЦЕРН (PH Detector Technologies (DT) и Micro-Pattern Technologies (MPT)). Каждый детектор состоит из катодной плоскости, трех газовых электронных умножителей (ГЭУ/GEM) и анодной считывающей плоскости. Используемый ГЭУ представляет собой тонкую диэлектрическую каптоновую пленку толщиной 50 мкм, покрытую с обеих сторон медью толщиной 5 мкм, с регулярной структурой отверстий диаметром 70 мкм и шагом 140 мкм [2]. Конфигурация газовых зазоров представлена на рис. 2, а: дрейфовый зазор 3 мм, первый трансферный зазор 2,5 мм, второй трансферный зазор 2 мм и индукционный зазор 1,5 мм. В центральной области детекторов GEM имеется отверстие диаметром 80 мм для установки вакуумного ионопровода. Для обеспечения жесткости конструкции детектора используются сотовые пластины. Разность потенциалов в газовых зазорах и на пленках создается с помощью высоковольтного делителя.

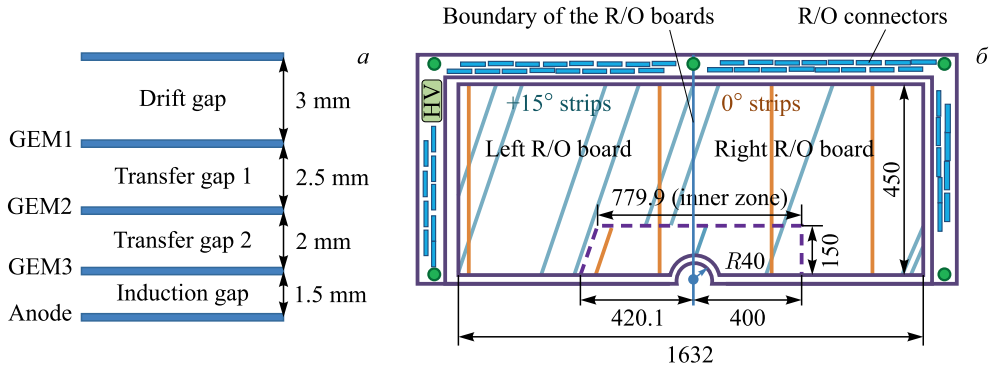


Рис. 2. а) Геометрия газовых зазоров; б) схема считывающей плоскости GEM, используемой в эксперименте BM@N

1.3.1. Конструкция считывающей платы. Двухкоординатное считывание сигнала выполняется на многослойной печатной плате двумя наборами параллельных металлических стрипов (рис. 2, б). Углы наклона стрипов нижнего слоя (координата X) и стрипов верхнего слоя (координата X') к вертикальной оси составляют 0 и 15° соответственно. Ширина полос X и X' составляет 680 и 160 мкм соответственно. Шаг составляет 800 мкм для обоих слоев. Из-за большого количества заряженных частиц вблизи пучка считывающая плоскость разделена на внешнюю и внутреннюю («горячую») зоны.

1.3.2. Разделение пленок ГЭУ на сектора. Пленки ГЭУ размером 163×45 см и 163×39 см разделены на сектора. Высокое напряжение на каждый сектор подается индивидуально через высокоомные защитные резисторы, для того чтобы уменьшить энергию, накапливающуюся в пленке. Для первой произведенной камеры была выбрана конструкция с вертикальными секторами (рис. 3, а). Это приводит к регулярным провалам

