

На правах рукописи

ЮДИН Юрий Валерьевич

ЭЛЕКТРОНИКА
ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ДЕТЕКТОРА КМД-2
НА ОСНОВЕ ГЕРМАНАТА ВИСМУТА

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НОВОСИБИРСК – 2006

Работа выполнена в Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Аульченко Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор, Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Купер Эдуард Адольфович – доктор технических наук, Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

Вьюхин Вячеслав Николаевич – кандидат технических наук, Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – ГНЦ РФ "Институт физики высоких энергий", г. Протвино.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2006 г. в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.01 Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, Новосибирск-90,
проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ
им. Г.И.Будкера СО РАН.

Автореферат разослан: «_____» _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

С 1992 по 2000 г в Институте ядерной физики им. Будкера проводились эксперименты с Криогенным Магнитным Детектором КМД-2 на встречных электрон-позитронных пучках в диапазоне энергий от 340 до 1400 МэВ в системе центра масс.

Детектор КМД-2 представляет собой магнитный спектрометр, окруженный электромагнитным калориметром, состоящим из цилиндрического калориметра (на основе кристаллов йодида цезия) и торцевого калориметра (на основе кристаллов германата висмута). Многие из физических процессов, изучаемых с помощью КМД-2, характеризуются наличием двух и более гамма-квантов в конечном состоянии. Использование полного калориметра (цилиндрической и торцевой частей) позволяет увеличить эффективность регистрации таких процессов в 2-3 раза по сравнению со случаем, когда используется только цилиндрический калориметр. Таким образом, создание электроники, обеспечивающей полнофункциональное использование торцевого калориметра – для измерения энергии частиц и для запуска измерений – позволяет существенно улучшить параметры детектора в целом.

В период с 1991 г до лета 1998 г на детекторе КМД-2 использовалась отдельная система измерения светимости. В данной системе светимость измерялась по процессам однократного и двойного тормозного излучения и двухквантовой аннигиляции. Регистрирующими устройствами системы являются два счётчика полного поглощения, которые регистрируют частицы, вылетевшие из накопителя вдоль оси пучков (в основном это фотоны от вышеуказанных процессов).

Общим в устройстве торцевого калориметра и счетчиков полного поглощения, использованных в системе измерения светимости, является то, что они построены на основе кристаллов германата висмута (BGO), а в качестве фотоприемников используются вакуумные фототриоды. Применение относительно новых для того времени сцинтиллятора и фотоприемников обусловлено рядом специфических требований, предъявляемых к чувствительным устройствам обеих систем. В связи со сравнительно малым световыходом применённого сцинтиллятора и малым коэффициентом усиления фотоприемников электроника обеих систем должна удовлетворять очень жестким требованиям к величине шумов. Электроника системы измерения светимости, кроме того, обладает рядом особенностей, обусловленных выбранным методом измерения светимости и не имеющих аналогов в другой спектрометрической аппаратуре. Таким образом, для торцевого калориметра и для системы измерения светимости необходима специализированная электроника.

Цель диссертационной работы

- выработка и систематизация технических требований, предъявляемых к электронике торцевого калориметра и электронике системы измерения светимости;
- разработка и создание комплектов электроники для торцевого калориметра и для системы измерения светимости;
- разработка методик наладки и тестирования электроники обеих систем на стендах и в рабочих условиях.

Научная новизна работы

Созданы комплекты электроники для торцевого калориметра и системы измерения светимости детектора КМД-2. Аналоговая электроника обеих систем удовлетворяет специфически жёстким требованиям к величине шумов, что позволило впервые в России использовать кристаллы германата висмута с фотоприёмниками, имеющими низкий коэффициент усиления.

Электроника торцевого калориметра обеспечивает как измерение энерговыделения, так и запуск измерений с привязкой сигнала запуска измерений к моменту события.

В узле электронной регулировки усиления канала усилителя-формирователя для прецизионной регулировки усиления впервые применён регулирующий элемент на основе полевого транзистора. Это позволило работать с относительно малыми сигналами, что невозможно при использовании перемножающих ЦАП, а также дало возможность уменьшить габариты и стоимость аппаратуры.

Электроника системы измерения светимости соответствует весьма специфическим требованиям, обусловленным выбранным методом измерения светимости.

Формирование аналоговых сигналов мониторов светимости производится методом двойного дифференцирования на линиях задержки, специально модифицированным для преобразования экспоненциальной составляющей каждого сигнала, соответствующего сцинтилляционной вспышке, в сигнал конечной длительности. Таким образом достигается минимальная вероятность наложения сигналов от фотонов, относящихся к разным столкновениям пучков.

