

Введение

Развитие экспериментальных методов ядерной физики привело к появлению большого количества детектирующих систем. Отдельно стоит выделить координатные детекторы, по которым до сих пор ведутся активные исследования. Главными направлениями являются повышение эффективности регистрации и пространственного разрешения [1].

Широкое распространение новых материалов и методов их обработки многократно улучшило параметры имеющихся детектирующих устройств, а так же позволило создавать детекторы новых конструкций. Так в 1997 г. группа ученых из Европейского центра ядерных исследований (CERN) под руководством Ф. Саули успешно применила концепцию газового электронного умножения в микроструктурах для создания координатных детекторов, которые получили название «GEM-детекторы» или газовые электронные умножители [2]. Их отличительными особенностями являются сравнительная простота конструкции, коэффициент усиления вплоть до 10^6 , а так же высокая радиационная стойкость. Данный тип детекторов широко используется в таких экспериментах, как RHOENIX (Франция), COMPASS (Швейцария), а так же в составе детекторов LHSb, TOTEM (ЦЕРН) и КЕДР (ИЯФ СО РАН).

В ИЯФ микроструктурные детекторы применяются не только в составе детекторов для экспериментов в ФЭЧ (КЕДР, СНД и КМД-3), но и в различных системах, связанных с ними. Одной из таких систем является установка «лазерный поляриметр». В основе её работы лежит предложенный в 1975 г. в ИЯФ метод резонансной поляризации [3]. Применяется данная система для прецизионного измерения энергии на коллайдере ВЭПП-4М.

В рамках работ по усовершенствованию «лазерного поляриметра» планируется установить новый координатный детектор. Для выполнения данной задачи было решено использовать GEM-детекторы [4]. В ИЯФ существует возможность изготовления таких детекторов с использованием GEM-электродов, производимых в CERN. Таким образом, возникает необходимость в исследовании новых моделей GEM-детекторов.

Целью данной работы являлось создание и исследование характеристик GEM-детектора для установки «лазерный поляриметр». Понимание физических процессов работы детектирующей системы, организацию модуля сбора данных, а также особенностей их анализа дает наиболее полную информацию о точности измерений. Для достижения поставленной цели были сформулированы основные задачи, которые определили ключевые направления деятельности:

- Изучение физических основ работы газовых электронных умножителей и основных схем GEM-детекторов
- Определение основных параметров, влияющих на коэффициент усиления детектора

- Установка, настройка и управление механизацией детектора
- Создание и отладка системы сбора и обработки данных.
- Проведение экспериментов на выведенном пучке, в ходе которых исследованы физические характеристики детектора
- Обработка и анализ полученных данных

Резонансная деполяризация и её применение для определения энергии пучка

Эффект самопроизвольной поляризации заряженных частиц в ускорителях был описан Соколовым и Терновым еще в 1963г [5]. Качественно данный эффект можно описать следующим образом: в магнитном поле \mathbf{H} потенциальная энергия частицы с магнитным моментом $\boldsymbol{\mu}$ выражается как:

$$U = -(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{H}). \quad (1)$$

В случае поляризации пучка в ускорителе, \mathbf{H} есть ведущее поле. Минимум потенциальной энергии дает значение угла между магнитным моментом и ведущим полем, равное нулю. Магнитный момент и спин электрона противоположно направлены, следовательно состояние электрона в пучке, в котором спин и магнитное поле антипараллельны, более устойчиво.

В работе [5] определены доли от общего числа электронов, имеющие поляризацию по и против направления поля:

$$n_{\uparrow\uparrow} = \frac{15 + 8\sqrt{3}}{30} \approx 0.962 \quad (2)$$

$$n_{\uparrow\downarrow} = \frac{15 - 8\sqrt{3}}{30} \approx 0.038 \quad (3)$$

Можно заметить, что практически все электроны в пучке имеют спин направленный против ведущего поля.

Еще одним эффектом, возникающим при движении частиц со спином в магнитных полях, является прецессия вектора спина вокруг направления магнитного поля.

$$\Omega = \omega_s \left(\frac{q'}{q_0} \frac{E}{mc^2} + 1 \right) \quad (4)$$

Предел Рейтера и его зависимость от электрического поля в индукционном промежутке

3.1 Определение предела Рейтера

Существенным параметром, который необходимо принимать во внимание при изготовлении детектора для маленьких загрузок, является коэффициент усиления. В случае с детекторами, построенными с использованием ГЭУ, существует две основных сх. достижения высоких коэффициентов усиления:

- **Одноэлектродная схема:** использование одного электрода под напряжением, близким к предельному.
- **Многоэлектродная схема:** использование каскада последовательно расположенных электродов с более низкими, по сравнению с одноэлектродной схемой, напряжениями на них.