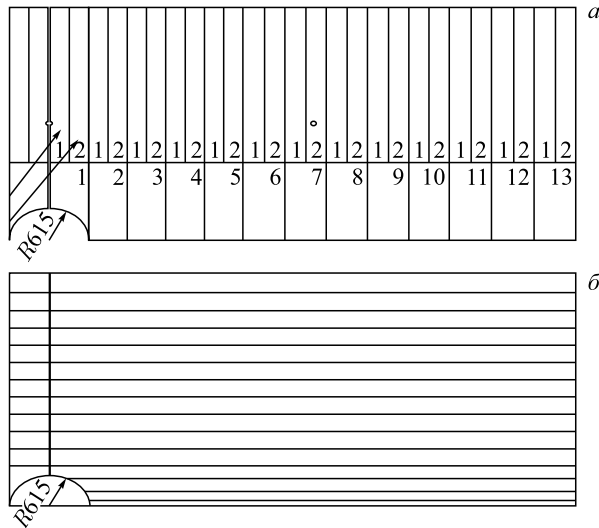


Рис. 3. Вертикальные (а) и горизонтальные (б) сектора

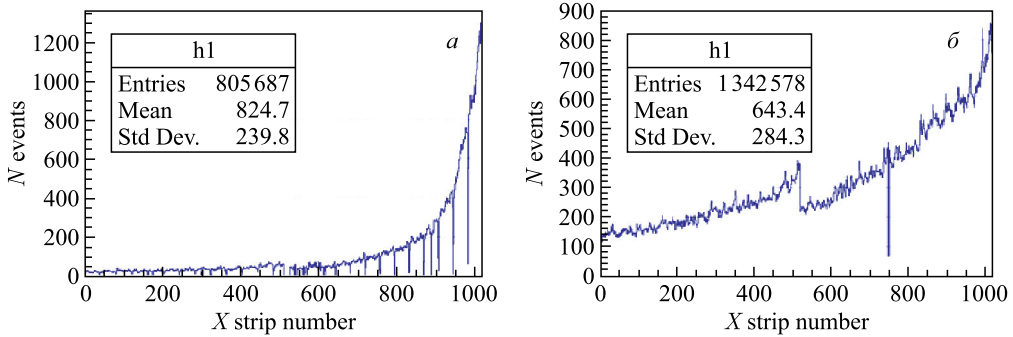


Рис. 4. Зависимость количества событий от номера X стрипа для вертикальных (a) и горизонтальных (b) секторов ГЭУ-пленок

в распределении событий для X стрипов (рис. 4, a). Провалы совпадают с соответствующими неактивными границами секторов. В области провала наблюдается ухудшение точности восстановления частиц. Для улучшения разрешения детектора по координате X была разработана конструкция пленки с горизонтальными секторами (рис. 3, b). Распределение событий для X стрипов для детектора с пленками такого типа показано на рис. 4, b .

1.4. Считывающая электроника и система сбора данных. Считывающая электроника GEM-детекторов основана на 32-канальном чипе VA163 (IDEAS) (<https://ideas.no/ideas-ic-products/>). Каждый канал VA163 содержит зарядочувствительный предварительный усилитель, формирователь с пиковым временем 500 нс и схему удержания выборки. Аналоговый мультиплексор с 32 входами позволяет осуществлять последовательное считывание каналов. Одна считывающая плата содержит 4 чипа. Мультиплексированные данные с каждой платы передаются в 12-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), опрашиваемый системой сбора данных BM@N (<https://afi.jinr.ru/>).

В будущем для физической программы эксперимента с пучками тяжелых ионов высоких интенсивностей планируется интегрировать новую быструю считывающую электронику. В качестве возможных вариантов рассматриваются интегральные схемы специального назначения (VMM3 [3] и TIGER [4]) с возможностью измерения информации о времени и амплитуде.

2. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК

2.1. Оптимизация параметров GEM-детекторов. Для обеспечения эффективной работы детектора и снижения вероятности пробоя была проведена оптимизация величин электрического поля в газовых зазорах GEM. Измерения проводились с использованием небольшого GEM-детектора с активной площадью 10×10 см, облучаемого радиоактивным источником ^{55}Fe . Поперечная структура газовых зазоров исследовавшегося детектора аналогична структуре детекторов GEM, используемых в эксперименте. Все измерения были выполнены для двух газовых смесей: Ar(70)/CO₂(30) и Ar(90)/C₄H₁₀(10).

