

УЧРЕЖДЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
(ИЯФ СО РАН)

В.М. Аульченко, О.Л. Белобородова, А.В. Бобров,
А.Е. Бондарь, В.Н. Жилич, В.В. Жуланов,
В.Н. Кудрявцев, А.Г. Шамов, Л.И. Шехтман

ДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ ТРЕХКАСКАДНЫХ ГЭУ
В СИСТЕМЕ РЕГИСТРАЦИИ РАССЕЯННЫХ
ЭЛЕКТРОНОВ ЭКСПЕРИМЕНТА КЕДР
НА НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП-4М

ИЯФ 2010-41

Новосибирск
2010

**Детекторы на основе трехкаскадных ГЭУ в системе
регистрации рассеянных электронов эксперимента КЕДР
на накопителе ВЭПП-4М**

В.М. Аульченко^{аб}, О.Л. Белобородова^{аб}, А.В. Бобров^а,
А.Е. Бондарь^{аб}, В.Н. Жилич^а, В.В. Жуланов^{аб},
А.Г. Кудрявцев^а, А.Г. Шамов^а, Л.И. Шехтман^{аб}

*а Институт ядерной физики им.Будкера СО РАН
630090 Новосибирск, Россия*

*б Новосибирский государственный университет
630090 Новосибирск, Россия*

Аннотация

Система регистрации рассеянных электронов (СРРЭ) эксперимента КЕДР предназначена для изучения двухфотонных процессов на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М. В настоящее время закончена модификация системы, в результате которой к каждой из 8 станций СРРЭ добавлен детектор на основе трехкаскадного ГЭУ, с размером чувствительной области до 256×100 мм², имеющий пространственное разрешение в плоскости орбиты около 70 мкм. Двухкоординатное считывание сигнала с полосками, расположенными под малым углом друг к другу, позволило получить пространственное разрешение около 200 мкм в направлении перпендикулярном плоскости орбиты. Детекторы на основе 3-каскадных ГЭУ включены в систему сбора данных КЕДРа и с начала сезона 2010-2011 гг они стабильно работают, демонстрируя эффективность 95–97%. Такое усовершенствование СРРЭ позволит повысить энергетическое разрешение системы и улучшить подавление фона от однократного тормозного излучения.

© Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН

1. Введение

Детектор КЕДР на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М [1, 2, 3] обладает уникальной системой регистрации рассеянных электронов (СРРЭ), предназначенной для изучения двухфотонных процессов [4, 5]. Кинематические параметры таких процессов определяются конечными электроном и позитроном, потерявшими часть энергии при двухфотонном взаимодействии, и, которые в дальнейшем мы будем называть Рассеянными Электронами (РЭ). Регистрация обоих РЭ («double-tag» эксперимент) позволяет полностью определить параметры двухфотонной системы. Основные физические задачи которые предполагается изучать с помощью СРРЭ, это: измерение полного сечения $\gamma^* \gamma^* \rightarrow \text{hadrons}$ при малых Q^2 , изучение С-четных резонансов, поиск С-четных экзотических состояний.

СРРЭ использует магнитную систему накопителя в качестве спектрометра, как показано на рис. 1. Дипольные магниты позволяют регистрировать РЭ, покидающие точку взаимодействия под нулевым углом. РЭ, обладающие более низкой энергией, выводятся магнитным полем с равновесной орбиты и затем регистрируются в одной из 4-координатных станций системы TS_1 — TS_4 . Квадрупольные линзы фокусируют РЭ таким образом, что их поперечная координата в плоскости детекторов почти не зависит от угла вылета из точки взаимодействия. Таким образом, измеряя координату, можно однозначно определить энергию РЭ.

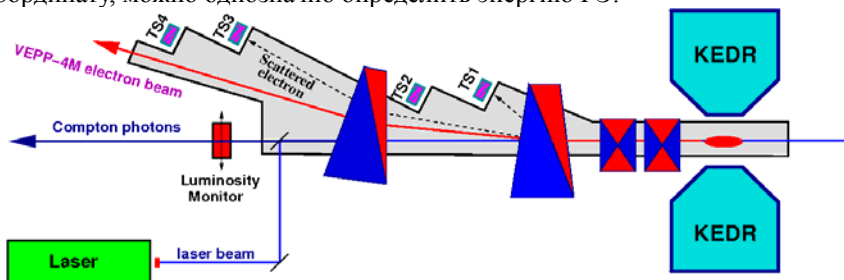


Рис.1. Схема одного плеча системы регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР.

Исходная СРРЭ состояла из 8 станций на основе дрейфовых трубок, которые позволяли измерять координату трека РЭ в плоскости орбиты пучка со средней точностью ~ 300 мкм [4, 5]. Для того чтобы улучшить

пространственное разрешение и добавить возможность подавления фона от однократного тормозного излучения (ОТИ) было проведено усовершенствование системы [6, 7]. Каждая станция СРРЭ была дополнена двухкоординатным детектором высокого разрешения на основе 3-каскадных Газовых Электронных Умножителей (ГЭУ) [8], расположенным перед годоскопом из дрейфовых трубок. Детекторы на основе ГЭУ должны были обеспечить следующие параметры:

- пространственное разрешение в плоскости орбиты не хуже 100 мкм;
- 2-координатный съем информации для подавления фона от ОТИ;
- надежную реконструкцию многотрековых событий;
- быстродействие станции не менее 10^6 Гц и локально не менее 10^5 см²с⁻¹;
- чувствительная область должна начинаться как можно ближе к вакуумной камере.

Для модернизации СРРЭ были выбраны детекторы на основе 3-каскадных ГЭУ, поскольку они полностью удовлетворяют перечисленным условиям. Эти детекторы могут обеспечить пространственное разрешение для треков минимально ионизирующих частиц до ~50 мкм и 2-координатный съем сигнала [9]. Быстродействие таких детекторов превышает 10^5 1/мм²с [10] и они демонстрируют стабильную работу без пробоев при высоком коэффициенте газового усиления [11]. В настоящее время модернизация системы закончена и все детекторы работают. Настоящая статья содержит полное описание системы СРРЭ-ГЭУ, в ней также представлены результаты измерения основных характеристик детекторов на основе ГЭУ, проведенных на космических частицах, а также первые результаты работы в составе детектора КЕДР в течение сезона 2010-2011 гг.

2. Устройство детекторов и системы сбора данных

2.1. Устройство детекторов

Детекторы для модернизации СРРЭ включают в себя каскад из 3-х ГЭУ, расположенных на расстоянии 1,5 мм друг от друга. Каждый ГЭУ имеет гексагональную структуру из отверстий диаметром 80 мкм, расположенных с шагом 140 мкм. Толщина ГЭУ равна 50 мкм. Расстояние между нижним ГЭУ и считывающей полосковой структурой составляет 2 мм, зазор между верхним ГЭУ и дрейфовым электродом равен 3 мм (Рис. 2).