Схема второго дифференцирующего узла формирователя устроена так, что он дополнительно к своей основной функции подавляет помехи, создаваемые пучками частиц.

Научная и практическая ценность работы

Электроника торцевого калориметра в полном объёме (включая триггер) эксплуатировалась с 1996 г по 2000 г. Набранный с торцевым калориметром интеграл светимости составил 26.8 пбн^{-1} . Достиженные параметры кристаллов, вакуумных фототриодов и электроники позволили получить

энергетический эквивалент шумов 0.9 МэВ, а также обеспечить запуск измерений по сигналам торцевого калориметра. Таким образом было обеспечено увеличение телесного угла, перекрываемого калориметром детектора, с $0.65 \cdot 4\pi$ до $0.94 \cdot 4\pi$.

Система измерения светимости эксплуатировалась с 1991 г. до лета 1998 г. В 1995-96 гг. вся её электроника была модернизирована, в результате чего значительно улучшилась помехоустойчивость системы и возросла стабильность её работы. В течение всего срока эксплуатации результаты оперативного измерения светимости, получаемые с помощью этой системы, использовались для подстройки режимов работы накопителя с целью получения максимальной светимости, а также для примерного учёта набранного интеграла светимости. Окончание эксплуатации системы в 1998 г. связано с тем, что было надёжно налажено измерение светимости по данным торцевого калориметра, обеспечивающее лучшую точность.

Основные результаты работы

1. Создана электроника для торцевого калориметра, представляющая собой единый набор электронных модулей и блоков, выполняющих все требуемые функции по аналоговой обработке сигналов калориметра и выработке логических сигналов для Первичного Триггера.

- Разработаны методики наладки и тестирования электроники на стенде и создано соответствующее программное обеспечение. Все модули и блоки электроники были отлажены и проверены перед постановкой на детектор. Разработаны также методики контроля и оперативного управления электроникой на детекторе.
- Достигнутые характеристики кристаллов, вакуумных фототриодов и электронного тракта позволили получить энергетический эквивалент шумов 0.9 МэВ, что не уступает лучшему в то время калориметру, построенному на основе кристаллов ВГО с использованием фотоприемников с низким коэффициентом усиления – калориметру детектора L3.

2. Создана электроника для системы измерения светимости, соответствующая весьма специфическим требованиям, обусловленным выбранным методом измерения светимости. В апреле 1995 г. аналоговая электроника системы была заменена на полностью оригинальную, а в марте 1996 г. был также установлен специальный Блок Логической Обработки; в результате этих усовершенствований электроники значительно улучшилась помехоустойчивость системы и возросла стабильность её работы.

- Разработаны методики тестирования электроники, установленной на накопителе, а также специальная процедура контроля и подстройки задержек логических сигналов мониторов светимости.

- При достигнутых параметрах электроники систематическая ошибка, вносимая электроникой в точность измерения светимости, была значительно меньше погрешностей, обусловленных фоновыми частицами.

Апробация работы

Разработанные комплекты электроники успешно эксплуатировались в составе торцевого калориметра и системы измерения светимости детектора КМД-2 (ИЯФ СО РАН). Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах ИЯФ СО РАН. Кроме того, результаты работы докладывались на международных конференциях: "Instrumentation for Colliding Beam Physics – 96" (Новосибирск, 1996 г.), "IEEE Nuclear Science Symposium – 97" (Albuquerque, USA, ноябрь 1997 г.).

Структура и объём диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав и заключения. Материал диссертации изложен на 113 страницах и содержит 34 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основные задачи работы, описана структура и содержание диссертации.

В **главе 1** даны краткие описания ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2М и детектора КМД-2.

Комплекс ВЭПП-2М состоит из инжектора, синхротрона Б-3М, бустера БЭП и накопителя ВЭПП-2М. Энергия пучков в накопителе – 160 ± 700 МэВ.

Детектор КМД-2 – это универсальный детектор, позволяющий регистрировать и измерять с высокой точностью параметры заряженных частиц и фотонов. Координатная система детектора служит для измерения координат, углов вылета и импульсов заряженных частиц. Она включает в себя цилиндрическую дрейфовую камеру и двухслойную пропорциональную Z-камеру, расположенные в однородном продольном магнитном поле. Координатная и магнитная системы детектора в совокупности образуют магнитный спектрометр. Снаружи магнитный спектрометр окружён электромагнитными калориметрами – цилиндрическим, собранным из кристаллов CsI, и торцевым, собранным из кристаллов ВGO. Калориметры служат для измерения энергии и координат фотонов и заряженных частиц.