Газовое усиление трехслойного GEM-детектора зависит от коэффициентов прозрачности дрейфового, индукционного и обоих трансферных газовых зазоров:

$$\text{GasGain} = \lambda_{\text{drift}} G1 \lambda_{1\text{ext}} \lambda_{1\text{inj}} G2 \lambda_{2\text{ext}} \lambda_{2\text{inj}} G3 \lambda_{\text{ind}}. \quad (1)$$

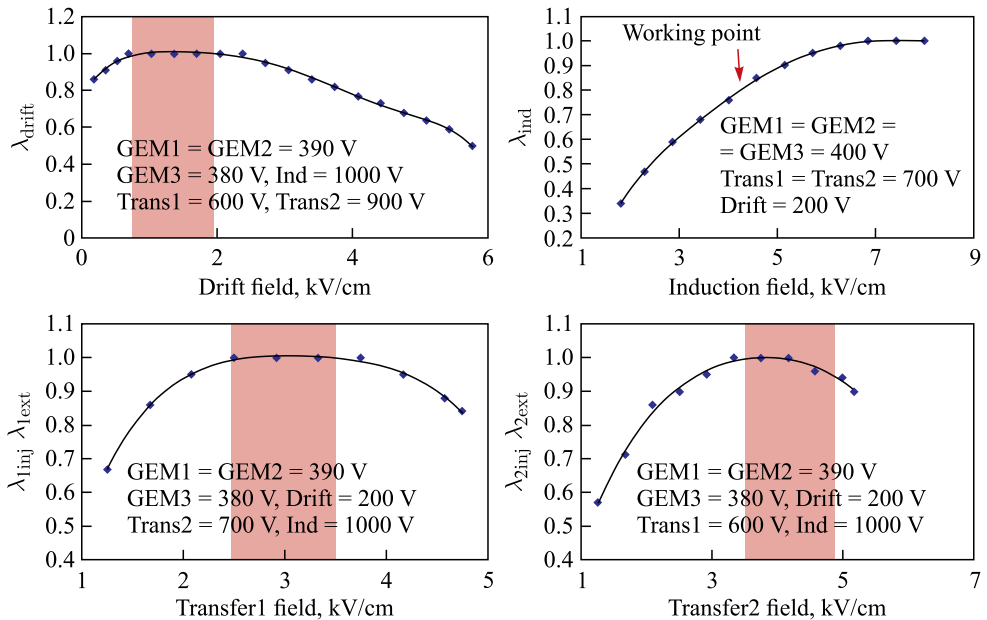


Рис. 5. Результаты оптимизации напряженности электрического поля в газовых зазорах GEM-детектора для газовой смеси $\text{Ar}(70)/\text{CO}_2(30)$

Коэффициент прозрачности дрейфового зазора λ_{drift} определяется отношением числа электронов, достигших отверстий усиления GEM1 (см. рис. 2, а), к общему количеству электронов, образованных в дрейфовом зазоре. Коэффициент λ_{drift} для смеси $\text{Ar}(70)/\text{CO}_2(30)$ достигает максимума в диапазоне значений напряженности электрического поля 0,7–2,0 кВ/см (рис. 5). Максимальная прозрачность смеси $\text{Ar}(90)/\text{C}_4\text{H}_{10}(10)$ достигается при более низких значениях электрического поля: 0,3–1,1 кВ/см. Таким образом, чем меньше значение электрического поля в дрейфовом зазоре, тем выше его прозрачность (исключая случаи очень слабого поля). Но можно наблюдать совершенно противоположную зависимость для значения коэффициента прозрачности индукционного зазора λ_{ind} (см. рис. 5). Оптимальное значение поля для этого зазора составляет около 6,5 кВ/см для $\text{Ar}(70)/\text{CO}_2(30)$ и 4,6 кВ/см для $\text{Ar}(90)/\text{C}_4\text{H}_{10}(10)$. Однако при таких значениях электрического поля высока вероятность пробоя, поэтому рабочая точка для $\text{Ar}(70)/\text{CO}_2(30)$ была выбрана равной 4,2 кВ/см, а для $\text{Ar}(90)/\text{C}_4\text{H}_{10}(10)$ — 3,2 кВ/см. Прозрачность трансферных зазоров определяется произведением коэффициента извлечения электронов из верхних пленок ГЭУ и коэффициента инжекции электронов в нижние пленки ГЭУ — $\lambda_{1\text{ext}}\lambda_{1\text{inj}}$ и $\lambda_{2\text{ext}}\lambda_{2\text{inj}}$ (см. рис. 5). Выбор значения высокого напряжения, подаваемого на пленки GEM1–GEM3, основан на результатах исследований, выполненных группой GEM эксперимента COMPASS [5]. Вероятность пробоя при заданном значении общего усиления сильно уменьшается за счет применения асимметричных значений напряжения (см. (2)). Оптимальное значение асимметрии A составляет 0,18:

$$A = \frac{\Delta V_{\text{GEM1}} - \Delta V_{\text{GEM3}}}{\Delta V_{\text{GEM2}}}. \quad (2)$$

