

На правах рукописи

Карпухин Василий Сергеевич

СИСТЕМА МЕЧЕНИЯ η -МЕЗОНОВ

01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва – 2013

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Гуров Юрий Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Демьянова Алла Сергеевна, старший научный
сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт»,
ведущий научный сотрудник

кандидат физико-математических наук
Семенов Виталий Константинович,
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Лаборатория ядерных проблем
им. В.П.Джелепова Объединенного института
ядерных исследований, г. Дубна

Защита состоится «27» ноября 2013 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 при НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31 телефоны: (499) 324-84-98, (499) 323-95-26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан « 24 » октября 2013 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор

Улин С.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Изучение физики распадов η -мезонов представляет интерес для подтверждения предсказаний Стандартной Модели (СМ). К настоящему времени СМ подтверждена во множестве экспериментальных исследований. В то же время СМ содержит большое количество внешних параметров, некоторые из которых известны с недостаточной точностью. Экспериментальное определение величин этих параметров, а также поиск явлений, не описываемых СМ, являются одними из главных направлений развития современной фундаментальной физики.

Процессы рождения η -мезонов в нуклон-нуклонных взаимодействиях вблизи порога реакции являются хорошим тестовым экспериментом для проверки разнообразных моделей описывающих взаимодействие нуклонов на малых расстояниях. Изучение распада $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ представляет интерес с точки зрения уточнения разности масс u - и d -кварков и проверки киральной теории возмущений [1]. Отметим, что этот распад происходит в результате сильного взаимодействия с нарушением изотопической инвариантности. Исследование таких распадов, как $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$ и $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$, проходящих в результате электромагнитного взаимодействия, важно для уточнения параметров квантовой электродинамики. Также представляет интерес поиск распадов, запрещенных в СМ, для которых как следует из компиляции Particle Data Group [2] верхние границы на их вероятность достаточно велики.

Во многих каналах распадов η -мезонов образуются как заряженные, так и нейтральные частицы. В таких условиях для надежной идентификации этих частиц и измерения их энергии требуется использовать установки с 4π геометрий. Достаточная статистическая обеспеченность для исследования редких распадов может быть получена на накопительных кольцах протонов при светимостях, превышающих $10^{31} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. При столь высоких нагрузках успех эксперимента зависит от временного и энергетического разрешения измерительной установки.

Для прецизионного определения параметров распадов η -мезона одной из главных задач является подавление физического фона в режиме реального времени. Среди возможных вариантов создания триггера первого уровня выделяется подход, основанный на регистрации частиц, сопутствующих рождению η -мезона. Определение недостающей массы, равной массе η -мезона, позволяет провести отбор полезных событий. Обычно этот метод называют “мечением” η -мезонов, а спектрометр, регистрирующий вторичные частицы, – системой “мечения”.

В работе в качестве реакции “мечения” используется двухчастичная реакция $pd \rightarrow {}^3\text{He} \eta$, что позволяет по результатам измерения энергии ядер ${}^3\text{He}$ эффективно отбирать события, связанные с образованием η -мезонов. Созданная система мечения использовалась для экспериментов на установке WASA, расположенной на накопительном кольце CELSIUS [3] (Упсала,

Швеция). Технические условия, определяемые конструкцией ускорителя, позволили использовать систему “мечения” η -мезонов на основе полупроводниковых детекторов (ППД), изготовленных из кремния (Si) и сверхчистого германия (HPGe). Малые размеры ППД-модуля позволяли размещать его внутри вакуумного объема ионопровода ускорителя в непосредственной близости от первичного пучка. Это обеспечивало высокую эффективность регистрации ${}^3\text{He}$ и позволило достичь рекордного соотношения сигнал/фон.

В ходе экспериментов с применением установки “мечения”, созданной на основе ППД-модуля, возникла необходимость усовершенствовать методику изготовления HPGe-детекторов, разработать метод определения их геометрических параметров и оптимизировать электронную систему установки.

Цель работы

Основной целью работы являлось создание низкофоновой триггерной системы на основе HPGe-спектрометра для исследования распадов η -мезонов на ускорительном комплексе CELSIUS/WASA.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка метода “мечения” η -мезонов вблизи порога реакции $p_d \rightarrow {}^3\text{He}\eta$.

2. Разработка специального метода защиты поверхности HPGe-детекторов для их надежной долговременной эксплуатации в ускорительных экспериментах.

3. Разработка метода измерения толщин чувствительных и нечувствительных областей HPGe-детекторов с помощью пучков частиц и γ -, α -источников.

4. Разработка электронных систем для обработки сигналов наносекундной длительности, реализованных на базе программируемых логических интегральных схем. Создание триггерного устройства для отбора событий, отвечающих рождению η -мезонов.

Научная новизна

1. Впервые разработана и реализована система “мечения” η -мезонов с рекордным соотношением сигнал/фон 72:1.

2. Впервые на основе использования метанола создана методика защиты р-п-переходов HPGe-ППД от внешней среды, что обеспечило их надежную работу в течение большого числа длительных ускорительных сеансов.

3. При создании триггерной системы были впервые внедрены методы обобщенного описания устройств для обработки сигналов наносекундной длительности.

Практическая значимость

Созданная система “мечения” обеспечила набор статистики распадов η -мезонов с рекордным соотношением сигнал/фон. Экспериментальная информация, полученная с использованием системы “мечения”, позволила устано-

вить новые ограничения на величины относительной вероятности распадов $\eta \rightarrow e^+e^-e^+e^-$, $\eta \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$ и уточнить данные о распределении инвариантных масс для распадов $\eta \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$, $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-e^+e^-$, $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$.

Разработанные методы защиты HPGe-детекторов и определения их геометрических параметров используются в спектрометрах для регистрации заряженных частиц на ускорителях и поиска редких процессов в подземных низкофоновых лабораториях. Предложенный подход к созданию модулей наносекундной электроники на основе программируемых микросхем может найти широкое применение в ядерно-физическом эксперименте.

Положения и результаты, выносимые на защиту

1. Система “мечения” мезонов на основе ППД-модуля, созданная для эффективного выделения событий рождения η -мезонов в реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}X$ и обладающая высоким энергетическим разрешением.
2. Методы измерения геометрических параметров HPGe-детекторов и защиты их чувствительной поверхности от внешних воздействий.
3. Многоканальное триггерное устройство наносекундного диапазона на основе программируемых микросхем для систем отбора событий в эксперименте.

Достоверность положений и выводов

Достоверность результатов по системе “мечения” мезонов основывается на совпадении измеренных параметров установки с модельными расчетами и данными других экспериментов. Обоснованность результатов по совершенствованию методики изготовления детекторов, измерению их геометрических параметров и модернизации электроники обеспечивается большой статистикой измерений, современными аппаратурными средствами и программным обеспечением, воспроизводимостью характеристик ППД и параметров электроники, как в лабораторных условиях, так и на пучках частиц.