Z-камера является не только координатным устройством, но и одной из основных частей системы Первичного Триггера (ПТ). Временное разрешение Z-камеры позволяет точно определить, на каком именно столкновении пучков произошло событие. Её сигналы используются для

привязки временных измерений к моменту события, что необходимо для реконструкции треков по информации от Дрейфовой камеры.

Для регистрирующей электроники Z-камеры и Дрейфовой камеры был выбран режим работы "с общим стопом": каждый канал активизируется поступившим входным сигналом индивидуально и начинает выполнять цикл измерения. Если в течение установленного времени ожидания (1280 нс) после активизации канала будет получен сигнал запуска измерений от ПТ, то входной сигнал будет зарегистрирован (сигнал запуска измерений является также временной отметкой для измерения времени прихода входных сигналов); в противном случае канал приводится в исходное состояние готовности к приёму следующего входного сигнала.

В связи с необходимостью обеспечить работу регистрирующей электроники в режиме "с общим стопом", задача системы ПТ состоит в том, чтобы выработать сигнал положительного решения о запуске цикла измерений не более чем через 1280 нс после события, причем этот сигнал должен быть синхронизован с событием с точностью 1-2 нс. Для точной синхронизации сигналов запуска измерений с моментом события используются импульсы "Фазы" обращения пучков (синхронизованы с ускоряющим напряжением накопителя). Триггер Торцевого Калориметра (ТТК) – подсистема, обеспечивающая запуск измерений по частицам, попавшим в торцевой калориметр. Его задача – выработать сигнал о наличии полезного срабатывания за время, меньшее, чем общее время работы ПТ, обеспечивая временную привязку этого сигнала к моменту события с наилучшей возможной точностью.

Глава 2 посвящена электронике торцевого калориметра.

Торцевой калориметр построен на основе 680 кристаллов германата висмута (BGO), которые собраны в две одинаковые плотно упакованные матрицы, расположенные за торцами дрейфовой камеры. Поскольку торцевой калориметр расположен в областях, где есть продольное магнитное поле, в качестве фотоприёмников использованы вакуумные фототриоды производства ИЯФ, которые могут работать в продольном магнитном поле до 2 Тл.

Технические требования к электронике торцевого калориметра в целом определяются тем, чтобы она позволяла достаточно полно реализовать его физические возможности. Энергетическое разрешение калориметра ограничено в основном флуктуациями утечек электромагнитных ливней. Чтобы вклад шумов в энергетическое разрешение был незначителен, энергетический эквивалент шумов каждого канала должен быть не более 1 МэВ. Для реконструкции треков необходимо, чтобы сигнал запуска измерений по сигналам торцевого калориметра был привязан по времени к событию с точностью до 3-4 периодов обращения пучков.

Поскольку для обеспечения наилучших энергетического и временного разрешений требуются сильно различающиеся формировки сигналов, было

решено сделать по 2 формирующих узла в каждом канале: один – для энергетических измерений, другой – для использования в триггере. Для энергетических измерений была выбрана формирующая схема, состоящая из дифференцирующей CR-цепи и интегрирующей цепи, содержащей Т-звенно; постоянная времени этой схемы была выбрана равной 3 мкс. Для достижения наилучшего временного разрешения оптимальным оказалось формирование CR-RC-схемой с постоянной времени 0.3 мкс.

Так как электромагнитный ливень распределяется по нескольким соседним кристаллам, для обеспечения правильной работы ТТК сигналы с них необходимо просуммировать. Область суммирования должна быть больше поперечного размера ливня, но не слишком большой, чтобы шумы группового суммарного сигнала были не слишком велики; кроме того, деление калориметра на группы должно быть достаточно подробным для обеспечения приемлемого качества отбора событий по их топологии. Выбрано разбиение на группы по 12...15 кристаллов, что близко к оптимальному по шумам. В рамках каждой группы решено устроить аналоговое суммирование сигналов, и полученные таким образом групповые сигналы подавать в ТТК.

Аппаратура ТТК должна обеспечить порог регистрации групповых сигналов не более 30÷50 МэВ (6-8% от максимального энерговыделения). Кроме того, для достижения требуемой точности привязки сигнала запуска к событию необходимо применить двухпороговую дискриминацию сигналов.