Схема подачи высокого напряжения на электроды детектора показана на Рис. 2. Электроды каждого ГЭУ разделены на сегменты с обеих сторон. Каждый сегмент представляет собой полосу, параллельную прямым полоскам считывающей структуры (см. ниже), шириной 10 мм. Сегменты верхней стороны сдвинуты по отношению к сегментам нижней стороны на 5 мм. Каждый сегмент подключен к высоковольтному делителю через последовательный резистор 0,5 МОм. Такая сегментация сделана для того

чтобы уменьшить энергию пробоя ГЭУ и минимизировать мертвую зону, возникающую в случае короткого замыкания в отверстии ГЭУ.

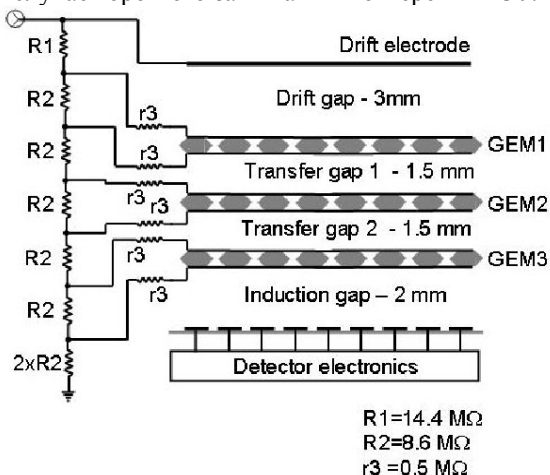


Рис. 2. Схема детектора на основе 3-каскадного ГЭУ для модернизации СРРЭ.

Считывающая структура детектора является двухслойной. Структура слоев показана схематически на Рис. 3. Верхний слой содержит прямые полоски шириной 60 мкм. Нижний слой (стерео полоски) состоит из полосок шириной 150 мкм, разделенных вдоль на короткие прямые секции, и наклонных перемычек, соединяющих соседние прямые секции так, что в среднем образуются полоски, наклоненные под определенным углом к прямым полоскам верхнего слоя. Такая конфигурация нижнего слоя обеспе-

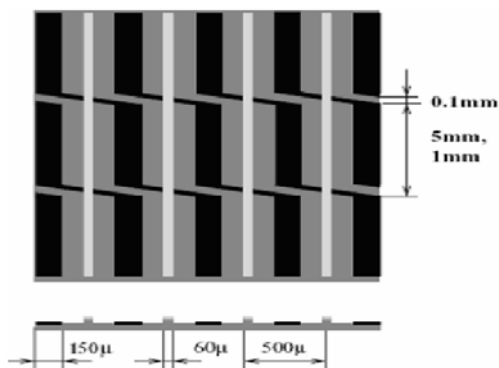


Рис. 3. Схема слоев считывающей структуры с мало-угловым стерео считыванием. Верхний слой обозначен светло-серым оттенком, нижний слой — черным.

чивает равномерное наведение заряда на наклонную полосу, не зависящее от координаты вдоль полосы. Отношение ширин прямых и наклонных полосок выбрано таким образом, чтобы обеспечить равное деление наведенного заряда между слоями.

Конфигурация считывающей полосковой структуры и ее размеры показаны на Рис. 4. Наклон стерео полосок переменный. Внутри зоны шириной 20 мм вокруг центральной оси детектора наклон полосок нижнего слоя равен 30° . Вне этой зоны наклон полосок нижнего слоя составляет примерно 11° . Такая структура обеспечивает более высокое пространственное разрешение в вертикальном направлении в центральной зоне, которая соответствует области вокруг плоскости орбиты пучка. Все ГЭУ и платы со считывающей структурой были произведены в мастерской ЦЕРН*.

Всего было изготовлено 12 детекторов. 3 детектора для станций TS₄ (Рис.1) имеют размер чувствительной области $256 \times 100 \text{ мм}^2$. 9 детекторов для станций TS₁-TS₃ имеют размер чувствительной области $128 \times 100 \text{ мм}^2$. Большие детекторы имеют по 512 каналов в слое с прямыми полосками и в стерео слое. Малые детекторы имеют по 256 каналов в слое. 8 детекторов установлены в СРРЭ. Комплект из 4-х детекторов является запасным и использовался в тестах с космическими частицами.

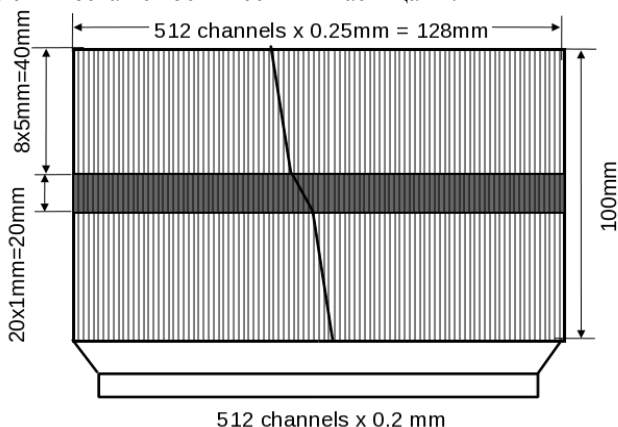


Рис. 4. Конфигурация считывающей структуры с переменным углом наклонных полосок стерео слоя.

2.2. Электроника детекторов и система сбора данных

Каждая полоска считывающей структуры детекторов присоединена к входной площадке специализированного чипа Pmemix128 [12]. Этот чип включает в себя 128 аналоговых каналов, каждый из которых содержит

* Европейский Центр Ядерных Исследований, CERN, Geneva, Switzerland

зарядочувствительный предусилитель, формирователь с временем формирования 45 нс и 2 емкости, которые используются в качестве ячеек аналоговой памяти. Все каналы могут быть прочитаны через аналоговый мультиплексор с частотой 1 МГц. Во время вычитывания может проводиться двойная коррелированная выборка. При этом вычисляется разность между зарядами в емкостях каждого канала. Электроника малых детекторов содержит 4 чипа, большие детекторы имеют 8 чипов. Прямые полоски считывающей структуры присоединены к нечетным каналам, а наклонные полоски — к четным каналам чипов. Чипы объединены в группы по 4 и каждая такая группа вычитывается последовательно через 1 выход. Материнские платы с детекторной электроникой, содержащей группы по 4 чипа, обеспечивают питание, подачу управляющих сигналов на чипы и вывод выходного сигнала на витую пару длиной несколько десятков метров.

Вычитывание и оцифровка выходных сигналов с материнских плат детекторов, а также генерация последовательности сигналов, управляющих работой чипов Ptemux128, производится Контрольными Блоками (КБ) (Рис.5). КБ — это блоки в стандарте КАМАК, расположенные по обеим сторонам детектора КЕДР рядом с детекторами СРРЭ. Каждый КБ содержит 5 12-битовых АЦП, 256 Кбайт памяти для хранения 8 событий, ПЛИС ALTERA ACEX для программы, которая управляет порядком сбора данных, взаимодействием с магистралью КАМАК и Ethernet-интерфейсом. КБ также содержит усилители входных сигналов, формирователи для выходных сигналов управления чипами, а также для входных и выходных сигналов взаимодействия с системой сбора данных КЕДРа. Схема системы сбора данных детекторов ГЭУ-СРРЭ приведена на Рис. 6.