Вклад автора

Автор выполнил численное моделирование с целью определения расчетных параметров различных систем “мечения”, активно участвовал в изготовлении, тестировании HPGe-детекторов и создании спектрометра на их основе, в подготовке и проведении измерений на ускорителе CELSIUS, в обработке и анализе экспериментальных результатов. Автор внес определяющий вклад в разработку и создание триггерного устройства на основе программируемых микросхем, в апробацию результатов исследования и подготовку основных публикаций по выполненной работе.

Апробация работы

Результаты исследований представлялись и обсуждались на семинарах в НИЯУ МИФИ, ОИЯИ (Дубна), ИТЭФ (Москва), Сведбергской лаборатории (Упсала), докладывались на международных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (ЯДРО-2006, Саров, ЯДРО-2010, С-Петербург), на научных сессиях НИЯУ МИФИ (2005-2009), конференциях

НОЦ Минобрнауки–CRDF (С-Петербург 2006, Пермь 2007, Нижний Новгород 2008). Диссертационная работа была поддержана: совместным проектом Минобрнауки РФ и CRDF (№ MS-011-23, 2004–2008гг.); проектом в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ГК №П618, 2009–2010гг.).

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 11 печатных работах, из них 4 статьи в журнале «Приборы и техника эксперимента», входящим в перечень ВАК РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 121 страницу, включая 50 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 94 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность и новизна научной проблемы, изучению которой посвящена работа. Изложены цель и метод исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится сравнительный анализ реакций и экспериментальных установок, использованных для изучения распадов η -мезонов, обосновываются причины выбора реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$ для “мечения” η -мезонов на установке WASA.

Для экспериментального поиска редких распадов η -мезонов необходимо: выбрать реакцию с достаточно большим сечением образования η -мезонов и минимальным уровнем физического фона; использовать высокоинтенсивный пучок первичных частиц с высоким импульсным разрешением; создать экспериментальную установку, адекватную выбранной реакции. Анализ проведенных экспериментов показал, что в исследованиях распадов η -мезонов наиболее часто используют реакции $pp \rightarrow p\eta$ и $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$.

Для надежного выделения η -мезона в трехчастичной реакции $pp \rightarrow p\eta$ ($\sigma \sim 10$ мкб) требуется идентифицировать два протона и точно определить их импульс и энергию. Угол разлета протонов относительно пучка может варьироваться в широком диапазоне, что приводит к необходимости использовать установку с 4 π геометрией и детально учитывать аппаратурные погрешности. Отметим заметный вклад от фоновых событий в этом подходе.

Двухчастичная реакция $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$, несмотря на меньшее сечение ($\sigma \sim 0.4$ мкб), обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с реакцией $pp \rightarrow p\eta$. Кинематический анализ этой реакции показывает, что ядра ${}^3\text{He}$, образовавшиеся вблизи порога рождения, будут двигаться под малыми углами к оси первичного пучка. Это позволяет реализовать систему “мечения” на основе компактного детекторного модуля. Подобный подход был реализован

нами на установке WASA с помощью магнитной системы накопительного кольца CELSIUS и узкоапертурного ППД-спектрометра. Спектрометрический сигнал можно использовать для выделения событий рождения η -мезона в режиме “on-line”.

Результаты измерения сечения реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$ [4] показывают его очень быстрый рост вблизи порога, в то время как сечения фоновых реакций ($pd \rightarrow {}^3\text{He}\pi^0$, $pd \rightarrow {}^3\text{He}\pi^+\pi^-$, $pd \rightarrow {}^3\text{He}\pi^+\pi^-\pi^0$, $pd \rightarrow {}^3\text{He}\pi^+\pi^-\gamma$) практически постоянны в этом энергетическом диапазоне [5]. Отношение сигнал/фон достигает очень большой величины $\sim 100:1$, существенно превышающее аналогичные величины для других реакций образования η -мезонов. Отметим уникальную возможность измерения уровня физического фона при понижении энергии протонов на 1–2 МэВ ниже порога реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$.

Впервые резкое увеличение сечения реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$ вблизи порога было обнаружено на ускорителе SATURNE [4]. В этом эксперименте также были определены характеристики установки “мечения” мезонов [6], основным элементом которой являлся магнитный спектрометр SPES II. Было показано, что соотношение сигнал/фон в этом эксперименте составляет 12:1.

Во второй главе представлен разработанный автором подход к выбору оптимальной системы “мечения” на основе реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$ для установки WASA. Дано описание комплекса программ, использованного для оптимизации детектирующей части установки. Приводятся результаты эксперимента, выполненного на CELSIUS для определения основных характеристик созданной системы “мечения”.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Протонный пучок взаимодействует с корпускулярной дейтериевой мишенью внутри установки WASA. Ядра ${}^3\text{He}$ из реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$, образующиеся под малыми углами относительно направления первичного пучка в лабораторной системе, регистрируются узкоапертурным спектрометром.

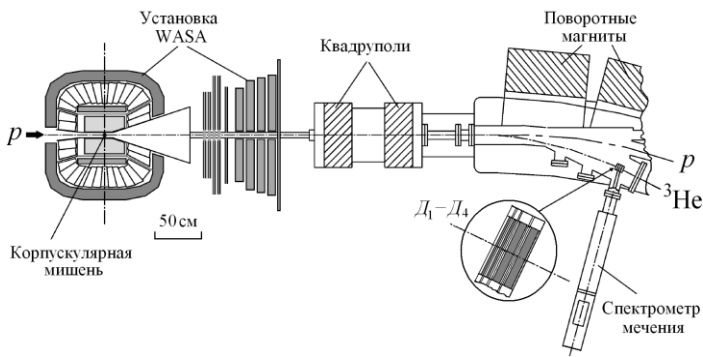


Рис. 1. Схема экспериментальной установки на ускорителе CELSIUS

Разработанная установка использует в качестве магнитного сепаратора элементы накопительного кольца CELSIUS и регистрирующий модуль, который может быть укомплектован полупроводниковыми (ППД) или сцинтилляционными детекторами. Конструкция ускорителя допускает установку спектрометра мечения как внутри вакуумного объема ускорителя, так и вне камеры ускорителя в измерительном зале.

