

УДК 004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕКОВОГО ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ ТРЕХКАСКАДНОГО ГАЗОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО УМНОЖИТЕЛЯ ДЛЯ КОНФИГУРАЦИИ ПЕРВОГО ФИЗИЧЕСКОГО СЕАНСА ЭКСПЕРИМЕНТА VM@N

© 2023 г. Д. А. Баранов*

*Международная межправительственная организация “Объединенный институт ядерных исследований”,
лаборатория информационных технологий, Дубна, Россия*

**E-mail: dbaranov@jinr.ru*

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 24.03.2023 г.

Принята к публикации 28.04.2023 г.

Рассмотрены этапы и особенности моделирования процессов формирования сигнальных откликов в детекторе на основе трехкаскадного газового электронного умножителя (Gas Electron Multiplier, GEM), применяемого в трековой системе эксперимента VM@N для конфигурации первого физического сеанса в 2022 г. Описана процедура расчета карты электростатического поля в газовой среде GEM-камеры, а также актуальных параметров, необходимых для детального моделирования с применением соответствующего программного инструментария.

DOI: 10.31857/S036767652370206X, EDN: ZCFJFK

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день практически ни один серьезный эксперимент, связанный с исследованиями в области физики высоких энергий, немыслим без проведения предварительного математического моделирования с использованием вычислительных ресурсов ЭВМ. Различные аспекты функционирования интересующих нас объектов, процессов или явлений можно описать той или иной моделью, которая позволяет получать необходимую информацию касательно поведения объектов системы на основе предварительно заданных параметров. Данный подход позволяет провести сравнительный анализ предложенных конфигураций системы и сделать вывод об их оптимальности согласно тем или иным критериям оценки.

Прежде чем перейти непосредственно к теме статьи, затрагивающей вопросы моделирования конкретного типа детектора, а также представить полученные результаты, хотелось бы сделать краткое введение в рассматриваемую область с точки зрения проводимого эксперимента.

Исследование свойств возбужденной материи, образуемой в результате тяжелых ионно-ионных столкновений пучков заряженных частиц с фиксированными мишенями в диапазоне энергий, наиболее пригодном для обеспечения ее максимальной барионной плотности, является перво-

степенной целью эксперимента VM@N [1, 2], проводимого на ускорительно-накопительном комплексе NICA, расположенного в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне.

Первый запуск детекторной установки VM@N на выведенных из Нуклотрона пучках заряженных частиц состоялся весной 2015 г. С тех пор, на момент подготовки данной статьи, было проведено семь экспериментальных сеансов, нацеленных в первую очередь на тестирование и отладку компонентов различных детекторных подсистем. Последний, седьмой по счету, сеанс состоялся весной 2018 г. [3]. Затем по причине выполнения строительно-монтажных работ на ускорительном комплексе NICA проведение всех экспериментов было временно приостановлено. Очередной запуск эксперимента VM@N после столь существенного перерыва запланирован на октябрь 2022 г. Предстоящий сеанс, в отличие от предыдущих, официально носит статус физического, что говорит о том, что его целью ставится получение определенных научных результатов, заявленных в исследовательской программе эксперимента.

Физическая установка VM@N состоит из набора различных детекторов, объединенных в системы, каждая из которых выполняет заданную ей функцию. Не вдаваясь в подробности описания всех компонентов установки, затронем лишь трековую систему [4], как неотъемлемую часть

эксперимента по изучению столкновений тяжелых ионов с ядрами вещества неподвижной мишени. Основное назначение данной системы – регистрация траекторий пролета заряженных частиц, формируемых на основе набора откликов, оставленных на плоскостях координатных детекторов этими частицами. Актуальная на 2022 г. конфигурация трековой системы эксперимента VM@N представлена четырьмя типами детекторов: полупроводниковые кремниевые плоскости, газонаполненные дрейфовые и катодно-стриповые камеры, а также GEM камеры, особенностям моделирования которых посвящена данная статья.

КОНФИГУРАЦИЯ GEM ДЕТЕКТОРА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ VM@N

Ядром центральной трековой системы экспериментальной установки VM@N является координатный детектор на основе камер, собранных на базе системы трехкаскадного газового электронного умножителя.