На первый взгляд, многоэлектродная схема может обеспечить гораздо большие коэффициенты усиления. Однако существует физический предел на максимальное количество заряда в электронной лавине, называемый пределом Рейтера. Если суммарный заряд (первичная и вторичная ионизация) превышает значение этого предела, то вероятность возникновения электрического разряда резко возрастает. Предел Рейтера зависит от количества первичной ионизации, типа газовой смеси, а также от геометрии разрядного промежутка. В случае с параллельным промежутком диапазон значений составляет [6]

$$Q_{max} = 10^6 - 10^7 e^- . \quad (5)$$

Суммарный заряд в лавине можно определить как:

$$Q_{max} = N_e k_{max}(N_e), \quad (6)$$

где N_e — количество электронов первичной ионизации, $k_{max}(N_e)$ — максимальный коэффициент усиления при данном количестве электронов. Т.к. предполагается, что Q_{max} — постоянное значение, максимальный коэффициент усиления в случае одного электрона может достигать значений $> 10^6$.

Последние эксперименты показали, что возможно существует ещё один параметр, который может влиять на значение предела Рейтера - напряжённость электрического поля в промежутке между электродами детектора вставить ссылку. Нами было решено проверить данную зависимость т.к. она потенциально может дать ответ на вопрос о том, какая схема детектора обеспечивает наибольший коэффициент усиления, а также является наиболее надёжной. Под надёжностью понимается величина, дополнительная к вероятности возникновения пробоя при заданных параметрах эксперимента: конфигурации детектора и характеристик источника ионизации.

Идея проверки заключалась в следующем: в параллельный промежуток инжектировались электроны первичной ионизации. Если существует зависимость предела Рейтера от приложенного к параллельному промежутку поля, то также существует зависимость критического тока анода от поля между электродами. Пусть $k(N_{e1}, E)$ есть коэффициент усиления в индукционном промежутке, зависящий от количества частиц первичной ионизации и электрического поля в промежутке. Тогда количество заряда, образуемое в нем, можно выразить как:

$$Q(E) = N_{e1}k(N_{e1}, E). \quad (7)$$

При увеличении поля эта величина приближается к Q_{max} . Регистрируемый анодный ток I пропорционален $Q(E)$. Для данного значения N_{e1} можно определить максимальное значение поля в промежутке, при котором возникает разряд по резкому возрастанию анодного тока:

$$I_{max1} \propto Q_{max}(N_{e1}, E) \quad (8)$$

Теперь проведем аналогичное измерение для другого значения количества первичной ионизации N_{e2} . В соответствии с уравнениями 7 и 6 и при отсутствии какой-либо зависимости от поля максимальное значение анодного тока не должно измениться, но разряд наступит при отличном от первого эксперимента значении электрического поля. Если же наблюдается зависимость Q_{max} от поля, тогда изменится и максимальный ток, при котором происходит разряд.

Для проведения экспериментов был создан тестовый образец детектора, схему которого можно видеть на Рис.???. Он состоит из четырёх основных элементов: катодного электрода, усиливающего ГЭУ, инжектирующего ГЭУ и анодного электрода-коллектора. Принцип работы детектора следующий:

1. В дрейфовом промежутке с помощью внешнего радиоактивного источника создаётся первичная ионизация.
2. Под действием дрейфового поля электроны ионизации устремляются к усиливающему ГЭУ.
3. При прохождении через ГЭУ количество электронов увеличивается в зависимости от приложенного на него напряжения. Так обеспечивалась изменение "эффективной активности" источника.
4. Электроны вторичной ионизации проникают через инжектирующий ГЭУ в индукционный промежуток.
5. В индукционном промежутке происходит образование электронных лавин, которые попадают на электрод-коллектор.

6. По току с коллектора можно определить пробой и зафиксировать значения первичной ионизации в индукционном промежутке и электрического поля.

3.2 Изготовление детектора

Рассмотренная выше схема была применена при конструировании тестового детектора. Сначала из СТЭФ толщиной 1.5 мм были изготовлены рамки для размещения на них электродов ГЭУ. Чтобы обеспечить большую прозрачность для катодного электрода использован фольгированный СТЭФ толщиной 0.5 мм. Между катодом и усилительным ГЭУ расстояние составило 1.5 мм, между усилительным и инжектирующим ГЭУ — 2 мм. Размер параллельного промежутка был 1.5 мм.