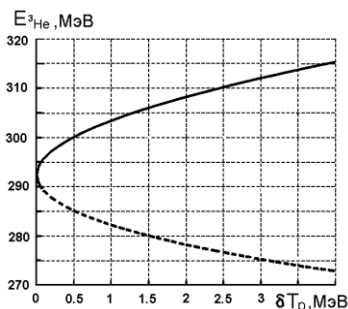


Рис. 2. Диапазон регистрируемых энергий ${}^3\text{He}$, образующихся в реакции $\text{pd} \rightarrow {}^3\text{He}\eta$, в зависимости от энергии протонов над порогом δT_p .

Пороговая энергия реакции $\text{pd} \rightarrow {}^3\text{He}\eta$ составляет $E_p^{\text{пор}} = 892$ МэВ. Выполненный кинематический анализ показал, что диапазон регистрируемых энергий ${}^3\text{He}$ зависит от энергии протонов (рис. 2). Так, например, для $E_p = 893.5$ МэВ этот диапазон составляет $280 \text{ МэВ} \leq E_{3\text{He}} \leq 307 \text{ МэВ}$.

В работе было выполнено численное моделирование прохождения частиц через магнитную систему и ионопровод ускорителя для определения эффективности регистрации установки, ее положения и оптимальных параметров работы отклоняющих магнитов. Моделирование производилось с помощью специально разработанного программного обеспечения

на основе библиотеки “The TURTLE with MAD input” версии v.1.6.

С целью оптимизации “мечения” η -мезонов программа моделирования была использована для сравнения систем “мечения” на основе различных детекторов, а также для выбора оптимального положения ППД-спектрометра в камере ускорителя. В частности, были исследованы возможности применения спектрометра, укомплектованного ППД на основе кремния и HPGe, а также установки, состоящей из сцинтилляционных детекторов (CsI).

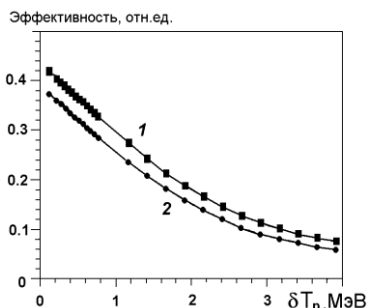


Рис. 3. Зависимость эффективности регистрации CsI-модуля (1) и ППД-модуля (2) от энергии протонов над порогом δT_p .

Конструкция ускорительного кольца позволяет установить ППД-модуль (рабочая площадь $60 \times 40 \text{ мм}^2$) в одном из трех возможных мест («портов») внутри ускорительной камеры. Установка CsI-модуля (площадь $110 \times 110 \text{ мм}^2$) возможна лишь в одном положении – за стенкой ускорительного отвода.

В результате моделирования был найден улучшенный вариант настроек квадрупольных магнитов ускорителя (улучшенная фокусировка), который позволил более чем в 3 раза увеличить скорость набора полезных событий при

использовании ППД-модуля. Для случая улучшенной фокусировки расчеты показали, что ППД-модуль, имея меньшую рабочую площадь, обладает эффективностью регистрации сравнимой с установкой на основе сцинтилляторов (рис. 3). Зависимости, показанные на рис. 3, рассчитывались для CsI-модуля и ППД-спектрометра, расположенных за ускорительным отводом и в «порту» №3 соответственно. Важно отметить, что энергетическое разрешение ППД-спектрометра при регистрации ядер ${}^3\text{He}$ с энергией ~ 300 МэВ более чем в 10 раз лучше разрешения CsI-модуля.

В качестве детектирующего модуля системы «мечения» был выбран ППД-спектрометр, который располагался в «порту» №3. Этот выбор обусловлен значительным уменьшением фоновых частиц при удалении детекторов от первичного пучка. Моделирование показало, что число фоновых частиц в «порту» №3 в ~ 30 раз меньше по сравнению с «портом» №1. Ослабление радиационной нагрузки позволяет добиться временной стабильности работы ППД-модуля во время длительных сеансов. Расчеты показали, что максимум скорости счета ядер ${}^3\text{He}$ достигается для энергии протонов выше порога $\delta T_p \cong 1$ МэВ. Это значение соответствует $E_p \cong 893$ МэВ.

Также были получены расчетные значения вкладов различных факторов в разрешение по недостающей массе – δMM . Моделирование выполнялось для различных значений импульсного разрешения пучка $\Delta p/p$ и энергетического разрешения ΔE системы «мечения». Было установлено, что вклад в δMM от разрешения ППД-модуля незначителен. Например, при $\Delta E = 1.5$ МэВ он составляет 0.3 МэВ. Однако импульсное разрешение пучка накладывает жесткое ограничение на величину δMM , так, например, при $\Delta p/p \sim 2 \cdot 10^{-3}$ значение δMM составляет ~ 1 МэВ. Следовательно, для проведения эксперимента следует использовать пучок с $\Delta p/p \leq 0.2$ %.

Тестирование и определение параметров системы «мечения» было проведено на ускорителе CELSIUS в рамках эксперимента CA-64. Одновременно с решением этой задачи проверялась работа установки WASA. Созданная система выдавала триггерный сигнал для запуска WASA, которая регистрировала частицы от распада η -мезонов.

ППД-модуль из Si- и HPGe-детекторов, охлажденных до температуры жидкого азота, был установлен в области второго поворотного магнита («порт» №3) на расстоянии 6.6 м от мишени. Размеры модуля были ограничены диаметром проходного отверстия вакуумного ввода (100 мм) в камеру кольца. Модуль был закреплен на специальной консоли автоматизированной системы перемещения, которая обеспечивала его линейное движение перпендикулярно пучку. Для предохранения детекторов в момент формирования и сброса первичного пучка работа системы перемещения была синхронизирована с циклом ускорителя. Установка обеспечивала линейный ход до 650 мм с точностью ≤ 0.1 мм и максимальной скоростью 30 мм/с. Для регистрации ${}^3\text{He}$ из реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}n$ модуль в момент измерений выдвигался на расстояние 213 мм от пучка протонов.

Измерения выполнялись на пучке протонов с $E \sim 893$ МэВ и $\Delta p/p \sim 6 \cdot 10^{-4}$. Система корпускулярной мишени создавала дейтериевые замороженные «капли» $\varnothing \sim 20$ мкм. Светимость в течение сеанса составила $\sim 4 \cdot 10^{30}$ см⁻²·с⁻¹.

Детектирующий модуль состоял из 2-х тонких кремниевых D_1 – D_2 (толщиной 1 мм и 0.3 мм, рабочей площадью 60×40 мм²) и двух толстых HPGe-детекторов D_3 – D_4 (толщиной 15.8 мм и 13.6 мм, $\varnothing = 60$ мм). Детекторы D_1 – D_2 использовались в качестве ΔE -детекторов для идентификации частиц. Ядра ${}^3\text{He}$ из реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}n$ останавливались в толстых детекторах D_3 – D_4 , обеспечивали диапазон регистрации до 400 МэВ. В условиях эксперимента энергетическое разрешение модуля составляло ~ 1.2 МэВ для ${}^3\text{He}$ с $E \sim 300$ МэВ.