Конфигурация трекового GEM детектора для первого физического сеанса эксперимента VM@N в 2022 г. представлена семью так называемыми станциями, каждая из которых состоит из двух полуплоскостей: верхней и нижней (рис. 1). Плоскости станций расположены вдоль и перпендикулярно оси пучка внутри анализирующего магнита СП-41, способным создавать магнитное поле вплоть до 1 Тл с целью исследования радиусов кривизны траекторий заряженных частиц, образуемых в результате столкновений пучка ионов с фиксированной мишенью.

Примечательно, что размеры GEM камер, используемых в эксперименте VM@N, делают их уникальными: ни в одном известном эксперименте в мире никогда не использовался данный тип детекторов со столь большими размерами чувствительных областей. Так, площадь сенсорной зоны верхней полуплоскости составляет примерно $163 \times 45 \text{ см}^2$, а нижней – $163 \times 39 \text{ см}^2$. Благодаря таким габаритам камер достигается максимально возможный геометрический аксептанс детектора, который ограничен лишь апертурой магнита.

Толщина внутренней области камеры, заполняемой газовой смесью, составляет 9 мм, которая разделяется на функциональные промежутки толщиной 3.0, 2.5, 2.0 и 1.5 мм для дрейфовой, двух передаточных и одной индукционной областей соответственно. Газовая смесь, которая будет использоваться в предстоящей конфигурации, представляет собой композицию $\text{ArC}_4\text{H}_{10}$ (аргон–изобутан) в соотношении 80 : 20.

Также приведем актуальные для описываемой конфигурации параметры, на основании которых был проведен расчет карты электрического поля,

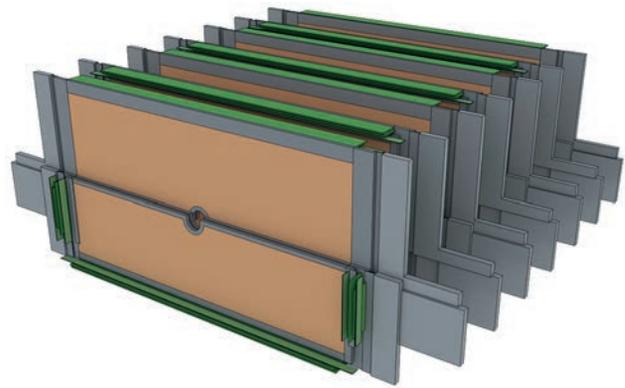


Рис. 1. Конфигурация трекового GEM детектора для осеннего сеанса эксперимента VM@N в 2022 г.

необходимой для моделирования физических процессов внутри детектора. Напряжение, подаваемое на электроды трех усиливающих каскадов GEM камеры, составляет 354.9, 337.6, 320.3 В соответственно. Напряжение, создаваемое между HV-электродом и заземленным анодом считывающей плоскости камеры, достигает порядка 3300 В. Напряжение между электродами дрейфовой, двух передаточных и одного индукционного промежутков равно 528.1, 567.0, 649.3 и 562.7 В соответственно.

Принцип работы детектора, собранного на базе газового электронного умножителя, основывается на трех составляющих: газовой ионизации, электронном усилении и регистрации (сборе) носителей заряда (электронов) считывающей анодной плоскостью (рис. 3). С более подробным описанием принципов работы GEM можно ознакомиться в работе [5].

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ GEM ДЕТЕКТОРА

Прежде, чем перейти к описанию особенностей моделирования конкретного детектора, следует упомянуть, что зачастую выбор программных средств, используемых для реализации процедур математического моделирования, во многом зависит от используемой оболочки (“фрейворка”), на базе которой пишется программный код для поддержки того или иного эксперимента. Так, для эксперимента VM@N была разработана среда BmnRoot [6], в основу которой лег фреймворк FairRoot, разработанный в свою очередь немецким институтом GSI для поддержки проекта FAIR.