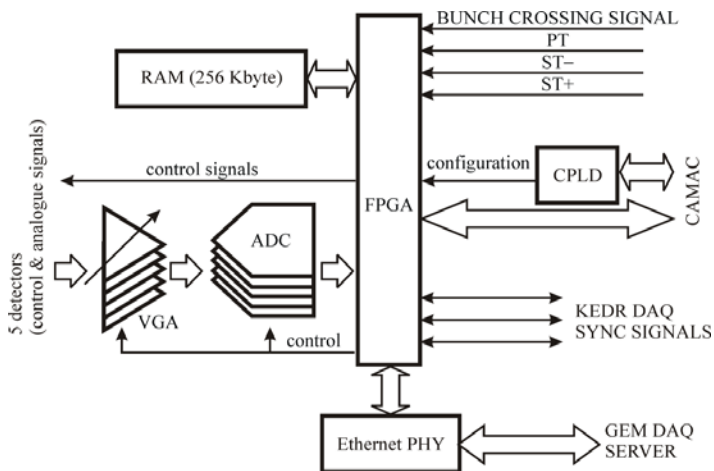


Рис. 5. Блок-схема контрольного блока системы ГЭУ-СРРЭ.

Во время экспериментов коллайдер ВЭПП-4М обычно работает в 2-сгустковом режиме. Время оборота сгустка в накопителе около 1200 нс, а время между двумя сгустками составляет около 600 нс. Выходы предусилителей в чипах Preampl128 коммутируются на емкости с некоторой задержкой относительно момента пролета сгустка. Задержка настраивается таким образом, чтобы сигнал от частиц, пролетевших через детектор, был в максимуме во время записи. Сигнал, зарегистрированный после пролета первого сгустка, записывается в емкости номер 1, а сигнал от частиц после столкновения вторых сгустков записывается в емкости номер 2. Если в течение всего оборота не приходит сигнал Первичного Триггера (ПТ), новый сигнал с выхода предусилителей снова записывается в емкости 1 и затем в емкости 2. Такой режим «готовность» продолжается до тех пор, пока из детектора КЕДР не придет сигнал ПТ.

Первичный триггер КЕДРа вырабатывается в течение 600 нс после столкновения. Однако, поскольку крейты с КБ расположены далеко от центрального детектора, ПТ приходит на вход КБ с задержкой до 950 нс после столкновения. Таким образом ПТ, сформированный от события, соответствующего первому сгустку приходит в КБ уже после того, как сигнал от частиц из второго сгустка был записан в емкости чипов, как показано на схеме временной диаграммы процесса сбора данных (Рис. 7). После того, как ПТ пришел на вход КБ, сигнал нулевого уровня записывается в емкости, куда производилась запись непосредственно перед получением сигнала ПТ.

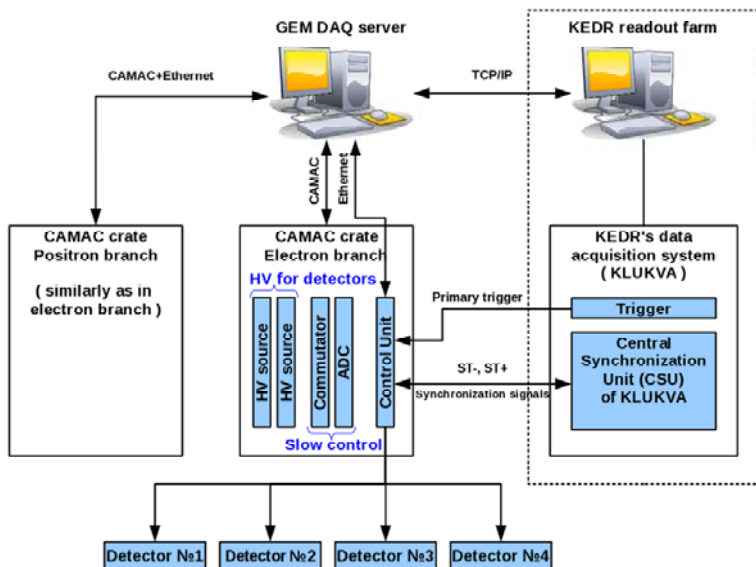


Рис. 6. Блок-схема системы сбора данных детекторов ГЭУ-СРРЭ.

После этого начинается процесс чтения и оцифровки данных из входных чипов в режиме двойной коррелированной выборки. Все группы по 512 каналов вычитываются параллельно. Этот процесс занимает около 500 мкс. Во время чтения и оцифровки приходит сигнал решения Вторичного Триггера КЕДРа (ВТ). Это решение может быть отрицательным (ВТ-) или положительным (ВТ+). Сигнал ВТ- означает, что событие не является полезным. В этом случае процесс чтения останавливается и КБ переключаются в режим «готовность».

В том случае если приходит сигнал ВТ+, чтение и оцифровка продолжается до конца, событие записывается в память КБ, и сигнал о том, что данные записаны, посылается в систему сбора данных КЕДРа. Центральная Система Управления (ЦСУ) КЕДРа собирает такие сигналы от всех подсистем. Сигналы триггера блокируются до тех пор, пока все подсистемы не закончат чтение, оцифровку и запись в буфер системы сбора данных. После того, как все данные записаны и есть хотя бы один свободный буфер, сигналы триггера разблокируются. В системе сбора данных КЕДРа есть 3 буфера для записи событий. Если все 3 буфера заняты, ЦСУ блокирует триггер до тех пор, пока хотя бы одно событие не будет прочитано и соответствующий буфер освобожден. Когда сигнал триггера разблокируется, подсистема сбора данных ГЭУ-СРРЭ переходит в режим «готовность» и ожидает следующего события. Параллельно КБ посылают данные последнего записанного события через 100 Мбит Ethernet в компьютер, управляющий сбором данных с детекторов на основе ГЭУ (сервер управления ГЭУ-СРРЭ).

На сервере управления ГЭУ-СРРЭ работают две основные программы: программа управления процессом сбора данных (GEM-сервер) и программа медленного контроля. GEM-сервер получает Ethernet пакеты с данными события, собирает пакеты, относящиеся к одному событию, вычитает пьедесталы, производит поправку смещения базовой линии и подавление нулей и отправляет окончательные данные в КЕДР по запросу через TCP. После того, как данные события отосланы в КЕДР, GEM-сервер освобождает соответствующий буфер в КБ. В это же время в ЦСУ КЕДРа посылается сигнал о том, что событие успешно прочитано. Полное время обработки одного события системой сбора данных ГЭУ-СРРЭ составляет ~1.8 мс. Это время состоит из 0.5 мс чтения и оцифровки данных, 0.4 мс передачи данных из КБ в сервер управления ГЭУ-СРРЭ и 0,9 мс обработки данных GEM-сервером, включая время передачи TCP-пакетов в КЕДР. Однако, благодаря буферизации данных и параллельной многопоточной структуре сервера чтения, максимальная скорость обработки событий достигает 1 кГц, что в несколько раз выше максимальной скорости набора событий в системе сбора данных КЕДРа.