2.2. Измерения газового усиления GEM-детекторов. Измеренный коэффициент усиления чипа VA163 составляет 3,3 отсчета АЦП на 1 фКл. Чтобы достичь удовлетворительного отношения сигнал/шум (около 20) для минимально ионизирующих частиц, коэффициент газового усиления детектора должен быть не менее $3 \cdot 10^4$. При одинаковом газовом усилении значение электрического поля в газовых зазорах для смеси Ar(90)/C₄H₁₀(10) ниже, чем для газовой смеси Ar(70)/CO₂(30). Для того чтобы свести к минимуму вероятность пробоя, в качестве рабочей газовой смеси была выбрана смесь Ar(90)/C₄H₁₀(10).

Измерения коэффициента усиления газа в зависимости от тока в высоковольтном делителе, предназначенном для детекторов GEM VM@N, проводились с использованием небольшого детектора GEM, оснащенного калиброванной считывающей платой, облученного радиоактивным источником ⁵⁵Fe (рис. 6). Измерения показали, что рабочий коэффициент усиления $3 \cdot 10^4$ для газовой смеси Ar(90)/C₄H₁₀(10) достигается при гораздо более низком значении тока делителя по сравнению со смесью Ar(70)/CO₂(30).

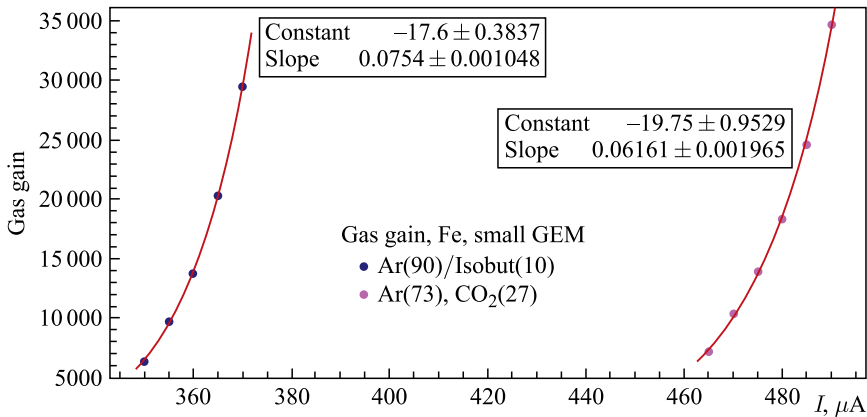


Рис. 6. Зависимость коэффициента газового усиления от тока делителя для газовых смесей Ar(70)/CO₂(30) и Ar(90)/C₄H₁₀(10)

2.3. Исследование характеристик GEM-детекторов. Перед интеграцией GEM-детекторов в состав экспериментальной установки были проведены исследования характеристик детекторов на стендах с использованием космических лучей (рис. 7) и радиоактивных источников.