Полный цикл моделирования GEM детектора условно можно разделить на два этапа. Первый – это применение методов Монте-Карло, которые реализуются в среде BmnRoot посредством встроенного инструмента Geant4 для моделирования прохождения элементарных частиц через веще-

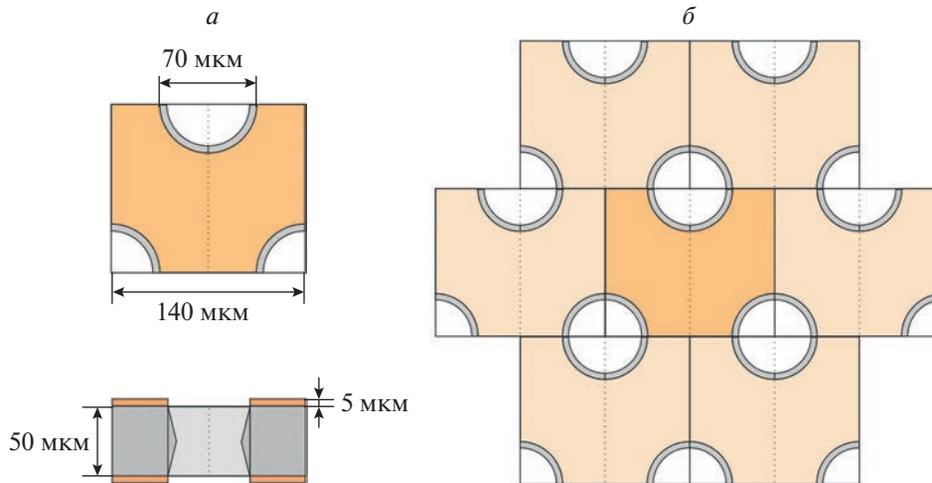


Рис. 2. Геометрическая модель GEM: базовая GEM-ячейка (а), двумерная периодическая структура, образованная базовыми ячейками (б).

ство. Результат данного этапа — набор Монте-Карло точек, которые представляют собой пространственные координаты прохождения частиц через чувствительные плоскости программной модели детектора. Более подробное описание данной процедуры, включающей создание детальных геометрических моделей трековых детекторов, приводится в работах [7–9].

Второй этап заключается в реализации процедур реалистичного моделирования, которые учитывают особенности формирования сигналов в конкретных типах детекторов и условиях проведения эксперимента. Он не является строго обязательным, а служит скорее дополнением к первому, базовому, этапу. Зачастую для некоторых задач достаточно иметь упрощенную модель детектора, когда отклики на его плоскостях рассматриваются как набор координат, полученных на основе метода Монте-Карло. Детальное же моделирование важно, когда необходимо иметь отклики, максимально приближенные к реальным выходным данным, учитывающие, например, такие факторы, как влияние электрических и магнитных полей на движение носителей заряда, ответственных за формирование сигнала на считывающих элементах детектора.

Как было показано в предыдущем разделе, GEM детекторы имеют достаточно сложную природу формирования выходного сигнала. Для детального моделирования физических процессов внутри газовых и полупроводниковых детекторов был разработан программный пакет Garfield++ [10], который позволяет описать практически любой детектор ионизационного типа.

Для ионизационных камер со сложной внутренней структурой, к которым относятся GEM камеры, необходимо также подготовить карту

электрического поля, на основе которой будет проводиться моделирование. В настоящей статье описанию данной процедуры, которую можно считать предварительным этапом реалистичного моделирования, посвящен отдельный раздел, в котором представлен один из методов расчета карты электрического поля для актуальной конфигурации трекового детектора эксперимента VM@N.

РАСЧЕТ КАРТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Для расчета карты электрического поля в формате, пригодном для Garfield++, использовалась связка из двух программных продуктов: GMSH [11] и Elmer [12].

Газовый электронный умножитель имеет регулярную структуру, состоящую из множества однотипных отверстий, равноудаленных друг от друга. Вся область GEM камеры может быть описана базовой ячейкой, представляющую собой элемент, при параллельном переносе которого на некоторое расстояние, называемое периодом, он совмещается сам с собой, образуя периодическую двумерную структуру по всему объему камеры (рис. 2). В конфигурации применяемого детектора отверстия ячейки имеют биконическую форму с внешним и внутренним диаметрами 70 и 55 мкм соответственно.