Энергия заряженных частиц определялась суммированием потерь энергии в детекторах. Идентификация частиц и отбраковка событий с нарушением зависимости энергия–ионизационные потери осуществлялась по энергопотерям в детекторах D_1 – D_4 с помощью критерия χ^2 .

Электронная система установки «мечения» комплектовалась спектрометрической электроникой, системами быстрой логики и контроля электронных каналов, а также блоком управления режимами работы установки.

Сигналы с первого HPGe-детектора D_3 использовались в качестве триггера для системы сбора данных установки WASA. Время пролета ядер ${}^3\text{He}$ от мишени до модуля составляло 40 нс. Для уменьшения времени формирования быстрого триггера в схеме использовался обычный пороговый дискриминатор. При пороге запуска ≈ 60 МэВ доля сигналов триггера, соответствующих ядрам ${}^3\text{He}$ из реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}n$, составила около 10%. В систему сбора информации установки WASA передавался идентификационный код события, позволяющий синхронизировать данные в процессе обработки.

Определение параметров системы «мечения» выполнялось на этапе обработки и анализа полученных данных. На рис. 4 показаны спектры потерь энергии, зарегистрированные ППД. Спектры были получены для частиц,

у которых сигнал с детектора D_3 превосходил порог дискриминатора ≈ 60 МэВ.

В спектре для детектора D_1 (рис. 4а) отчетливо видны пики, соответствующие потерям энергии p , d и ${}^3\text{He}$. Разделение частиц в детекторе D_2 из-за его меньшей толщины несколько хуже. Часть ядер ${}^3\text{He}$ из реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}n$ останавливаются в детекторе D_3 . Из-за узкого энергетического интервала этих частиц на конце спектра D_3 наблюдается пик в области выше 277 МэВ (рис. 4в).

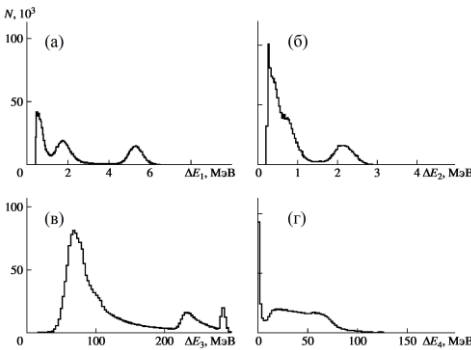


Рис. 4. Спектры потерь энергии частиц в детекторах D_1 – D_4 (а–г)

На первом этапе для выделения ядер ${}^3\text{He}$ использован отбор событий, по которому потери энергии в детекторах D_1 и D_2 удовлетворяют условиям: $4 \text{ МэВ} < \Delta E_1 < 7 \text{ МэВ}$ и $1.4 \text{ МэВ} < \Delta E_2 < 3 \text{ МэВ}$. Соответствующий энергетический спектр ядер ${}^3\text{He}$ показан на рис. 5а. Пик в области 277–307 МэВ обусловлен реакцией $pd \rightarrow {}^3\text{He}n$. Протяженный «хвост» в области низких энергий (~15% от всех событий) образован событиями, искаженными ядерными взаимодействиями, частицами, проходящими через детектор D_3 без регистрации детектором D_4 , а также фоном от протонов и дейтронов.

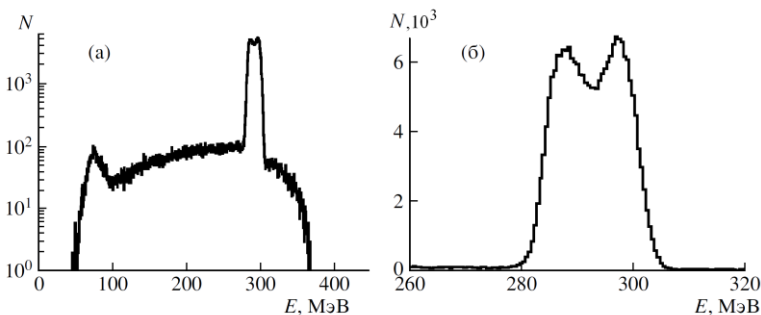


Рис. 5. Энергетические спектры ${}^3\text{He}$ из реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}n$ в логарифмическом (а) и линейном (б) масштабе. Отбор событий с ограничениями по порогам на D_1 и D_2 .

На рис. 5б показан спектр ${}^3\text{He}$ из реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}n$ в линейном масштабе. Два усиления по краям распределения соответствуют ядрам ${}^3\text{He}$, вылетающим соответственно вперед и назад в системе центра масс. Ширина распределения определяется, в основном, значением энергии пучка, а его форма зависит как от импульсного разрешения пучка, так и от энергетического разрешения ППД-модуля.

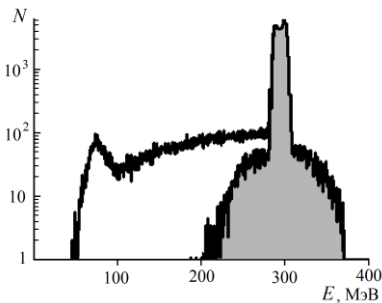


Рис. 6. Энергетические спектры ${}^3\text{He}$: отбор событий с ограничениями по порогам на D_1 и D_2 (светлая + серая области) и отбор по критерию χ^2 (серая область).

На втором этапе анализировалось искажение сигналов из-за краевых эффектов и ядерных взаимодействий ядер ${}^3\text{He}$ с веществом детекторов D_3 и D_4 . Использование критерия χ^2 приводит к дополнительной отбраковке 23% событий. Энергетические спектры ядер ${}^3\text{He}$, полученные с использованием обоих критериев, представлены на рис. 6.

Величина отношения сигнал/фон для обоих способов отбора событий показана на рис. 7. Эта величина определялась как отношение числа событий над и под фоновой подложкой

в соответствующем энергетическом интервале. Интервал 285–300 МэВ на обоих рисунках определяет область пика от реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$ при энергии пучка 892.4 МэВ. Вследствие конечного разрешения пучка и суммарного разрешения детекторов, отношение сигнал/фон во всей области пика уменьшается до значений 40:1 (отбор по порогам) и 72:1 (критерий χ^2).