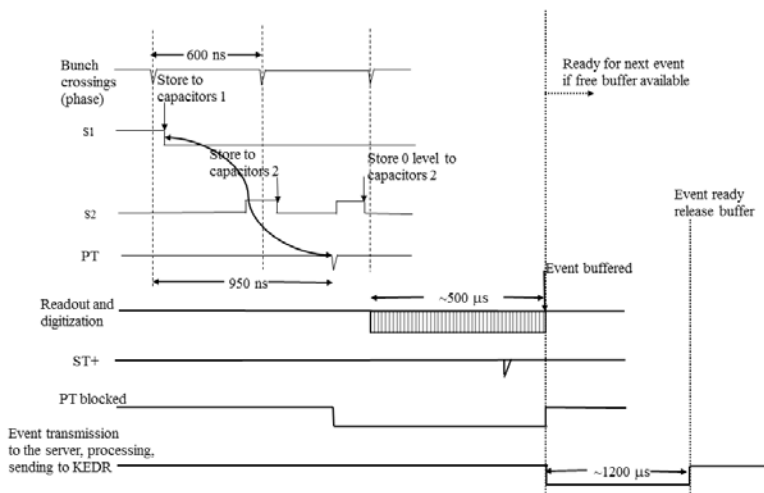


Рис. 7. Временная диаграмма работы системы сбора данных ГЭУ-СРРЭ.

3. Результаты измерений с космическими частицами

Изучение основных параметров детекторов на основе ГЭУ проводилось в серии измерений с космическими частицами. Три детектора были закреплены один над другим на расстоянии около 3 см. Пластиковые сцинтилляционные счетчики были установлены сверху и снизу от детекторов на основе ГЭУ. Сигнал запуска формировался от совпадения между сигналами от сцинтилляционных счетчиков. Детекторы работали со смесью Ar-25\%CO_2 . Эффективность центрального детектора определялась, как отношение числа событий, в которых имелись сигналы от треков в наклонном и прямом слоях в центральном детекторе, к общему числу событий с треками, определенными по сигналам в верхнем и нижнем детекторах. Зависимость эффективности от газового усиления показана на рис. 8. Коэффициент газового усиления определялся как средняя величина суммы сигналов в наклонном и прямом слоях, умноженная на калибровочный коэффициент, измеренный при электронной калибровке.

Из рисунка видно, что плато эффективности начинается при усилении ~ 25000 и величина эффективности на плато составляет около 98%. Измерение пространственного разрешения проводилось при усилении ~ 30000 . Результат измерения пространственного разрешения в направлении, перпендикулярном прямым полоскам, показан на рис. 9. На рисунке показано распределение разностей между вычисленной координатой точки пересечения треком плоскости детектора и измеренной координатой трека. Измеренная координата трека определялась по сигналам в детекторе с помощью метода центра тяжести (ЦТ).

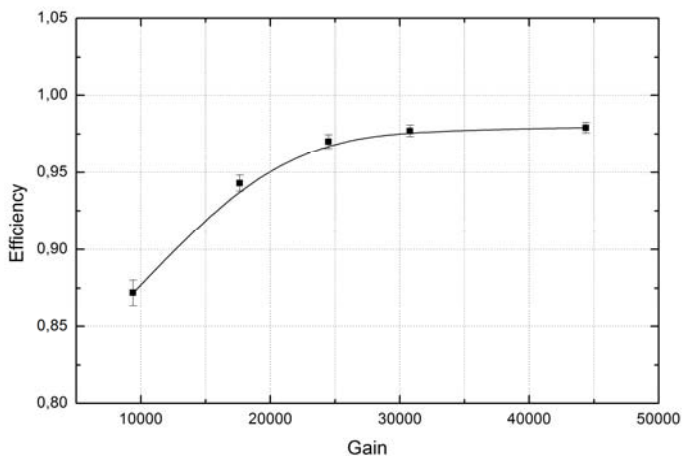


Рис. 8. Эффективность в зависимости от газового усиления, измеренная с помощью космических частиц.

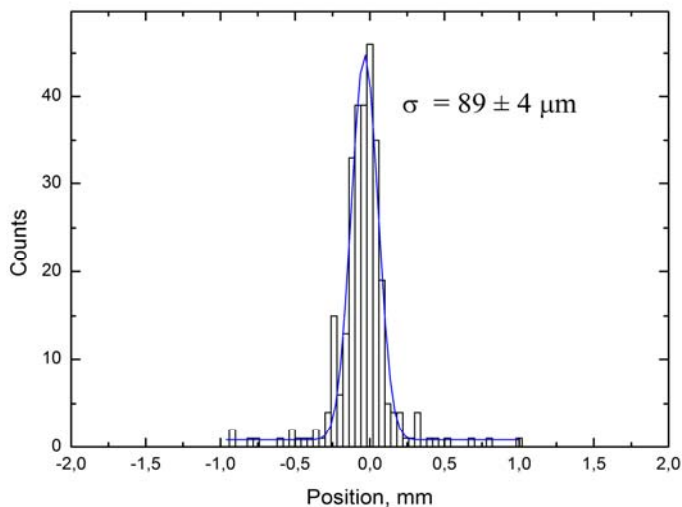


Рис. 9. Распределение разностей между вычисленной и измеренной координатами трека в направлении перпендикулярном прямым полоскам. Пространственное разрешение детектора равно ~ 73 мкм.

Стандартное отклонение распределения Гаусса, подогнанного к распределению на рисунке, составляет ~ 89 мкм. Поскольку все детекторы, использованные в измерениях были одинаковыми, разрешение одного детектора может быть вычислено из результата измерения, как

$\sigma_{det} = \sigma_{meas} / \sqrt{3/2}$, где σ_{det} – разрешение детектора, а σ_{meas} – измеренное стандартное отклонение. Пространственное разрешение детектора равно ~ 73 мкм. Из рис. 9 видно, что часть событий лежит за пределами гауссового ядра распределения.

На рис. 10 показана зависимость эффективности от ширины коридора вокруг центра распределения разностей вычисленной и измеренной координаты трека. Видно, что только около 90% событий формируют нормальное распределение, а $\sim 10\%$ событий попадают за пределы коридора в 3σ . Более детальное обсуждение возможных причин такой формы распределения следует ниже.

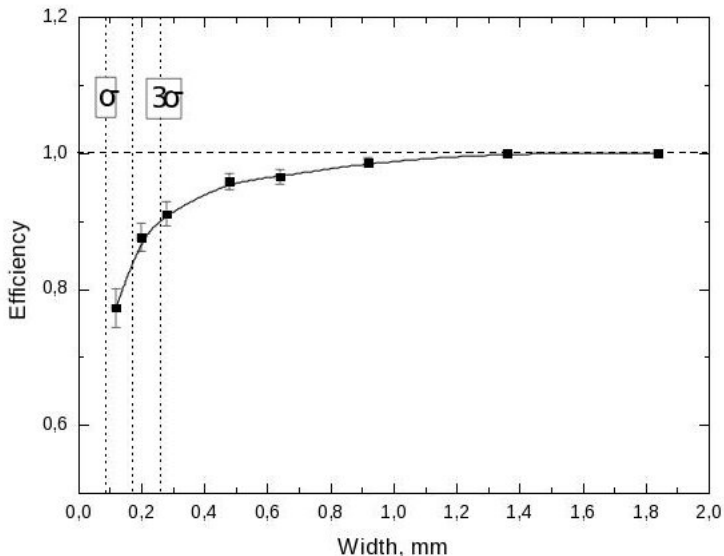


Рис. 10. Эффективность в зависимости от ширины коридора вокруг центра распределения разностей вычисленной и измеренной координат трека.