Пакет GMSH предназначен для построения геометрической модели указанной выше ячейки, на базе которой генерируется трехмерная сетка, заполненная тетраэдрическими элементами с заданной точностью разбиения. Модель ячейки включает описание геометрии всех трех усиливающих GEM каскадов, газового объема, а также элементов, типа электродов и граничных поверх-

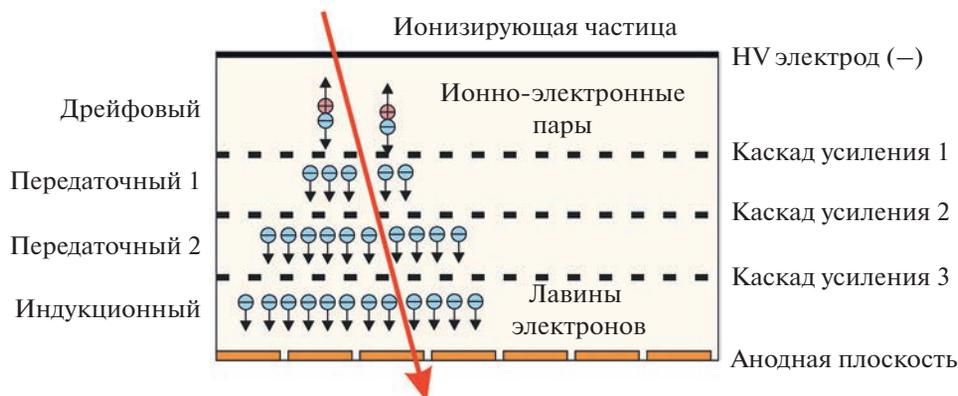


Рис. 3. Принцип работы и структура детектора на базе трехкаскадного GEM.

ностей, к которым будут применяться граничные условия для расчета электростатических характеристик газового поля. Код описания модели сохраняется в виде файла с расширением “.geo”, а сгенерированная на его основе трехмерная сеточная модель – в файле с расширением “.msh”.

Затем, используя инструмент Elmer, производится расчет карты электрического поля на основе метода конечных элементов. Для преобразования подготовленной трехмерной сетки в необходимый формат применяется компонент ElmerGrid, а для расчета характеристик поля – ElmerSolver, результатом которого является набор файлов с характеристиками полученной карты (“.result” и “.vtu” файлы).

Все вычисления производились на основании параметров, которые были приведены в разделе описания актуальной конфигурации GEM камеры. В результате расчетов были получены следующие значения напряженности электрического поля для газовых промежутков: 1.76 (дрейфовый), 2.27 (первый передаточный), 3.25 (второй передаточный) и 3.75 кВ/см (индукционный).

Для визуального представления карты электростатического поля, включающего построение эквипотенциальных и силовых линий, N-мерных распределений интенсивности и потенциалов, а также различных зависимостей величин поля, используется дополнительная утилита ParaView [13].

ДЕТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В GEM КАМЕРЕ ПРИ ПОМОЩИ GARFIELD++

Финальный этап реалистичного моделирования процессов по формированию сигнала в GEM детекторе подразумевает использование библиотеки Garfield++. Помимо подготовленной карты электрического поля необходимо определить композицию газовой смеси (в нашей конфигурации – это ArC_4H_{10} в соотношении 80 : 20), а также

величину магнитного поля в заданном диапазоне, который в нашем случае находится в пределах от 0 до 0.9 Тл.

В результате данного моделирования можно получать широкий спектр различных зависимостей и распределений, которые необходимы для анализа требуемых характеристик. Так, например, одной из интересующих нас характеристик формирования сигнала в GEM камере является зависимость среднего сдвига электронов в поперечном направлении их дрейфа от величины магнитного поля под действием возникающей силы Лоренца (рис. 4). Это позволяет учитывать коор-