Электроника торцевого калориметра состоит из трёх основных частей: аналоговой электроники, блоков АЦП и Триггера. Зарядочувствительные предусилители (ЗЧУ) расположены в непосредственной близости к фототриодам, что позволяет минимизировать их собственные шумы и внешние наводки. Выходные сигналы ЗЧУ выводятся экранированными витыми парами, и перегруппировываются таким образом, что сигналы от каждой группы соседних кристаллов поступают на одну группу каналов усилитель-формирователей (УФ). Усилители-формирователи преобразуют сигналы ЗЧУ в сигналы, оптимизированные для энергетических измерений и для временной привязки. Коэффициент усиления каждого канала подстраивается ручной и электронной регулировками. Сигналы нормализованной амплитуды поступают на два различных формирователя. Первый из них, с постоянной времени 3 мкс, формирует сигнал для измерения энергии; этот сигнал подаётся на АЦП. Второй формирователь, с постоянной времени 0.3 мкс, выдаёт "быстрый" сигнал для использования в триггере. "Быстрые" сигналы всех каналов каждой группы поступают через электронные ключи на общий аналоговый сумматор этой группы. Суммарные сигналы всех групп поступают в ТТК, а также на АЦП.

Зарядочувствительные предусилители определяют уровень шумов электроники, так как остальные блоки работают уже с усиленными сигналами, причём основной вклад дают шумы входного каскада предусилителя.

Чтобы удовлетворить установленным ограничениям на энергетический эквивалент шумов, величина приведенного ко входу эквивалентного шумового заряда должна быть не более 300 e при измерении с временем формирования 3 мкс, и не более 400 e при измерении с временем формирования 0.3 мкс. Оценки показали, что при выбранных постоянных времени в качестве входного транзистора лучше всего использовать полевой транзистор с затвором на основе р-п-перехода. Конкретный тип входного транзистора был выбран экспериментально – КП323.

Первый каскад ЗЧУ построен по широко применяемой каскодной схеме, обеспечивающей минимальную входную ёмкость. ЗЧУ имеет парафазный выход, способный работать на витуемую пару с волновым сопротивлением 110 Ом. В качестве ёмкостей обратной связи использованы предварительно отобранные конденсаторы ёмкостью 2.5÷2.6 пФ. На входах ЗЧУ устроены калибровочные ёмкости в виде полосок на печатной плате.

Параметры усилителей были проверены на восьми экземплярах из первой партии. У всех восьми проверенных ЗЧУ динамическая ёмкость оказалась больше 1200 пФ, что обеспечивает достаточно малую потерю входного заряда при работе с реальными фототриодами (выходная ёмкость фототриода \approx 6 пФ, суммарная ёмкость на входе ЗЧУ \approx 11 пФ) – менее 1%. Время нарастания выходного сигнала ЗЧУ – не более 40 нс. Коэффициент преобразования ЗЧУ, в соответствии с реальной ёмкостью обратной связи, получается \approx 0.3 В/пКл. Потребляемая мощность – 180 мВт/канал.

После первичной наладки и после ремонта все ЗЧУ проходили контроль уровня шумов. ЗЧУ с шумами больше требуемых дорабатывались. Распределения ЗЧУ по шумовым параметрам приведены на рис. 2, 3.

Усилители-формирователи выполнены в виде 30-канальных блоков УФ-30. Блок УФ-30 состоит из управляющей части и двух одинаковых групп, каждая из которых включает в себя 15 аналоговых каналов и аналоговый сумматор.

Первый каскад УФ имеет дифференциальный вход, благодаря чему “земли” ЗЧУ и УФ не связаны. Усиленный сигнал через потенциометр ручной регулировки усиления поступает на второй каскад. Второй каскад включает в себя узел электронной регулировки усиления, обеспечивающий точную подстройку коэффициента передачи канала под управлением компьютера. Формирователь “быстрого” сигнала реализован в виде двух узлов. Первый узел производит дифференцирование сигнала CR-цепочкой с постоянной времени 0.3 мкс, а также выполняет функции электронного ключа. Выходной токовый сигнал этого узла втекает в общую шину, к которой подключены выходы аналогичных узлов остальных каналов группы. Таким образом осуществляется суммирование сигналов от всех пятнадцати каналов группы. Суммарный токовый сигнал поступает на оконечную часть сумматора, содержащую интегрирующую RC-цепь и усилитель.

Электронные ключи используются для отключения отдельных шумящих каналов от сумматоров с целью подавить ложные запуски ТТК, а также для включения заданных комбинаций каналов во время проверки работы ТТК и при выравнивании индивидуальных вкладов каналов в суммарный сигнал.

