

# 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 уточнить. 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 инжектируются через второй 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 0.1 мм. Между катодом и усилительным ГЭУ расстояние составило 1.5 мм, между усилительным и инжектирующим ГЭУ — 3 мм. Размер параллельного промежутка был 1.5 мм.

Усилительный ГЭУ изготовлен из полиимидной плёнки толщиной 200 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 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.

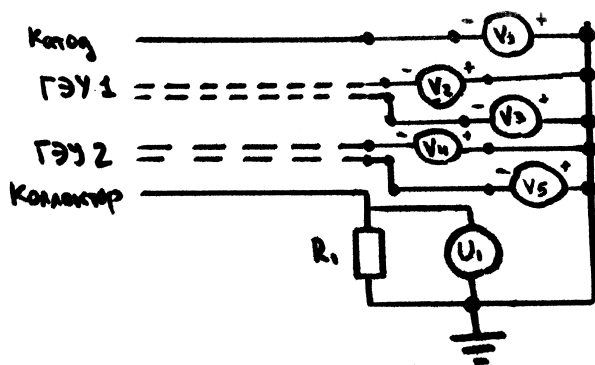


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема детектора для проверки предела Рейтера. (Я её перерисую в редакторе)

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

обеспечивало гибкую настройку системы. Ток с электрода-коллектора протекал через резистор  $R_1$ , падение напряжения на котором регистрировалось вольтметром  $U_1$ .

### 3.3 Проведение эксперимента

Для создания первичной ионизации в дрейфовом промежутке использовался радиоактивный изотоп  $^{109}\text{Cd}$  с активностью  $10^8\text{Бк}$  *Уточнить или измерить*, который излучает преимущественно фотоны с энергиями 22.1 keV (82.6 %) и 25.0 keV (14.7 %) который помещался сверху на катодную пластину детектора.

### 3.4 Результаты

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

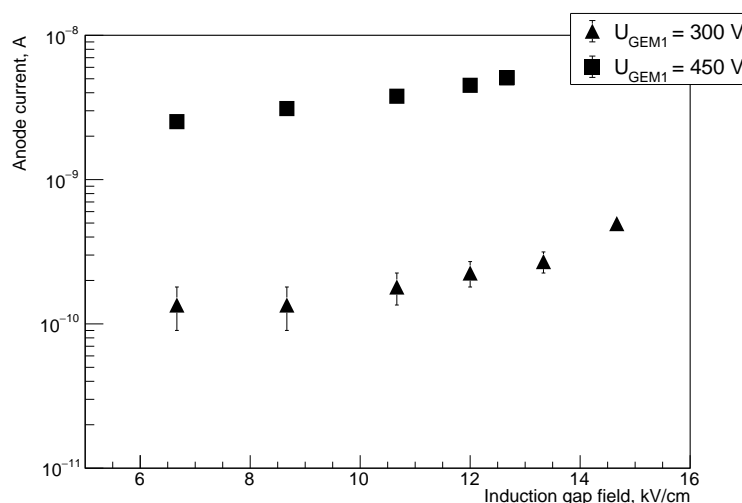


Рис. 2. Зависимость тока с электрода-коллектора от поля в индукционном промежутке. Напряжение на ГЭУ1 определяет количество частиц первичной ионизации.

## 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.