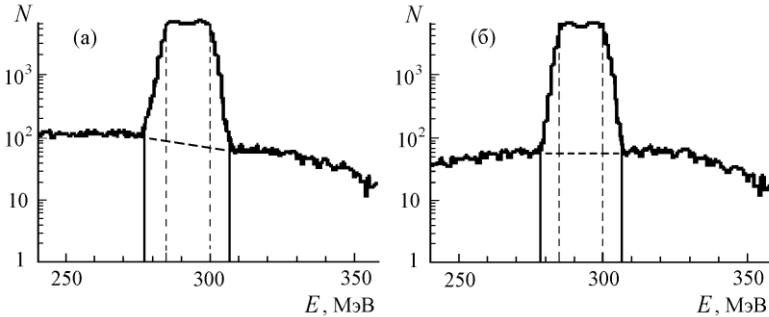


Рис. 7. Отношение сигнал/фон, определенное по энергетическим спектрам, в случае отбора с ограничениями по порогам на детекторах D_1 и D_2 (а) и с использованием отбора по критерию χ^2 (б).

Таким образом, продемонстрирована экспериментальная возможность создания простого триггера для реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$.

События, отобранные по критерию χ^2 , были использованы для определения энергии и импульсного разрешения протонного пучка. С этой целью было выполнено описание экспериментального распределения

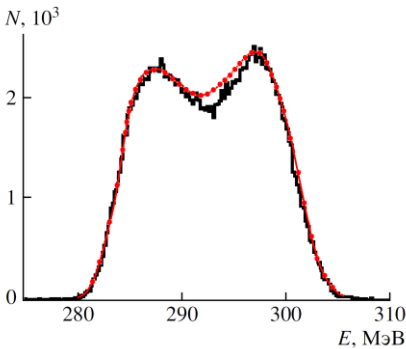


Рис. 8. Результаты подгонки спектра ${}^3\text{He}$ из реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$ (гистограмма) модельной зависимостью (плавная кривая).

программой численного моделирования эксперимента. В качестве свободных параметров моделирования были выбраны три параметра: энергия, импульсное разрешение пучка и расстояние между модулем и первичным пучком.

Результат подгонки представлен на рис. 8. Видно хорошее согласие между экспериментальным и расчетным распределениями. Наибольший вклад в погрешность определения энергии пучка вносит неопределенность значения массы η -мезона.

В предположении, что $m_{\eta} = 547.75 \pm 0.12 \text{ МэВ}/c^2$, энергия и импульсное разрешение пучка составили: $E_p = 892.41 \pm 0.27 \text{ МэВ}$ и $\Delta p/p = (6.10 \pm 0.05) \cdot 10^{-4}$. Отметим, что эти величины совпали с данными ускорительного отдела CELSIUS, которые были предоставлены по окончанию сеанса.

Созданная установка “мечения” мезонов использовалась в экспериментах, где были получены данные о характеристиках известных распадов η -мезонов ($\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$, $\pi^0 \pi^0 \pi^0$, $\pi^+ \pi^- \pi^0$) и установлены новые ограничения на вероятности редких распадов η -мезонов ($\eta \rightarrow e^+ e^- e^+ e^-$, $\mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$).

В третьей главе описываются разработанные методы определения геометрических параметров HPGe-детекторов и защиты их чувствительной поверхности от внешних воздействий.

В ППД-модулях для спектрометрии заряженных частиц, наряду с такими параметрами, как энергетическое разрешение, рабочее напряжение, необходимо знать точные геометрические размеры рабочей области детекторов. ППД-модули комплектуются различными типами HPGe-детекторов. Полная толщина HPGe-детекторов (W) составляет 5–15 мм. Толщины «мертвых» слоев (w_{mc}) HPGe-ППД, в зависимости от методов их изготовления, могут составлять ~ 700 мкм (метод диффузии лития) и ~ 0.1 мкм (метод ионной имплантации). Для идентификации частицы и восстановления ее энергии необходимо знание толщин чувствительных и нечувствительных областей. В работе проанализированы недостатки известных способов измерения геометрических параметров HPGe-ППД и представлена разработанная методика, позволяющая просто и оперативно определять указанные параметры.

В соответствии с разработанной методикой, измерения «мертвых» слоев и полных толщин HPGe-ППД, изготовленных методом диффузии лития, выполнялись с помощью калиброванных по толщине Ge-фильтров и γ -источников ^{241}Am и ^{57}Co соответственно с $E_{\gamma} = 60 \text{ кэВ}$ и 122 кэВ (рис. 9).

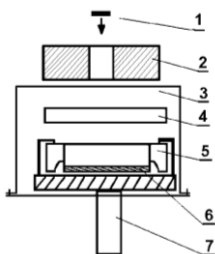


Рис. 9. Схема измерений геометрических параметров HPGe-ППД с помощью γ -источников. 1 – источник, 2 – коллиматор, 3 – вакуумный объем кристата, 4 – Ge-фильтр, 5 – HPGe-ППД, 6 – «мертвый» слой ППД, 7 – хладопровод.

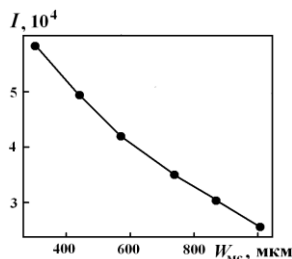


Рис. 10. Зависимость числа событий под γ -пиком ^{241}Am ($E_{\gamma} = 60 \text{ кэВ}$) от толщины Ge-фильтра.

В такой постановке опыта число событий под γ -пиком, измеренных HPGe-ППД, с высокой точностью зависит от толщины фильтра. Для примера на рис. 10 показана калибровочная кривая, измеренная с помощью источника ^{241}Am и набора фильтров.

Для HPGe-ППД с «мертвыми» слоями ~ 0.1 мкм глубина их залегания определялась по положению α -пика при облучении ППД с обеих сторон.

В реальном эксперименте ППД-модуль, часто регистрируют частицы с различными массами и энергиями. В таких условиях через каждый ППД проходит значительное количество частиц с пробегом, близким к толщине чувствительной области, и, соответственно, максимальным энерговыделением.

На рис. 11а показан спектр энергопотерь частиц в первом HPGe-детекторе, полученный в одном из экспериментов на ускорителе CELSIUS. Хорошо выделены участки спектра с границами, соответствующими максимальному энерговыделению ($E_{\text{макс}}$) для протонов, дейтронов и тритонов. Распределение, полученное после дифференцирования этого спектра, показано на рис. 11б. Отметим, что положение пиков соответствует ступенькам на рис. 11а. Полученные значения $E_{\text{макс}}$ позволяют с помощью пробегной кривой $R(E)$ определить толщину чувствительного слоя $W_{\text{ч0}}$ детектора. Результаты определения толщины «мертвых» слоев с помощью γ -источника согласуются с оценками, полученными по границам максимального энерговыделения, с точностью ~ 50 мкм, что удовлетворяет требованиям обработки экспериментальных данных.