Особенностью узла электронной регулировки усиления является то, что для прецизионной регулировки усиления используется полевой транзистор. Функциональная схема этого узла приведена на рис. 1. В качестве одного из резисторов цепи ООС 2-го каскада работает канал полевого транзистора. С помощью ОУ падение напряжения на канале ПТ, возникающее при протекании по нему постоянного тока, поддерживается равным управляющему напряжению, сохраняемому в накопительном конденсаторе C_s . Поэтому сопротивление канала ПТ с большой точностью пропорционально управляющему напряжению.

Управляющее напряжение для каждого канала задаётся 8-битным словом, записанным в ОЗУ по соответствующему адресу. Узел управления в автоматическом режиме поддерживает управляющие напряжения на накопительных конденсаторах всех каналов блока, периодически подзаряжая их. Адрес (он же номер) канала подаётся на адресные входы ОЗУ и аналогового коммутатора. Прочитанное из ОЗУ слово поступает в ЦАП, который формирует соответствующее напряжение, и оно через коммутатор подаётся на накопительный конденсатор выбранного канала. Такое схемное решение позволило не только сократить площадь, занимаемую узлом регулировки усиления, но и работать с относительно малыми сигналами, что невозможно при использовании перемножающих ЦАП из-за присущих им шумов.

Во время наладки УФ были проведены выборочные измерения их линейности. Поскольку ПТ ранее не применялись в схемах прецизионной регулировки усиления, были проведены также специфические измерения стабильности коэффициента усиления и идентичности зависимости коэффициентов усиления каналов УФ от управляющих кодов. Интегральная нелинейность, измеренная по выходу 3-микросекундного формирователя, получилась не хуже $\pm 0.14\%$ во всем диапазоне коэффициентов усиления. Идентичность зависимости коэффициентов усиления всех каналов УФ от управляющих кодов была измерена после установки их на детекторе. Зависимость коэффициента усиления от кода при изменении кода с 80 до 56

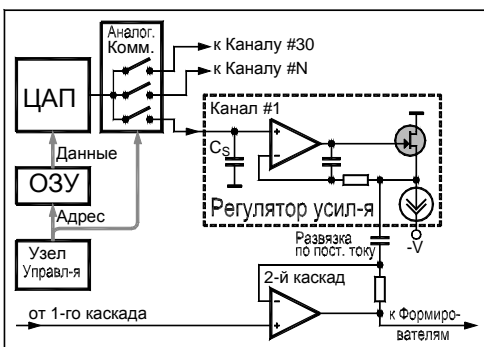


Рис. 1. Функциональная схема узла электронной регулировки усиления.

различается от канала к каналу меньше чем на 0.5%. Полученные значения находятся на пределе точности измерений, которая ограничена параметрами АЦП. Однако, этой точности достаточно, чтобы утверждать, что все эти значения удовлетворяют техническим требованиям.

Триггер Торцевого Калориметра (ТТК) предназначен для обнаружения событий интересующих типов и обеспечения запуска измерений. Интерес представляют события со значительным энерговыделением, а также упругое электрон-позитронное рассеяние (для определения светимости) и треки космических частиц (для калибровки калориметра). Входной информацией для ТТК являются быстрые суммарные сигналы от групп соседних кристаллов, по 24 сигнала от каждого торца. Из этих сигналов посредством двухпороговой дискриминации формируются логические сигналы срабатывания групп и сигнал запуска цикла работы ТТК (являющийся также временной отметкой события). Кроме того, групповые сигналы, превышающие заданный порог, подаются на сумматор полного энерговыделения. Логическая информация о сработавших группах используется для определения типа события по его топологии. С учетом типа события и суммарного энерговыделения формируется сигнал положительного решения ТТК, привязанный по времени к событию on-line с точностью 4-5 периодов обращения пучков.

После установки всей электроники на детектор было проведено измерение шумов электроники. Шумы измерялись по стандартной методике: на вход ЗЧУ подавался определённый калибровочный заряд, после чего эквивалентный шумовой заряд подсчитывался по отношению дисперсии измеренных амплитуд к их среднему значению. На рис. 2, 3 приведены для сравнения результаты измерения шумов на стенде и в рабочих условиях. Видно, что шумы практически одинаковы. Для оценки вклада внешних наводок в шумы было проведено специальное изучение коррелированных

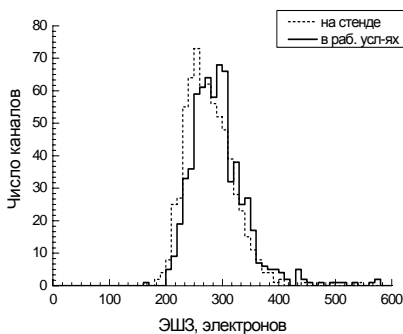


Рис. 2. Распределение ЗЧУ по величине шумов, формирование 3 мкс.