Усилительный ГЭУ изготовлен из полиимидной плёнки толщиной 50 мкм, покрытой с двух сторон 5 мкм слоем меди. Размер отверстий — 70 мкм, шаг — 140 мкм [2]. Инжектирующий ГЭУ с целью увеличения прозрачности был использован с большим размером отверстий *Каким???*. Каждый электрод сначала приклеивался на рамку с помощью эпоксидной смолы. После этого рамки собирались вместе и проклеивались смолой на стыкующихся поверхностях и снаружи для обеспечения герметичности. Рабочий газ подводился по фторпластовым трубкам, которые были закреплены в нижней и верхней рамках.

Считывающая структура представляла собой пластину фольгированного СТЭФ, размещаемую под инжектирующим ГЭУ. Параллельный промежуток составляли нижний электрод инжектирующего ГЭУ и электрод-коллектор. Для уменьшения влияния статических электрических полей на детектор, он был помещён в корпус из алюминия, имеющий высоковольтные разъёмы типа LEMO для питания электродов и патрубки для подачи и отвода рабочего газа.

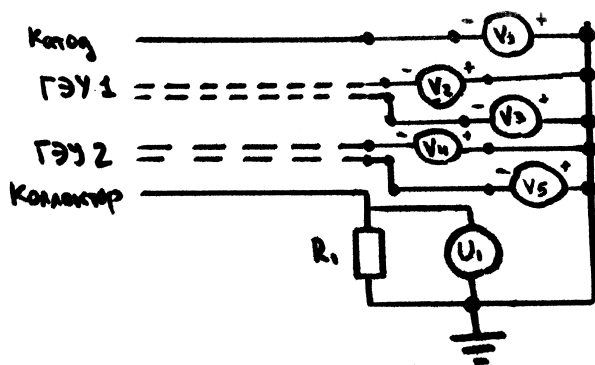


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема детектора для проверки предела Рейтера. (Я её перерисую в редакторе)

Схему детектора можно видеть на Рис.1. Напряжение на каждый электрод подавалось с отдельного источника питания ($V_1 - V_5$), что обеспечивало гиб-

кую настройку системы. Ток с электрода-коллектора протекал через резистор R_1 , падение напряжения на котором регистрировалось милливольтметром U_1 .

3.3 Проведение эксперимента

Для создания первичной ионизации в дрейфовом промежутке использовался источник с радиоактивным изотопом ^{109}Cd активностью $2 \cdot 10^7$ Бк, который излучает преимущественно рентгеновские фотоны с энергией 88 keV. Источник помещался сверху на катодную пластину детектора. Затем на электроды подавалось высокое напряжение чтобы обеспечить инжекцию заряда без предварительного умножения в параллельный промежуток. Активность источника была достаточной, чтобы зафиксировать ионизационный ток по падению напряжения на добавочном сопротивлении помощью цифрового милливольтметра. После того, как был получен требуемый уровень ионизации, проводилось измерение зависимости ионизационного тока от электрического поля в индукционном промежутке до момента пробоя, который легко определялся по скачку тока на нижнем электроде инжектирующего ГЭУ. Напряжения на ГЭУ и поле дрейфового промежутка при этом оставались постоянными.

Далее необходимо было увеличить инжекцию заряда в параллельный промежуток. Для этого напряжение ускоряющем ГЭУ поднималось при сохранении остальных напряжений постоянными. Затем повторялось сканирование по полю в индукционном промежутке до достижения пробойного предела.

3.4 Результаты

Первые эксперименты показали, что критическое напряжение, при котором начинаются пробои, действительно зависит от поля в индукционном промежутке. На Рис. 2