Типичное распределение координат треков, измеренное в одном из заходов с космическими частицами, показано на рис. 11. Кроме статистических флуктуаций на рисунке видна дифференциальная нелинейность с регулярной структурой с периодом около 10 каналов (5 мм). Это расстояние соответствует эффективной ширине непрерывного сегмента ГЭУ. Сегменты ГЭУ с верхней и нижней сторон имеют ширину 10 мм, и структура сегментов на верхней стороне сдвинута относительно нижней на 5 мм. Структура дифференциальной нелинейности с падениями эффективности в местах, соответствующих зазорам между сегментами, и подъемами эффективности по обе стороны от этих зазоров свидетельствует о том, что ионизация не теряется между сегментами ГЭУ, а дрейфует вокруг

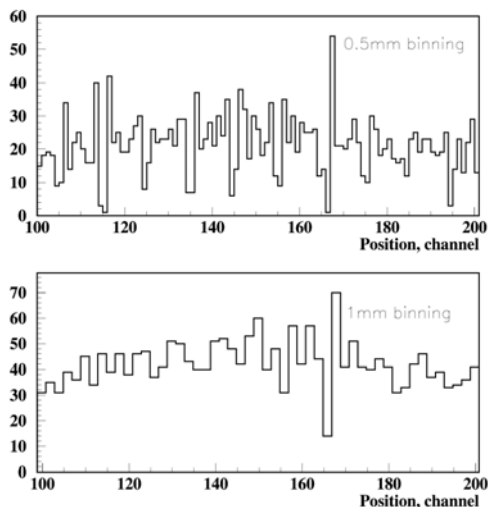


Рис. 11. Распределение координат треков (ЦТ) в направлении перпендикулярном прямым полоскам. Распределение на одном и том же участке детектора показано с размером канала 0,5 мм (верхняя гистограмма) и 1 мм (нижняя гистограмма).

них через ближайшие отверстия ГЭУ. Это демонстрирует нижняя гистограмма на рис. 11, где показано то же распределение, что и на верхнем рисунке, но с размером канала 1 мм. Дифференциальная нелинейность интегрируется в более крупных каналах и видна только неоднородность, связанная со статистическими флуктуациями. Измеренные координаты треков, которые пересекают детектор в районе зазоров между сегментами ГЭУ, искажаются. Эффективная ширина зазоров составляет около 0,5 мм и, таким образом, доля таких событий близка к 10%, что может объяснить «гало» в распределении на рис. 9.

Поскольку толщина зазора между дрейфовым электродом и верхним ГЭУ равна 3 мм, можно ожидать существенного ухудшения пространственного разрешения с увеличением угла наклона трека относительно перпендикуляра к плоскости детектора. Результат такого измерения, проведенного с космическими частицами, показан на рис. 12. На рисунке приводится зависимость измеренного разрешения от направления трека. На экспериментальные данные наложена кривая, полученная из

формулы $\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + (\text{tg}(\alpha) \times h / \sqrt{12})^2}$, где подразумевается равномерное распределение сигнала в пределах проекции трека на плоскость детектора. Здесь σ_0 – стандартное отклонение при нулевом угле и h – расстояние между

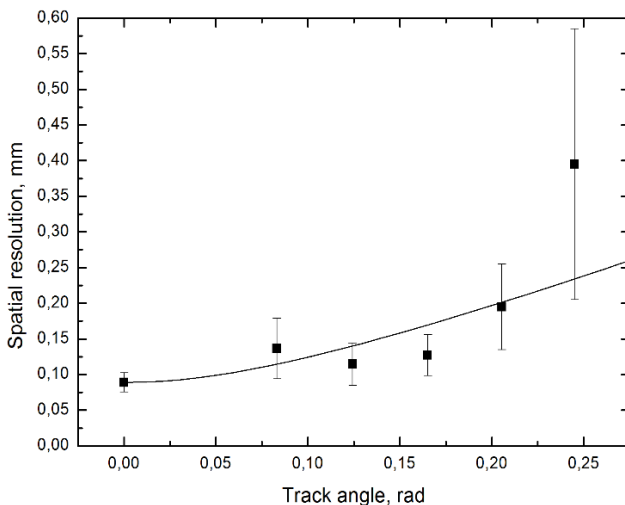


Рис. 12. Зависимость стандартного отклонения распределения разностей вычисленной и измеренной координат трека от угла наклона. Кривая подгонки рассчитана из проекции трека (см. текст).

дрейфовым электродом и верхним ГЭУ, равное 3 мм. Из рисунка видно, что экспериментальные результаты хорошо соответствуют расчетной кривой. В СРРЭ максимальный угол наклона трека не должен превышать 0,1 рад, и пространственное разрешение практически не ухудшается в этом диапазоне углов.

Результат измерения пространственного разрешения в направлении параллельном прямым полоскам в центральной зоне детектора (1 см вокруг центральной оси) показан на рис. 13. Стандартное отклонение распределения разностей вычисленной и измеренной координат трека равно $\sim 0,268$ мм. Этот результат соответствует пространственному разрешению детектора $\sim 0,219$ мм.

Реконструкция координаты трека в направлении параллельном прямым полоскам производится вычитанием ЦТ, вычисленного для сигнала с наклонных полосок, из ЦТ, определенного для сигнала с прямых полосок. Ассоциация сигналов в обоих слоях производится с использованием простого геометрического критерия: разность ЦТ ассоциированных сигналов не должна превышать 36 каналов. Это число складывается из восьми 5 мм каналов в зоне ниже центральной части детектора, двадцати 1 мм каналов в центральной части детектора и восьми 5 мм каналов в зоне выше центральной части детектора. Дополнительным критерием, который может быть использован для ассоциации сигналов, является корреляция их величины. Двумерная гистограмма корреляции сигналов в наклонном и

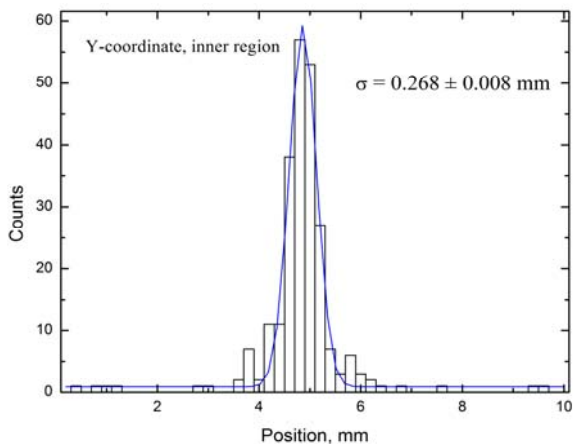


Рис. 13. Распределение разностей вычисленной и измеренной координат трека в направлении параллельном прямым полоскам в центральной зоне детектора (1 см вокруг центральной оси).