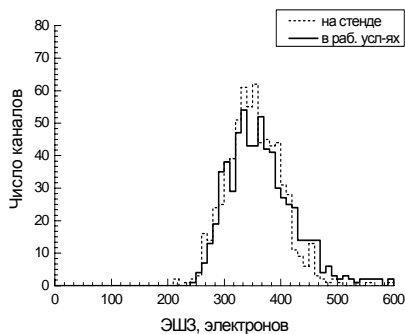


Рис. 3. Распределение ЗЧУ по величине шумов, формирование 0.3 мкс.

шумов электроники. Добавка от коррелированных шумов в среднем меньше 5%, что является оценкой сверху на вклад внешних наводок в шумы электроники. Эти результаты свидетельствуют о высокой помехозащищённости аналоговой электроники.

Глава 3 посвящена электронике системы измерения светимости. Чувствительными устройствами этой системы являются два монитора светимости. Каждый монитор представляет собой счетчик полного поглощения на основе кристалла германата висмута (BGO); в качестве фотоприёмника используется вакуумный фототриод. Мониторы расположены на расстоянии ± 220 см по оси пучков от места встречи пучков в детекторе и регистрируют фотоны тормозного излучения от процессов электрон-позитронного рассеяния, излучённые под малыми углами к оси пучков.

Метод измерения светимости состоит в следующем. Сначала в процессе специальной процедуры калибровки определяются пороговые энергии регистрации фотонов мониторами. Для этого измеряются энергетические спектры фотонов, регистрируемых каждым монитором. Границы спектра размыты, поэтому определение реальной пороговой энергии производится путём подгонки параметров расчётного спектра, так чтобы он наиболее близко совпадал с реальным. По измеренным значениям пороговых энергий рассчитываются сечения процессов однократного и двойного тормозного излучения (ОТИ и ДТИ) в регистрируемый диапазон энергий. После этого для измерения светимости используются только логические сигналы о срабатываниях мониторов: измеряются средние загрузки событий ОТИ и ДТИ, и по этим данным с учётом рассчитанных сечений вычисляется светимость.

К сожалению, реальные фоновые условия на накопителе ВЭПП-2М не позволяют измерять светимость по ОТИ точно лучше 50%. В то же время, для определения светимости по ДТИ отбираются события, когда оба монитора срабатывают одновременно ("прямые" совпадения сигналов); это позволяет снизить влияние фона в несколько раз, так как фоновые срабатывания двух мониторов некоррелированы. Поэтому светимость измерялась в основном по ДТИ. Одновременные срабатывания мониторов могут вызываться не только фотонами ДТИ, но и одновременным излучением в противоположные стороны двух фотонов ОТИ. Для вычитания этого фона используется хорошо известный метод "задержанных совпадений". Сигнал одного из мониторов задерживается ровно на 4 периода обращения пучков, тогда совпадения задержанного сигнала этого монитора и незадержанного сигнала другого монитора ("задержанные" совпадения) будут вызываться только случайным излучением двух фотонов ОТИ. Поэтому, вычитая количество "задержанных" совпадений из количества "прямых" совпадений, можно получить статистически верное число событий ДТИ.

Технические требования к электронике системы измерения светимости устанавливались с таким расчётом, чтобы систематическая ошибка определения светимости, вносимая электроникой, не превышала 5%.

При используемой методике точность определения пороговой энергии ограничена примерно $\frac{1}{3}$ от величины энергетического эквивалента шума. В описываемой электронике из-за жестких временных ограничений формирование аналогового сигнала сделано намного короче, чем было бы оптимально с точки зрения шумов, поэтому шумы дают значительный вклад в систематическую ошибку определения пороговой энергии. По результатам испытаний нескольких прототипов предусилителей было установлено ограничение на энергетический эквивалент шумов $\sigma_E \leq 10 \text{ МэВ}$, что даёт систематическую ошибку определения пороговой энергии $\sigma_{E \text{ thr}} \approx 3 \text{ МэВ}$. Из общего требования к величине систематической ошибки и установленного ограничения на шумы следует требование, чтобы интегральная нелинейность и нестабильность коэффициента передачи аналогового тракта в сумме не превышали 1.5% во всём диапазоне рабочих условий.