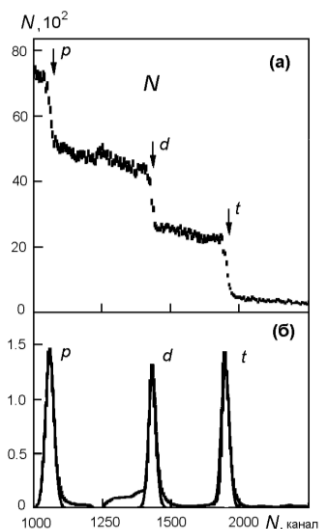


Рис. 11. а – энергетический спектр частиц, зарегистрированных первым HPGe-детектором ППД-модуля; б – спектр, полученный дифференцированием верхнего распределения.

Надежность работы и стабильность параметров HPGe-ППД, которые используются на ускорителях, определяются их конструктивным исполнением, технологией изготовления и условиями работы. Параметры каждого детектора вводятся в программу обработки данных. Следовательно, выход из строя даже одного ППД может привести к невозможной потере информации. В ходе подготовки и проведения ускорительных экспериментов возникает необходимость в переупаковке ППД-модуля, что требует многократного снижения и повышения температуры (термоциклов) детекторной сборки. Для

стабильной работы НРGe-ППД в таких условиях необходимо обеспечить защиту их чувствительной поверхности специальными покрытиями.

Для такой защиты, как правило, использовались тонкие пленки окиси кремния или аморфного германия, которые создаются на поверхности ППД термическим распылением в вакууме. В ходе ускорительных экспериментов с использованием НРGe-спектрометров было установлено, что после 2–3 термоциклов параметры НРGe-ППД заметно ухудшаются. В работе для решения этой проблемы был разработан способ формирования защитной окисной пленки на поверхности НРGe-детекторов с использованием метанола.

Свойства окисных пленок, полученных путем обработки германия в метаноле, проверялись на четырех НРGe-ППД, для которых напряжение полного обеднения $U_0 = 270$ В. Детекторы изготовлялись по традиционной технологии, на последней стадии которой образцы обрабатываются в смеси кислот. После травления один образец (№1) промывали стандартным способом с помощью деионизованной воды, а три других образца (№2–№4) по окончании травления сразу заливали метиловым спиртом. Время выдержки в метаноле составляло 1–3 мин. Перед исследованием влияния оксидной пассивации на параметры ППД было измерено исходное энергетическое разрешение, которое составило $\Delta E \approx 170$ эВ для $E_\gamma = 5.9$ кэВ.

В работе исследовалось влияние погружения в жидкий азот на качество детекторов, изготовленных по стандартной и усовершенствованной технологиям. Погружение проводилось без капсулирования детекторов. На рис.12 представлены исходная и конечная вольт-амперные характеристики (ВАХ) детектора №1. Видно, что после первого и второго погружения диапазон рабочих напряжений уменьшается соответственно до 300 и 250 В.

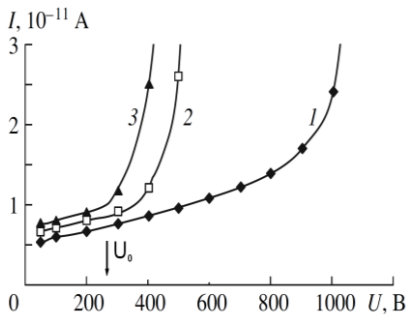


Рис. 12. Вольт-амперные характеристики ППД №1. 1 — исходная зависимость, 2, 3 — после однократного и 2-х кратного погружения в жидкий азот.

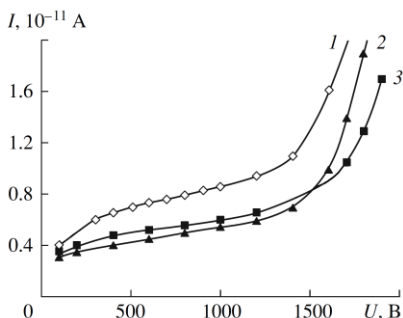


Рис. 13. Вольт-амперные характеристики ППД №3, полученные: 1 — до пассивации, 2 — после пассивации, 3 — после 10-кратного погружения в жидкий азот.

Качество работы ППД №2–№4 проверялось при многократном погружении в жидкий азот. На рис.13 показаны ВАХ детектора №3 после этих операций. Видно, что значение обратного тока и диапазон рабочих напряжений детектора с защитным покрытием после различных внешних воздействий изменяются незначительно, при этом разрешение ППД с окисным покрытием совпало с исходным значением.

Таким образом, полученное окисное покрытие позволяет надежно защитить поверхность НРGe-ППД от загрязнений, что дает возможность эксплуатировать их при больших перенапряжениях с постоянными значениями параметров.

Свойства поверхности монокристаллов НРGe с пассивацией и без нее исследовались с помощью метода комбинационного рассеяния света (рамановское излучение). Анализ рамановского спектра, т.е. сдвига излучения по частоте, позволяет определить собственные частоты колебаний молекул рассеивающего вещества, что дает информацию о его химическом составе и структуре. Рамановские спектры регистрировались в диапазоне обратных длин волн $150\text{--}800\text{ см}^{-1}$ спектрометром ALMEGA XR, который обеспечивал сканирование поверхности лазерным пучком диаметром 1 мкм при длине волны возбуждающего излучения 532 нм. По измеренному спектру определялось положение отдельных пиков, и идентифицировались соответствующие химические связи.

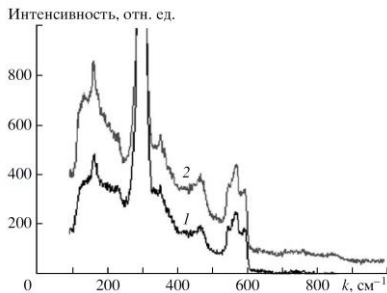


Рис. 14. Рамановские спектры поверхности НРGe: 1 – до пассивации, 2 – после пассивации

Анализ спектров показал, что толщина полученной оксидной пленки составляет ~ 0.1 мкм.

Четвертая глава посвящена разработке и созданию триггера первого уровня на основе программируемых логических интегральных схем типа программируемая пользователем вентильная матрица (ППВМ) [7,8]. В главе представлен краткий обзор использования ППВМ в ядерно-физическом эксперименте, рассмотрены особенности использования этих микросхем для

создания триггера первого уровня как в синхронном, так и асинхронном режимах, предложены и реализованы схемотехнические решения для построения различных модулей, работающих под управлением встроенного в микросхему универсального процессора.