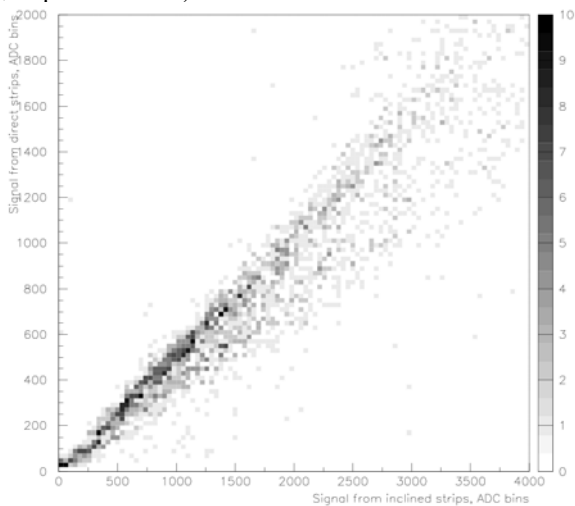


Рис.14. Корреляция между сигналами с прямых полосок (вертикальная шкала) и наклонных полосок (горизонтальная шкала).

прямом слоях детектора показана на рис. 14. Из рисунка видно, что сигнал не делится поровну между слоями, а наклонные полоски получают примерно в два раза больший сигнал, чем прямые. Этот результат находится в противоречии с результатом аналогичного измерения с прототипом детекторов ГЭУ-СРРЭ, приведенным в статье [6], где было продемонстрировано равное деление заряда при выбранной геометрии

полосок. После изучения возможных причин такого поведения была обнаружена ошибка в изготовлении считывающей платы. На фотографии платы (рис. 15) видно, что слои перепутаны: слой с более широкими наклонными полосками вынесен наверх, а более узкие прямые полоски находятся под ним. Эта ошибка изготовителя объясняет неравное деление заряда между слоями. Существенно меньший сигнал, считываемый с прямых полосок, приводит к необходимости работы при значительно более высоком коэффициенте усиления для достижения полной эффективности.



Рис. 15. Фотография считывающей платы. Слой с наклонными полосками находится над слоем с прямыми полосками.

Распределения размеров кластеров сигналов в прямом и наклонном слоях показаны на рис. 16. Средний размер кластера в слое прямых полосок составляет ~ 1.58 каналов или ~ 0.79 мм, а ширина кластера в слое наклонных полосок равна ~ 1.78 канала или ~ 0.89 мм. Таким образом, зарядовые кластеры в детекторе достаточно узкие и можно ожидать эффективное разделение треков до расстояния 1 мм.

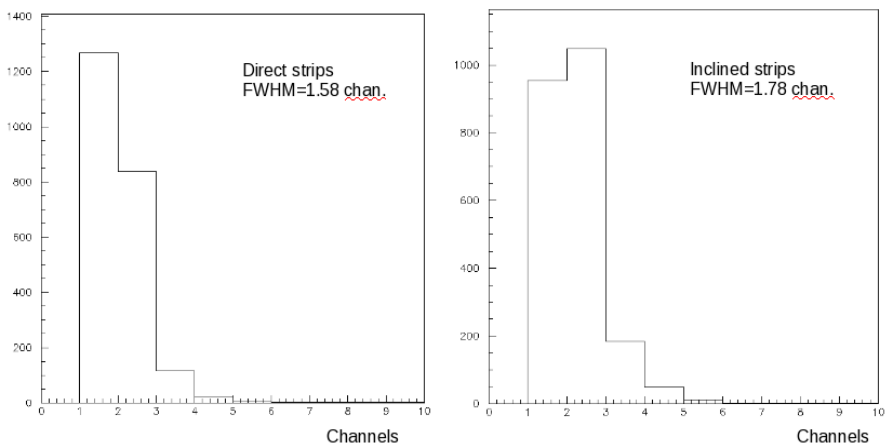


Рис. 16. Распределение размеров зарядовых кластеров в прямом и наклонном слоях.

4. Работа детекторов на основе ГЭУ в составе СРРЭ

Монтаж всех детекторов на основе ГЭУ в составе СРРЭ был закончен в начале 2009г. В течение сезона 2009-2010 проводилась отладка сбора данных, и в конце этого сезона система была окончательно запущена (май 2010). С начала сезона 2010-2011 (ноябрь 2011) детекторы на основе ГЭУ были включены в состав системы сбора данных эксперимента КЕДР.

Для анализа работы детекторов на основе ГЭУ совместно с годоскопами дрейфовых трубок сначала отбирались качественные треки в дрейфовых трубках. Затем детекторы ГЭУ сканировались в поисках сигнальных кластеров в прямых и наклонных слоях в определенном коридоре вокруг реконструированного трека. Детектор ГЭУ считался эффективным, если зарядовые кластеры были найдены и в прямом и в наклонном слоях, а также, если эти кластеры могли быть ассоциированы друг с другом, т.е. разность координат ЦТ составляла менее 36 каналов.

Результаты измерения основных параметров детекторов, таких как газовое усиление и эффективность, показаны на рис.17-19. На рис.17 показана зависимость коэффициента газового усиления всех детекторов на основе ГЭУ от напряжения, подаваемого на высоковольтные делители. Величина усиления получена из суммы сигналов наклонного и прямого слоев умножением на калибровочную константу, измеренную электронной калибровкой. У всех детекторов наблюдается экспоненциальная зависимость усиления от напряжения. Детектор 1 и детектор 5 значительно отличаются от остальных 6 детекторов из-за отклонений в параметрах делителей. Максимальный коэффициент усиления 40000–50000 определялся в этом измерении пределами линейности предусилителей.

На рис.18 показана зависимость эффективности от газового усиления для 8 детекторов системы. Все детекторы, кроме 2 и 5, демонстрируют близкое поведение с эффективностью около 90% при усилении 20000 и величине эффективности на плато между 95% и 98%. Это близко к результатам измерения с космическими частицами (см. рис.8). Детекторы ГЭУ работают в условиях сильных шумов очень близко к пучку. Высокий уровень электромагнитных наводок может вызывать увеличение флуктуаций базовой линии предусилителей, что существенно ухудшает эффективность поиска зарядовых кластеров. Более высокий шум базовой линии является наиболее вероятной причиной меньшей ширины плато эффективности у детекторов 2 и 5 на рис. 18. Тем не менее, эффективность этих детекторов близка к 93% при усилении 30000.

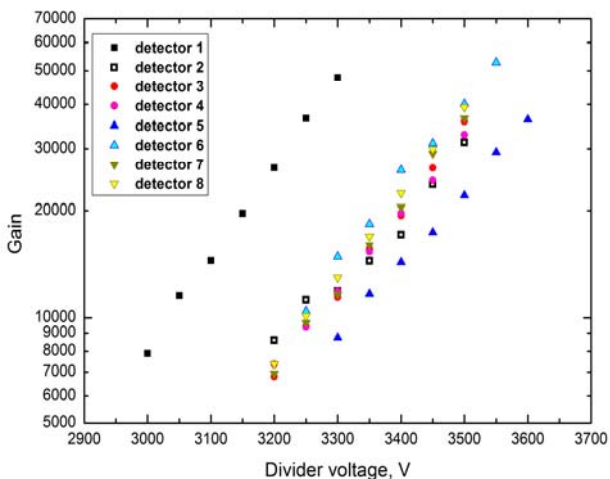


Рис.17. Коэффициент газового усиления в зависимости от напряжения на делителе для 8 детекторов системы ГЭУ-СРРЭ.