С целью уменьшения статистической погрешности измерения светимости в описываемой системе решено было устроить регистрацию совпадений таким образом, чтобы число случайных совпадений (и прямых, и задержанных) было минимизировано по сравнению с числом событий ДТИ. Для этого сигнал срабатывания каждого монитора перед подачей на схему совпадения точно синхронизируется (с использованием импульсов "Фазы" обращения пучков) с моментом столкновения пучков, к которому относится это срабатывание. Чтобы однозначно "привязывать" сигнал монитора к столкновению пучков, параметры формирования и способ дискриминации аналогового сигнала должны обеспечивать величину временного разброса срабатывания дискриминатора менее одного периода обращения пучков (60 нс).

Электроника системы измерения светимости (рис. 4) включает в себя два идентичных канала, каждый из которых обрабатывает сигнал одного монитора светимости. В каждом канале сигнал фототриода усиливается ЗЧУ и поступает на формирователь. Основная функция формирователя – преобразовать 300-наносекундную экспоненциальную составляющую сигнала, приходящего с ЗЧУ, в сигнал конечной длительности (рис.5а,б). В первом узле определённая доля сигнала задерживается на 50 нс и вычитается из незадержанного. Отклик этого узла на 300-наносекундную экспоненциальную составляющую сигнала будет представлять собой экспоненту, "срезанную" до константы через 50 нс от начала (рис. 5б, " u_{Sh1} "). После задержки и вычитания во втором узле 300-наносекундная составляющая сигнала укорачивается до конечной длительности, равной сумме задержек τ_{Delay1} и τ_{Delay2} (рис.5б, " u_{Sh2} "). Первый узел формирователя расположен в мониторе на одной плате с ЗЧУ. После него сигнал через выходной буфер ("Буфер") выдаётся в кабель длиной около 15 м, по которому сигнал

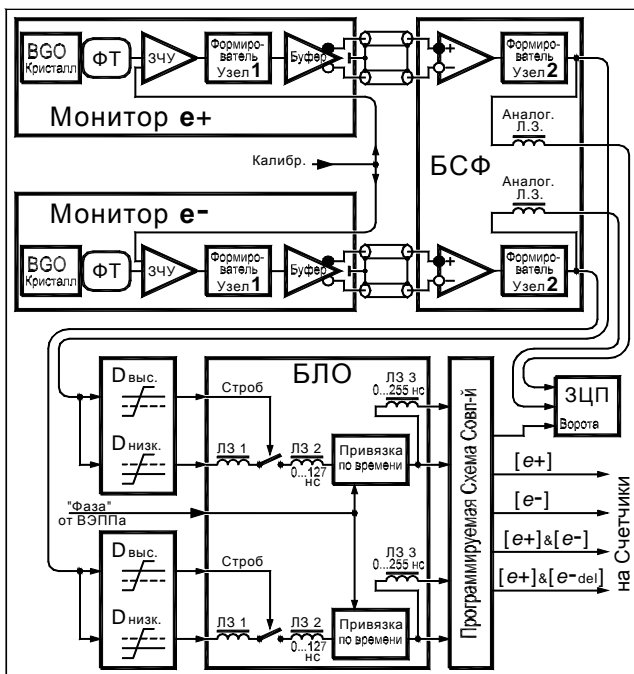


Рис. 4. Функциональная схема электроники системы измерения светимости.

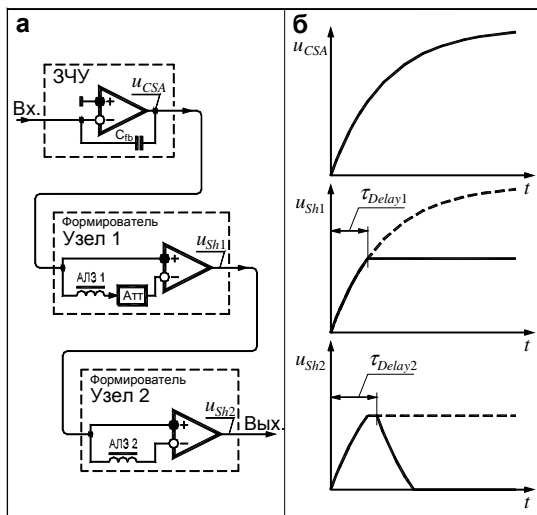


Рис. 5. Функциональная схема формирователя.