В ходе экспериментальных исследований с помощью установки “мечения” возникла необходимость в модернизации ее электроники на основе современной элементной базы. Перспективным способом решения этой проблемы является использование микросхем ППВМ. Возможность многократного перепрограммирования таких устройств позволяет создавать на их основе гибкие и функционально сложные системы на одной микросхеме.

Модернизация электронной системы была направлена на упрощение быстрой электроники и создание универсального устройства для обработки сигналов с длительностью от 10 нс, способного работать под управлением персонального компьютера через локальную сеть. Автором было найдено решение, позволяющее быстро создавать триггерные устройства для решения задач конкретного эксперимента. Размещение этого устройства на элементах одной ППВМ повышает надежность настройки и работы.

Электронные модули разрабатывались на основе микросхемы Stratix фирмы Altera (США). В качестве встраиваемого процессора использовался модуль Altera NIOS II, а в качестве САПР применялся Altera Quartus.

Использование программируемых микросхем предполагает формирование входных сигналов по амплитуде. Эта задача решается с помощью внешних дискриминаторов с точной временной привязкой. Использование входных дискриминаторов позволяет рассматривать представленную систему отбора событий в качестве универсальной и не зависящей от конкретного типа детекторов.

Схема созданного многоканального триггера наносекундного диапазона показана на рис. 15.

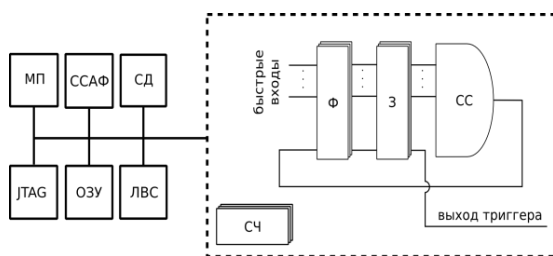


Рис. 15. Принципиальная схема электронных модулей триггера: МП – микропроцессор, ЖТАГ – отладочный порт, ССАФ – следящая система автоподстройки фазы (PLL), ОЗУ – оперативное запоминающее устройство, СД – блок светодиодной индикации, ЛВС – контроллер локальной вычислительной сети Ethernet, З – многоканальная управляемая задержка, Ф – многоканальный управляемый формирователь длительности, СС – многовходовая управляемая схема совпадений, СЧ – блок счетчиков.

В состав устройства входят управляемые многоканальные модули наносекундной электроники: линии задержки, формирователи длительности, схема совпадений и счетчики. Кроме этих модулей система содержит встроенный универсальный процессор NIOS II, контроллеры памяти, ввода-вывода и ряд других вспомогательных компонентов. Эти устройства используются для управления и контроля состояния наносекундных модулей. Управление модулями, а также взаимодействие устройства с внешним компьютером выполняется с помощью встроенного процессора NIOS II.

Разработанные модули предусматривают возможность программного управления с помощью встроенного процессора. Это обеспечивает два уровня конфигурирования системы. Первый уровень предполагает собственно разработку описания системы на языке Verilog с последующей ее реализацией на кристалле стандартными средствами САПР. Благодаря применению метода обобщенного описания цифровых устройств, возможно быстрое изменение таких структурных параметров, как максимальная длительность и шаг задержки, число каналов для многоканальных модулей и ряд других. По заданному описанию САПР автоматически создает требуемую конфигурацию наносекундных модулей. Параметризация значительно ускоряет процесс реализации конкретной системы, так как он фактически сводится к автоматическому масштабированию системы под конкретную задачу.

Второй уровень конфигурирования реализуется с помощью встроенного процессора, который позволяет изменять состояние программно-управляемых модулей в режиме реального времени. Например, можно настраивать работу схем совпадений, менять значения задержек, длительностей сигналов и т.п. Таким образом, первый уровень определяет общую функциональность системы, обусловленную требованиями конкретного эксперимента, а второй уровень служит для настройки параметров системы пользователем непосредственно во время работы устройства и не требует специальных знаний по программированию микросхем.

Для сопряжения триггера с РС была выбрана технология Ethernet стандарта 100BASE-T. На сетевом уровне использовался протокол IP, а в качестве протокола транспортного уровня был выбран UDP.

Модули наносекундной электроники разрабатывались в двух вариантах: синхронном и асинхронном. В первом случае изменение состояния устройства происходит строго в моменты, определяемые внешним генератором синхроимпульсов, а во втором случае схема переключается под действием внешних сигналов, не имеющих взаимной синхронизации.

Типичная частота генератора синхроимпульсов 100 МГц, поэтому точность задания длительности задержки и величина временного разброса фронтов сигналов («джиттер») в синхронном режиме ≥ 10 нс. Улучшение этого параметра возможно при использовании асинхронной схемотехники. В основе асинхронных модулей задержки и формирователя длительности лежит идея задержки сигнала при прохождении через цепочку логических буферов – устройств, выход которых всегда равен входу. Пропуская сигнал через все

ячейки или только через часть из них, можно добиться требуемой длительности задержки сигнала.

Временные измерения выполнялись с помощью прецизионного преобразователя время–код, соединенного с управляющим компьютером. В качестве источника входных сигналов использовался цифровой генератор. Максимальная частота, при которой обеспечивалась устойчивая работа системы с включенным в ее состав процессором NIOS II, составила 100 МГц.

На рис. 16 приведена измеренная зависимость времени задержки сигнала от номера шага управляемой задержки для одного из асинхронных каналов. Можно отметить малое значение шага изменения задержки ~ 0.45 нс. Для числа шагов задержки 128 диапазон ее изменения составил ~ 60 нс. Значение интегральной нелинейности $K_{\text{и}} = 4\%$. Следует отметить достаточно большое значение дифференциальной нелинейности $K_{\text{д}} = 8\%$, что объясняется различным числом промежуточных узлов между элементами задержки.

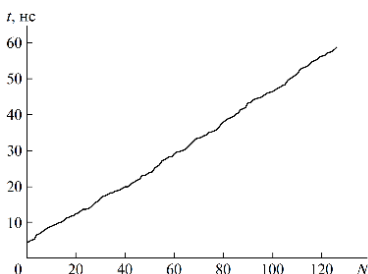


Рис.16. Зависимость величины задержки сигнала от номера шага асинхронной задержки.

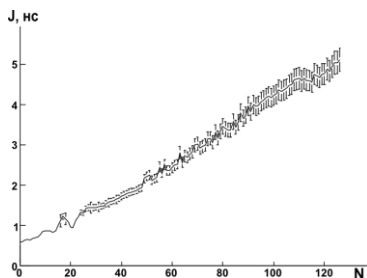


Рис.17. Зависимость величины неопределенности (разброса) длительности сигнала от номера шага асинхронной задержки.