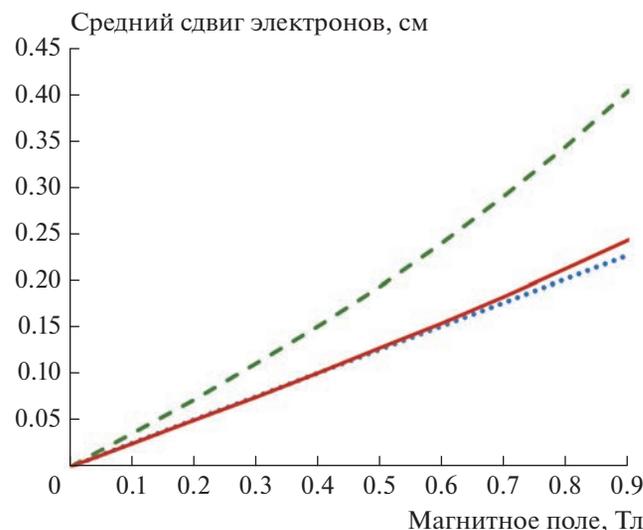


Рис. 4. Зависимость среднего сдвига электронов в поперечном направлении их дрейфа от значения магнитного поля для различных конфигураций газовых сред GEM детектора. Сплошная линия: ArC_4H_{10} (80:20) при значениях напряженности электрического поля E в промежутках 1.76, 2.27, 3.25, 3.75 кВ/см; точечная линия: $ArCO_2$ (70 : 30) при $E = 1.0, 2.5, 3.75, 6.3$ кВ/см, пунктирная линия: ArC_4H_{10} (90 : 10) при $E = 0.8, 1.92, 2.78, 3.16$ кВ/см.

динатное смещение сигнальных откликов на считывающих плоскостях детектора, зависящее от величины магнитного поля, что приводит к повышению эффективности реконструкции траекторий пролета заряженных частиц и, как следствие, более точному анализу физических событий для определенной конфигурации детектора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлен краткий обзор основных этапов моделирования трекового детектора, построенного на базе трехкаскадного газового умножителя, с учетом особенностей конфигурации физической установки BM@N для осеннего сеанса 2022 г. В настоящее время мы имеем полный цикл моделирования данного типа детектора, реализованного в программной среде Vmnr-Root, который включает в себя как упрощенное моделирование откликов на основе методов Монте-Карло, представленных набором координат точек пролета заряженных частиц через детектирующие плоскости, так и детальное моделирование, учитывающее особенности формирования сигнала в GEM камерах. Это позволяет проводить оценку эффективности применяемой в эксперименте конфигурации детектора, а также использовать полученные результаты реалистичного моделирования с целью повышения эффек-

тивности обработки экспериментальных данных путем введения поправочных коэффициентов, таких как, например, сдвиг Лоренца, который вносит вклад в точность нахождения координат на этапе реконструкции траекторий пролета заряженных частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kapishin M.* // Eur. Phys. J. A. 2016. V. 52. No. 213. P. 6.
2. *Baranov D., Kapishin M., Mamontova T. et al.* // KnE Energy. Phys. 2018. V. 3. P. 291.
3. *Kapishin M., Alishina K., Batyuk P. et al.* // Phys. Part. Nucl. 2021. V. 52. P. 710.
4. *Kapishin M., Lenivenko V., Palichik V. et al.* // EPJ Web Conf. 2019. V. 214. Art. No. 02021.
5. *Sauli F.* // Nucl. Instrum. Meth. A. 2016. V. 805. P. 2.
6. *Batyuk P., Gertsenberger K., Merts S. et al.* // EPJ Web Conf. 2019. V. 214. Art. No. 05027.
7. *Baranov D., Rogachevsky O.* // EPJ Web Conf. 2017. V. 138. Art. No. 02021.
8. *Baranov D.* // AIP Conf. Proc. 2021. V. 2377. Art. No. 060002.
9. *Баранов Д.* // Письма в ЭЧАЯ. 2022. Т. 19. № 5(244). С. 431.
10. <https://gitlab.cern.ch/garfield/garfieldpp>.
11. <https://gmsh.info>.
12. <http://www.elmerfem.org>.
13. <https://www.paraview.org>.

Simulation of tracking detector based on triple GEM chambers for the first physics run of the BM@N experiment

D. A. Baranov*

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

**e-mail: dbaranov@jinr.ru*

The features and stages of simulation of triple GEM detector for the first physics run in the BM@N experiment in 2022 are presented. We described the procedure for electrostatic field map calculation based on the current configuration of the GEM detector. We also consider tool set required for detailed simulation of physics processes inside the GEM chamber and give some results obtained.