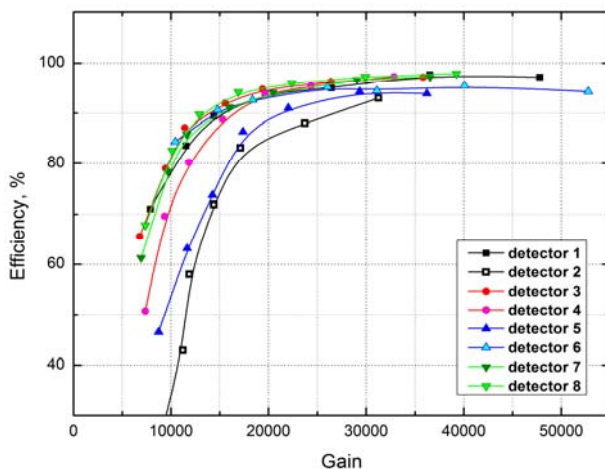


Рис.18. Эффективность в зависимости от газового усиления для 8 детекторов системы СРРЭ-ГЭУ.

На рис. 19 показана эффективность регистрации одного слоя (наклонные полосы) и полная эффективность, когда сигнал регистрируется в обоих слоях. Видно, что из-за различия в величине сигнала, в то время как плато эффективности верхнего слоя начинается при усилении ~ 10000 , плато полной эффективности начинается при усилении ~ 20000 .

Плотность треков, регистрируемых в детекторах ГЭУ-СРРЭ, является

сильно неоднородной. Это показано на рис. 20, где приведено распределение точек пересечения треками плоскости детектора для станции 4 на электронной стороне. Распределение имеет существенно более высокую плотность ближе к плоскости орбиты из-за электронов, потерявших энергию в ОТИ. Практически половина всех треков сосредоточена в пределах 1 см от вакуумной камеры (правая сторона рисунка). Электроны более низких энергий получают импульс в вертикальном направлении при прохождении магнитной системы КЕДРа и ВЭПП-4М, и, в результате, распределение треков является не вполне горизонтальным, а слегка развернутым. Этот угол увеличивается для внутренних станций (т.е. детекторов 1-3). Большая часть зарядовых кластеров занимает менее 2 каналов (см. рис.16) и, поскольку вертикальный шаг также равен 1 мм, большая часть ЦТ по вертикали расположена ближе к центру соответствующего канала. На рис. 20 это выражается в виде горизонтальных линий на распределении. Координаты треков в детекторах на основе ГЭУ хорошо коррелируют с соответствующими координатами треков в годоскопах дрейфовых трубок (рис. 21).

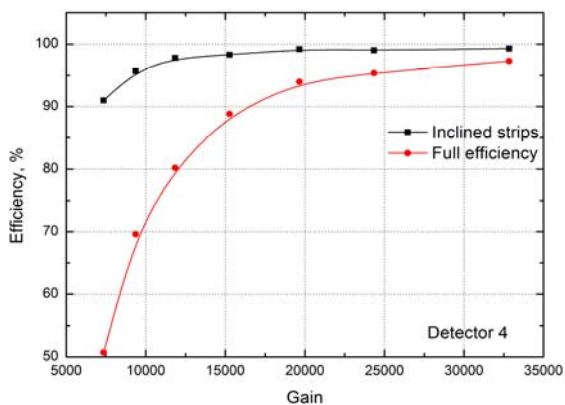


Рис. 19. Эффективность регистрации в одном слое (наклонные полосы) и полная эффективность в зависимости от газового усиления для 4-го детектора на электронной стороне.

Стабильность детекторов на основе ГЭУ в течение сезона 2010-2011 показана на рис. 22, 23. В течение первого месяца работы высокое напряжение на детекторах подстраивалось таким образом, чтобы газовое усиление во всех детекторах превышало 20000 даже при самом высоком атмосферном давлении. Как видно на рис.22, коэффициент усиления во всех детекторах изменяется синхронно при изменениях атмосферного давления. После такой настройки эффективность во всех детекторах держится выше уровня 95% (рис. 23).

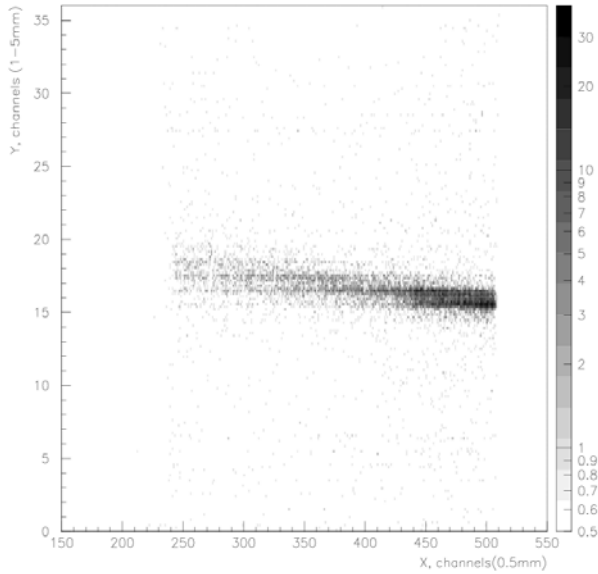


Рис. 20. Двумерное распределение плотности треков в 4-ом детекторе на электронной стороне.

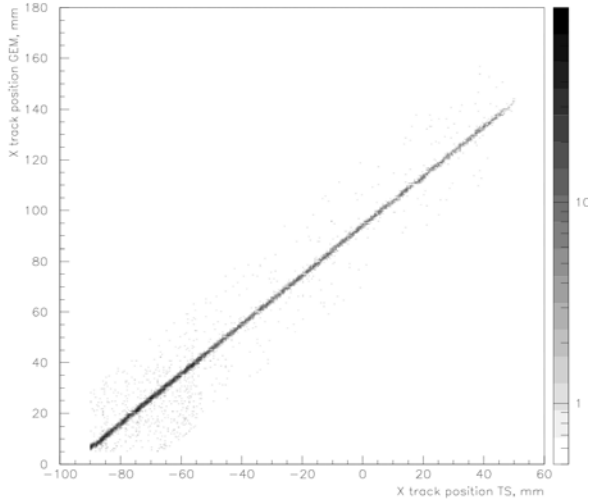


Рис. 21. Корреляция координаты треков в плоскости орбиты в детекторе на основе ГЭУ и в СРЭ годоскопе на дрейфовых трубках в 4-й станции на электронной стороне.