На рис. 17 показана зависимость величины временного разброса выходного сигнала («джиттера») от номера шага. Видно, что разброс растет пропорционально длительности задержки и составляет $dT \sim 9\%$. Для сравнения, несколько лучшие параметры были получены для более простой микросхемы Cyclone – $dT \sim 2\%$. Различие связано со степенью разветвленности внутренних соединительных линий. Микросхема Cyclone обладает меньшей логической емкостью и малой площадью кристалла по сравнению с микросхемой Stratix.

Достоинство использования синхронных элементов – большой диапазон регулировки задержки и длительности, определяемый лишь объемом задействованной памяти. Для используемой микросхемы этот диапазон может достигать нескольких тысяч шагов (сотен микросекунд). Представляется перспективной разработка комбинированного решения, сочетающего в себе преимущества синхронного и асинхронного подходов – малое значение временного разброса выходного сигнала при большом диапазоне регулировки.

Исследования показали, что в случае применения такой системы в эксперименте достигается значительное сокращение времени на подготовку к измерениям. Кроме того, контроль счетов в режиме реального времени обеспечивает возможность автоматической сигнализации о нарушениях в системе отбора событий.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Разработана и создана система “мечения” η -мезонов на основе реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$. Основным регистрирующим элементом установки является многодетекторный полупроводниковый модуль. Созданная установка обеспечила выделение η -мезонов с рекордным соотношением сигнал/фон 72:1.
2. Разработана методика измерения толщин чувствительных и нечувствительных слоев HPGe-детекторов с помощью γ -, α -источников и пучков частиц. Разработанный подход позволяет определять толщины указанных слоев с точностью необходимой для обработки экспериментальных данных.
3. Впервые на основе использования метанола разработан способ формирования защитной окисной пленки на поверхности HPGe-детекторов. Полученное окисное покрытие надежно защищает p-n-переход от влияния окружающей среды и дает возможность стабильно эксплуатировать HPGe-детекторы при больших перенапряжениях без изменения токовых и спектрометрических характеристик.
4. Впервые разработано многоканальное триггерное устройство на основе микросхем программируемой логики для построения систем обработки сигналов (длительности ≥ 10 нс) в ядерно-физическом эксперименте. В состав устройства входят управляемые многоканальные модули наносекундной электроники: линии задержки, формирователи длительности, схема совпадений и счетчики. Созданное устройство обеспечивает настройку системы как на этапах подготовки, так и выполнения эксперимента, а также передачу информации на удаленный компьютер.

Результаты исследований опубликованы в следующих основных работах:

1. Bargholtz Chr., Geren L., Гребенев В.Н. ... Карпухин В.С. и др. Мечение η -мезонов вблизи порога реакции $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$ // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 4. С. 17-23.
2. Гуров Ю.Б., Исаков С.В., Карпухин В.С. и др. Измерение толщин нечувствительных слоев полупроводниковых детекторов // Приборы и техника эксперимента. 2008. №1. С. 67-71.
3. Гуров Ю.Б., Карпухин В.С., Розов С.В. и др. Пассивация HPGe-детекторов // Приборы и техника эксперимента. 2009. №1. С. 151-154.
4. Добротворский А.С., Карпухин В.С., Шафигуллин Р.Р. Прототип триггера наносекундного диапазона на основе П.Л.И.С. // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 6. С. 42-47.
5. Гуров Ю.Б., Карпухин В.С., Лаухин И.В. и др. Система мечения η -мезонов на основе реакции ${}^2\text{H}(p, {}^3\text{He})\eta$ // Науч. сессия МИФИ-2005. III конф. НОЦ CRDF «Фундаментальные исследования материи в экстремальных состояниях». Сб. науч. трудов. М., МИФИ. 2005. С.18-19.
6. Гуров Ю.Б., Карпухин В.С., Морохов П.В. и др. Измерение «мертвых» слоев планарных HPGe-детекторов // 56 Межд. конф. по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Сб. тезисов. РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров. 2006. С. 294-295.
7. Карпухин В.С., И.В. Лаухин, Р.Р. Шафигуллин Управление триггерными устройствами наносекундного диапазона на основе ПЛИС с использованием протоколов Ethernet и IP // Науч. сессия МИФИ-2007. V конф. НОЦ CRDF «Фундаментальные исследования материи в экстремальных состояниях». Сб. науч. трудов. М., МИФИ. 2007. С. 18.
8. Гуров Ю.Б., Карпухин В.С., Лаухин И.В. и др. Система мечения η -мезонов установки CELSIUS/ WASA // Науч. сессия МИФИ-2008. V конф. НОЦ CRDF «Фундаментальные исследования материи в экстремальных состояниях». Сб. науч. трудов. М., МИФИ. 2008. С. 10-11.
9. Карпухин В.С., Лаухин И.В., Шафигуллин Р.Р. Прототип многоканального триггерного устройства на основе ПЛИС // Науч. сессия МИФИ-2008. Секция автоматика, электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. науч. трудов. М., МИФИ. 2008. С. 91-92.
10. Карпухин В.С., Лаухин И.В., Шафигуллин Р.Р. Изучение вероятности распада $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$ // Науч. сессия МИФИ-2009. Сб. науч. трудов. М., НИЯУ МИФИ. Т. IV. С. 85-88.
11. Гребенев В.Н., Гуров Ю.Б., Карпухин В.С., Шафигуллин Р.Р. Определение импульсного распределения частиц в пучках накопительных колец // Науч. сессия МИФИ-2009. Аннотации докладов. М., МИФИ. 2009. Т. 2. С. 247.

Список цитируемой литературы:

1. *Gasser J. and Leutwyler H.* Chiral perturbation theory: expansions in the mass of the strange quark // Nucl. Phys. B. 1985. V.250. P. 465-476.
2. *Nakamura K. et al.* Review of Particle Physics // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2010. V.37. P. 075021.
3. *Bilger R. et al.* CELSIUS as an η -factory // Nucl. Phys. 1997. V.A626. P. 93-96.
4. *Berger J. et al.* Identification of the $dp \rightarrow {}^3\text{He}\eta$ reaction very near threshold: cross section and deuteron tensor analyzing power // Phys. Rev. Lett. 1988. V.61. P. 919-925.
5. *Mayer B. et al.* Reactions $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$ and $pd \rightarrow {}^3\text{He}\pi^+\pi^-$ near the η threshold // Phys. Rev. C. 1996. V.53. P. 2068-2076.
6. *Kessler R.S. et al.* Measurement of the branching ratio for the decay $\eta \rightarrow \mu^+\mu^-$ // Phys. Rev. Lett. 1993. V.70. P. 892-895.
7. *Karstens F., Trippel S.* Programmable trigger logic unit based on FPGA technology // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 2005. V.52. P. 1192-1195.
8. <http://www.altera.com>