поступает в Блок Согласования и Формировки (БСФ). Второй узел формирователя размещён в БСФ, так как этот узел обеспечивает дополнительное подавление помех, наведённых пучками частиц в накопителе на сигнальный кабель. Сформированный сигнал каждого монитора поступает на дискриминаторы "высокого" и "низкого" порогов, которые, вместе с линией задержки ЛЗ 1 и схемой пропускания по стробу (размещены в Блоке Логической Обработки, "БЛО"), образуют схему двухпороговой дискриминации. Эта схема вырабатывает логический сигнал о срабатывании монитора с временным разбросом ≈ 50 нс относительно столкновения пучков. Логические сигналы срабатывания монитора, сформированные схемой двухпороговой дискриминации, задерживаются линией задержки ЛЗ 2 так, чтобы с помощью импульсов "Фазы" привязать их по времени к определённым столкновениям пучков. Привязанные по времени сигналы поступают на выход БЛО, а также на вход линии задержки ЛЗ 3, на которой реализуется задержка на 4 оборота пучка. Незадержанные и задержанные сигналы обоих мониторов поступают на Программируемую Схему Совпадений, которая формирует сигналы прямых и задержанных совпадений и распределяет их по счётчикам. Результаты подсчёта импульсов считываются компьютером и используются для расчёта светимости.

Сформированный аналоговый сигнал каждого монитора поступает также через аналоговую линию задержки (330 нс) на зарядо-цифровой преобразователь (ЗЦП) для измерения энергетических спектров. Задержка нужна для того, чтобы логические блоки успели сформировать сигнал "ворот" для ЗЦП.

Во время калибровок регулярно контролировались параметры электроники. Итоговый параметр, характеризующий влияние шумовых свойств аналогового тракта мониторов на точность определения пороговой энергии – энергетический эквивалент дисперсии минимальных регистрируемых сигналов σ_E – был измерен по "видимому" размытию левого края спектра сигналов в окрестности порога срабатывания, и составляет ≤ 12 МэВ, что обеспечивает точность определения пороговой энергии регистрации фотонов не хуже ± 5 МэВ. Отклонения коэффициента преобразования измерительного тракта из-за погрешностей формирования, нелинейных искажений и нестабильности коэффициента передачи аналогового тракта и т.д., были меньше 1%. Ошибки подсчёта числа задержанных совпадений в течение всего времени работы системы были не хуже 0.2% с вероятностью 99%.

В заключении перечислены основные результаты работы.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- [1] D.N. Grigoriev, R.R. Akhmetshin, ... , Yu.V. Yudin, *et al.* Performance of the BGO endcap calorimeter with phototriode readout for the CMD-2 detector, IEEE Trans. on Nucl. Sci, 1995, **v.NS-42**, p.505.
- [2] Yu.V. Yudin, V.M. Aulchenko, V.E. Fedorenko, D.N. Grigoriev, A.A. Ruban, V.P. Smakhtin. Analogue electronics of the endcap calorimeter for the CMD-2 detector, Nucl. Instr. and Meth., **v.A379** (1996), p.528.
- [3] Ю.В. Юдин, Д.Н. Григорьев, А.А. Рубан, В.П. Смахтин, В.Е. Федоренко. Электроника торцевого калориметра детектора КМД-2, Препринт ИЯФ **99-75**, Новосибирск, 1999.
- [4] R.R. Akhmetshin, D.N. Grigoriev, V.F. Kazanin, A.A. Ruban, V.P. Smakhtin, Yu.V. Yudin. The BGO endcap calorimeter with photodiode readout for the CMD-2 detector, Nucl. Instrum. and Meth., **v.A453**(2000), p.249.
- [5] I.B. Logashenko, R.R. Akhmetshin, D.N. Grigoriev, ... , Yu.V. Yudin, *et al.* Performance of the BGO luminosity monitor of the CMD-2 detector., Nucl. Instr. and Meth, **v.A379** (1996), p.366-368.
- [6] Yu.V. Yudin, R.R. Akhmetshin, D.N. Grigoriev, I.B. Logashenko, V.S. Letunov, V.P. Smakhtin. Electronics of the Luminosity Monitor of the CMD-2 detector, IEEE Trans. on Nucl. Sci., **v.45**, No. 3, 1998, p.768.
- [7] Э.В. Анашкин, В.М. Аульченко, ... , Ю.В. Юдин *и др.* Криогенный магнитный детектор КМД-2, Приборы и техника эксперимента, 2006, № 5, с.1-17.

Юдин Юрий Валерьевич

**Электроника
для спектрометрических систем детектора КМД-2
на основе германата висмута**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Сдано в набор 21.11.2006 г.
Подписано к печати 21.11.2006 г.
Формат 60×90 1/16 Объём 0.8 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 54

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