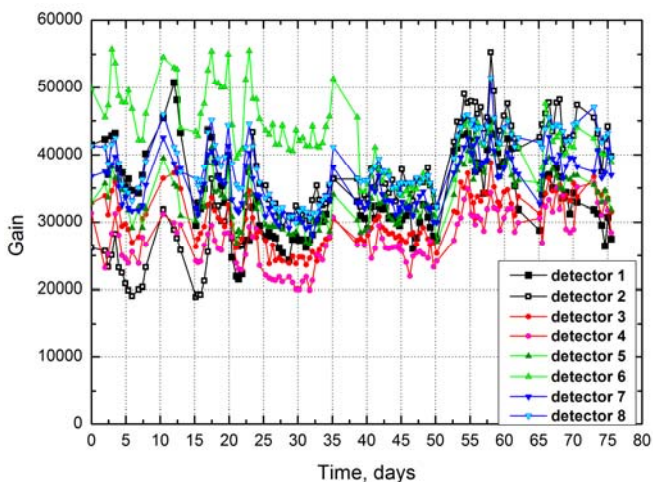


Рис. 22. Коэффициент газового усиления в зависимости от времени для 8 детекторов системы ГЭУ-СРРЭ в течение первых месяцев работы.

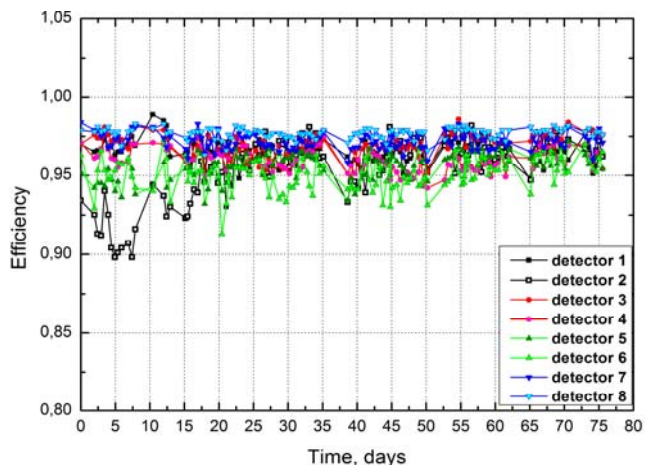


Рис. 23. Эффективность 8 детекторов системы ГЭУ-СРРЭ в зависимости от времени в течение первых месяцев работы.

5. Заключение

Детекторы на основе 3-каскадных ГЭУ с мало-угловым стерео считыванием добавлены к существующей системе регистрации рассеянных электронов эксперимента КЕДР. Детекторы на основе ГЭУ успешно запущены и полностью включены в систему сбора данных КЕДРа. При этом

влияние новой подсистемы на мертвое время и скорость чтения системы сбора данных КЕДРа пренебрежимо мало. Пространственное разрешение детекторов на основе ГЭУ составляет ~ 73 мкм в плоскости орбиты и ~ 219 мкм в перпендикулярном направлении в центральной части. Эффективность детекторов достигает 98%, и плато эффективности начинается при газовом усилении ~ 20000 . Из-за колебаний атмосферного давления более надежная работа с эффективностью в диапазоне 95–97% достигается при усилении выше 25000. Такое высокое усиление необходимо из-за существенного различия сигналов, наводимых на прямые и наклонные полосы. Сигнал на прямых полосках примерно в 2 раза меньше сигнала на наклонных полосках.

Система из 8 детекторов на основе ГЭУ работает в составе эксперимента КЕДР с начала сезона 2010-2011 (ноябрь 2010). Первый опыт эксплуатации показал, что система достаточно надежна, и в детекторах не возникает пробоев, несмотря на то, что они расположены вплотную к вакуумной камере и в них часто попадают интенсивные потоки частиц при потерях и сбросах пучка. После начальной подстройки высокого напряжения эффективность всех детекторов находится в диапазоне 95–98% при газовом усилении в диапазоне 25000–40000.

Первые данные, проанализированные с детекторов на основе ГЭУ, показывают очень хорошую корреляцию координат треков в старой и новой системах. На двухкоординатных распределениях плотности треков в станциях СРРЭ, полученных с помощью новых детекторов, видно сгущение распределения в районе плоскости орбиты, образованное электронами и позитронами после однократного тормозного излучения. Однако зона максимальной плотности треков слегка развернута по отношению к горизонтальной оси детектора и для подавления фона от ОТИ необходимо хорошее пространственное разрешение в направлении перпендикулярном плоскости орбиты.

Настоящая работа выполнялась частично за счет средств грантов РФФИ 09-0201143 и 10-02-00871.

Литература

- [1] V. Anashin et.al. Status of the KEDR detector. // NIM A478 (2002) 420-425.
- [2] V. Anashin et al. VEPP-4M Collider: Status and Plans. - Proc. of EPAC'98, Stockholm, 1998, p.400.
- [3] V. Smaluk for the VEPP-4 team. Accelerator Physics Issues of the VEPP-4M at Low Energy. - Proc. Of EPAC 2004, Luzern, 2004, p.749.
- [4] V.M. Aulchenko, et al. Nucl. Instr. and Meth. A 355 (1995) 261.

- [5] V.M. Aulchenko, et al. Nucl. Instr. and Meth. A 379 (1996) 360.
- [6] V.M. Aulchenko, et al. Nucl. Instr. and Meth. A 494 (2002) 241.
- [7] V.M.Aulchenko, et.al. Nucl.Instr.and.Meth. A598 (2009) 112-115.
- [8] F. Sauli, Nucl. Instr. and Meth. A 386 (1997) 531.
- [9] B. Ketzer, C. Altunbas, K. Dehmelt, J. Ehlers, J. Friedrich, B. Grube, S. Kappler, I.Konorov, S. Paul, A. Placci, L. Ropelkewski, F. Sauli. Triple-GEM tracking detector for COMPASS. // IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, (San Diego Nov. 4-10, 2001). IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-49 (2002) 2403.
- [10] Bressan A, Labbe J C, Pagano P, Ropelewski L., Sauli F. Nucl. Instr. and Meth. A 425 (1999) 262.
- [11] S. Bachmann, et.al. Nucl.Instr.and Meth. A479 (2002) 294-308.
- [12] L. Jones. PreMUX128 specification V2.3, Rutherford Appleton Laboratory internal document, 1995.

*В.М. Аульченко, О.Л. Белобородова, А.В. Бобров,
А.Е. Бондарь, В.Н. Жилич, В.В. Жуланов,
В.Н. Кудрявцев, А.Г. Шамов, Л.И. Шехтман*

**Детекторы на основе трехкаскадных ГЭУ
в системе регистрации рассеянных электронов
эксперимента КЕДР на накопителе ВЭПП-4М**

*V.M. Aulchenko, O.L. Beloborodova, A.V. Bobrov,
A.E. ^{Bondar}, V.N. Zhilich, V.V. Zhulanov,
V.N. Kudryavtsev, A.G. Shamov, L.I. Shekhtman*

**Triple-GEM detectors in the tagging system
of KEDR experiment at VEPP-4M**

ИЯФ 2010-41

Ответственный за выпуск А.В. Васильев
Работа поступила 13.12. 2010 г.

Сдано в набор 14.12. 2010 г.
Подписано в печать 14.12. 2010 г.
Формат 60х90 1/16 Объем 1,5 печ.л., 1,2 уч.-изд.л.
Тираж 90 экз. Бесплатно. Заказ № 41

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11