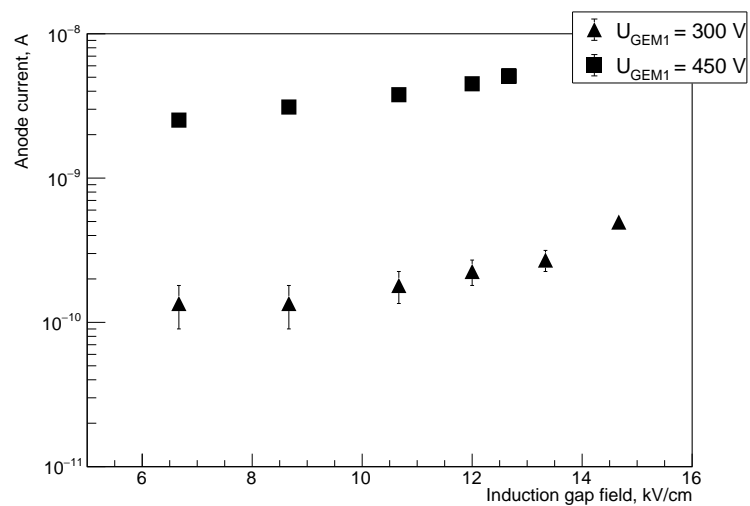


Рис. 2. Зависимость тока с электрода-коллектора от поля в индукционном промежутке. Напряжение на ГЭУ1 определяет количество частиц первичной ионизации.

Исследование прототипа детектора для установки «Лазерный поляриметр»

4.1 Конструкция детектора

Для регистрации одиночных гамма-квантов, полученных обратным комптоновским рассеянием на пучках электронов, был спроектирован и изготовлен прототип детектора, использующего ГЭУ для усиления сигнала первичной ионизации. В конструкции применен тройной электрод с питанием от резистивного делителя. Основа детектора представляет собой многослойную плату из СТЭФ с массивом плоских металлических электродов, расположенных в её центральной части, которую можно видеть на Рис. ??

Электроды поделены на группы, каждая из которых регистрируется отдельной считывающей платой. Всего считывающих плат десять, и они установлены в специальные многоканальные разъемы на периферии основной платы. Front-end электроника включает в себя быстрые АЦП и ПЛИС для работы с ними. Далее сигнал по USB подается на компьютер. На данный момент разрабатывается программное обеспечивающее взаимодействие всех 10 плат и одновременное считывание события с детектора. Решено было использовать для последующих экспериментов только одну из плат, т.к. вычитывание данных с неё уже отлажено.

Электроды ГЭУ укреплены на рамках из 1.5 мм СТЭФ над считывающей структурой. Сверху на плату закрепляется герметичный кожух из СТЭФ с трубками для ввода и вывода газовой смеси. Сборка детектора осуществляется в корпусе из листового алюминия.

Данный детектор отличается от аналогов большей гранулярностью, что даст большую точность определения координат событий. (может ещё что написать)

4.2 Особенности сбора и обработки сырых данных

Каналы детектора объединены в группы по 100 (центральная часть) или 120 (периферия) каналов. Каждая группа скоммутирована на отдельный разъем, к которому подключены два многоканальных АЦП. Одновременно можно вычитывать данные со всех каналов. При поступлении сигнала с триггера, схема начинает последовательно раз в 125 нс вычитывать заряд со всех каналов. Таким образом вычитывание происходит 100 раз. Каждый отсчет времени будем в дальнейшем называть «кадром», а массив данных о заряде для каждого из каналов группы и каждого кадра из 100 назовем событием.

События, каждое из которых состоит из 12800 целых чисел, записываются в файл формата txt. Формат вывода следующий: одна строка соответствует одному кадру и состоит из 128 чисел. Таких строк 100. 101-я строка содержит номер кадра, с которого началось вычитывание значений АЦП. На самом

деле микросхемы АЦП непрерывно вычитывают заряд с каналов, но ПЛИС возвращает событие только при активации триггера.

Из-за технических особенностей схемы front-end электроники нулевой уровень сигнала находится в районе 7400 каналов АЦП. Сигнальное событие представляет собой импульс отрицательной полярности, который имеет резкий передний фронт (1 кадр) и экспоненциально затухающий задний фронт (3-10 кадров в зависимости от суммарного заряда).

Список литературы

- [1] Шехтман Л.И. Быстродействующие координатные газовые детекторы высокого разрешения. 2012.
- [2] Sauli F. A new concept for electron amplification in gas detectors. 1997.
- [3] Букин А.Д. Дербенев Я.С. Кондратенко А.М. и др. Препринт № 75-64 ИЯФ СО АН СССР. 1975.
- [4] T.Maltsev V.Bobrovnikov V.Kudryavtsev L.Shekhtman. Development of high-resolution GEM-based detector for the extracted electron beam facility at the VEPP-4M collider. 2017.
- [5] А. А. Соколов И. М. Тернов. О поляризационных и спиновых эффектах в теории синхротронного излучения. 1963.
- [6] Fonte V. Peskov P. Research on discharges in micropattern and small gap gaseous detectors. 2019.