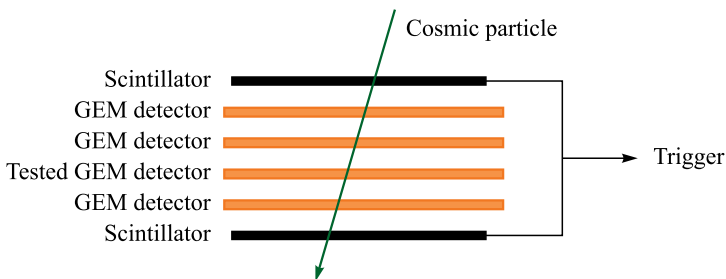


Рис. 7. Схема стенда для исследования GEM-детекторов на космических лучах

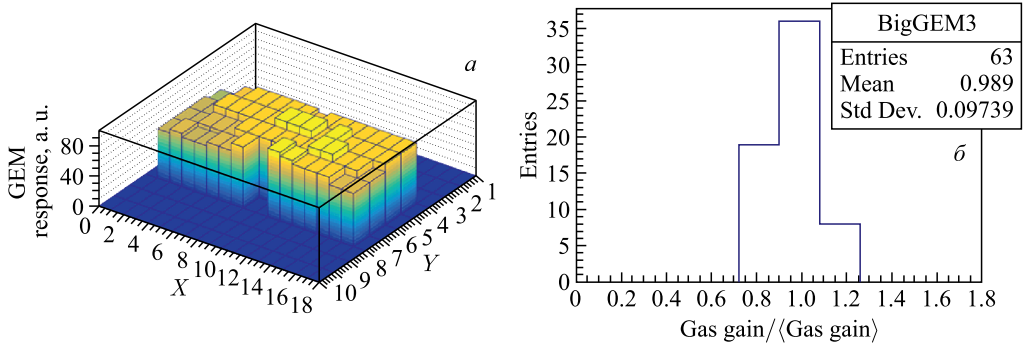


Рис. 8. а) Однородность отклика GEM-детектора размером 163×45 см; б) распределение величины отклика, нормированной на среднее значение отклика детектора

2.3.1. *Однородность отклика.* Исследование однородности отклика GEM-детектора проводилось с использованием радиоактивного источника ^{106}Ru . Отклик измерялся для 62 точек, которые были выбраны равномерно по всей поверхности детектора. 3D-график, показывающий распределение отклика детектора в зависимости от XY-координат, представлен на рис. 8, а. Провал в области $X = 9, Y = 6$ соответствует отверстию, предусмотренному для установки вакуумного ионопровода. На рис. 8, б представлено распределение величины отклика, нормированной на среднее значение отклика детектора. Максимальное отклонение отклика от среднего значения не превышает 25 %.

2.3.2. *Геометрическая эффективность.* Исследования геометрической эффективности GEM-детекторов проводились на стенде с использованием космических лучей. На рис. 9 представлены распределения эффективностей для детекторов с разными типами секторов на пленках. Средняя эффективность внутри секторов составляет около 99 %. Неэффективные области соответствуют границам секторов.

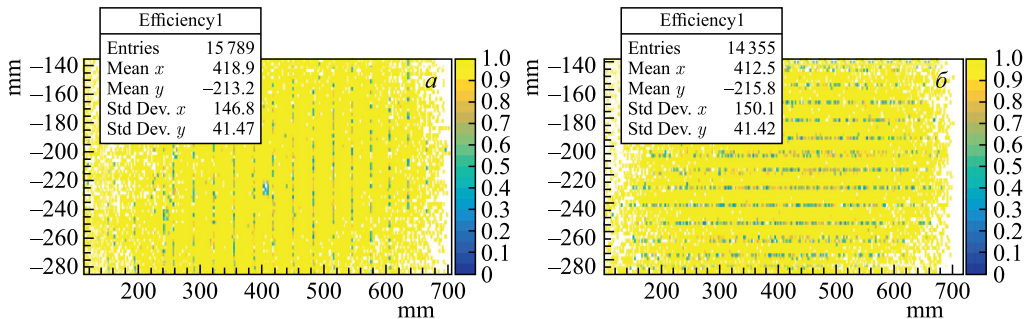


Рис. 9. Геометрическая эффективность для ГЭУ-пленок с вертикальными (а) и горизонтальными (б) секторами

2.3.3. *Пространственное разрешение.* Для исследования пространственного разрешения GEM-детекторов был собран стенд (см. рис. 7). Четыре GEM-детектора были установлены в горизонтальной плоскости параллельно друг другу. Три детектора использовались как опорные, характеристики четвертого исследовались. Пара сцинтилляционных детекторов, отклики которых были собраны в схему совпадений, давали триггерный

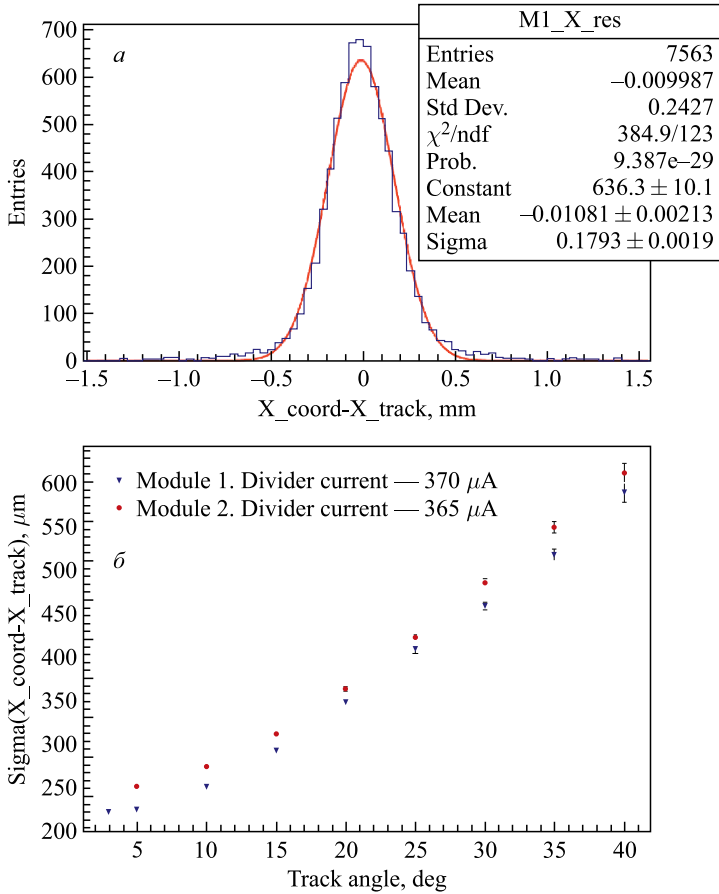


Рис. 10. а) График зависимости количества событий от невязки для тестируемого детектора. б) График зависимости стандартного отклонения невязки от угла падения частицы

сигнал. Траектория космических частиц реконструировалась по откликам трех опорных детекторов. На рис. 10, а представлено распределение разности ожидаемой координаты, полученной из уравнения траектории частицы, и реальной координаты отклика исследуемого детектора. Это распределение достаточно хорошо соответствует нормальному и может быть аппроксимировано функцией Гаусса. Величина стандартного отклонения $\sigma_{\text{GEM-FIT}} = 180$ мкм. Собственное пространственное разрешение исследуемого детектора можно определить, предположив, что все детекторы имеют одинаковые характеристики. Зная расстояние между детекторами, можно рассчитать $\sigma_{\text{GEM}} = \sigma_{\text{GEM-FIT}}/1,22 \approx 150$ мкм. Для определения пространственного разрешения тестируемого детектора отбирались события, где угол падения частицы был близок к нормали к плоскости детектора.

На рис. 10, б представлено поведение стандартного отклонения (меры точности измерения координаты, т.е. меры пространственного разрешения) относительно угла между нормалью к плоскости детектора и треком частицы. Из представленной зависимости видно, что чем этот угол больше, тем ниже пространственная точность детектора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описано исследование характеристик GEM-детекторов трековой системы эксперимента BM@N, которое было проведено перед их интеграцией в состав экспериментальной установки. Полученные характеристики GEM-детекторов — однородность отклика, эффективность регистрации заряженных частиц и пространственное разрешение — обеспечивают выполнение задач эксперимента BM@N.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kapishin M.* The Fixed Target Experiment for Studies of Baryonic Matter at the Nuclotron (BM@N) // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2018. V. 182. P. 02061.
2. *Sauli F.* The Gas Electron Multiplier (GEM): Operating Principles and Applications // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. V. 805. P. 2–24.
3. *Iakovidis G.* VMM — An ASIC for Micropattern Detectors // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2018. V. 174. P. 07001.
4. *Rivetti A., Alexeev M., Bugalho R., Cossio F., Da Rocha Rolo M. D., Di Francesco A., Greco M., Cheng W., Maggiora M., Marcello S., Mignone M., Varela J., Wheadon R.* TIGER: A Front-End ASIC for Timing and Energy Measurements with Radiation Detectors // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2019. V. 924. P. 181–186.
5. *Altunbas C., Capéans M., Dehmelt K., Ehlers J., Friedrich J., Konorov I., Gandi A., Kappler S., Ketzer B., De Oliveira R., Paul S., Placci A., Ropelewski L., Sauli F., Simon F., van Stenis M.* Construction, Test and Commissioning of the Triple GEM Tracking Detector for COMPASS // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2002. V. 490. P. 177–203.

Получено 29 июля 2019 г.