

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
ИМ. Б.П. КОНСТАНТИНОВА**

---

На правах рукописи

**Васильев Александр Анатольевич**

УДК 539.126, 539.188

**Криогенные мишени в ядерно-физическом эксперименте**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Гатчина 2001**

Работа выполнена в Отделении физики высоких энергий  
Петербургского института ядерной физики им. Б.П.Константинова  
Российской Академии наук.

Научный руководитель: кандидат технических  
наук Н.Н. Чернов.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических  
наук, профессор В.А. Бурцев,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник М.Г. Горнов.

Ведущая организация: Институт экспериментальной и  
теоретической физики

Защита состоится "\_4\_" октября 2001 г. в \_11\_ часов на  
заседании диссертационного совета Д-002.115.01 в Петербургском  
институте ядерной физики им. Б.П.Константинова РАН по адресу:

188300, г. Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща, ПИЯФ РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПИЯФ РАН.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2001 г.

Ученый секретарь диссертационного совета:  
доктор физ.-мат. наук

И.А. Митропольский

## **1. Общая характеристика работы.**

Работа посвящена созданию и применению криогенных мишеней в экспериментах на пучках заряженных частиц в ПИЯФ<sup>1</sup> РАН, PSI<sup>2</sup> Швейцария, ИЯФ СО РАН, COSY<sup>3</sup> Германия в 1987-2000 годах.

**Основная цель работы.** Большое число современных экспериментов на пучках заряженных частиц проводится с использованием криогенных мишеней. Однако для каждого эксперимента мишени обладают специфическими характеристиками, определяемыми физической задачей эксперимента.

Можно выделить такие классы мишеней как:

- мишени на выведенных пучках, в которых исходный пучок разрушается мишенью;
- мишени на внутренних пучках, в которых исходный пучок в накопительном кольце многократно проходит сквозь мишень.

Мишени бывают:

- активные, в которых детектор вторичных частиц объединен с мишенью;
- пассивные, в которых задача мишени лишь образовать вторичные частицы, регистрируемые внешними (по отношению к мишени) детекторами.

Набор специфических характеристик мишеней таких как: температурные диапазоны работы; окна, применяемые в мишенях; давления и другие физические характеристики рабочих тел мишеней определяют технические решения при создании мишеней.

Условия использования мишеней на ускорителях определяются инфраструктурой самих ускорителей: условиями доступа к экспериментальным установкам, длительностью непрерывной работы и т.д.

Высокая стоимость ускорительного времени определяет основной приоритет при создании мишеней – минимизация потерь ускорительного времени, связанных с эксплуатацией мишеней.

Круглосуточная работа на ускорителях определяет требования к системам управления мишенями: мишени должны работать в полностью автоматическом режиме и все основные характеристики мишеней должны записываться параллельно с общим потоком физических данных.

---

<sup>1</sup> *Петербургский Институт Ядерной Физики. До 1993 года ЛИЯФ - Ленинградский Институт Ядерной Физики. В тексте используются оба названия.*

<sup>2</sup> *Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland*

<sup>3</sup> *COoler SYnchrotron*

Основная цель данной работы была в создании криогенных управляемых мишеней таких как:

- криогенная ионизационная камера. Активная мишень для использования на выведенном пучке  $m^-$  и изучения температурной зависимости мюонного катализа ядерного синтеза в газообразном  $D_2$ , в смесях  $D_2$  и  $H_2$  и в газообразном  $HD$ ;
- мишень для исследования характеристик магнитных материалов  $mSR$  методом. Пассивная мишень с тонкими окнами на выведенном пучке продольно поляризованных  $m^+$ ;
- газовая криогенная водородная мишень. Пассивная мишень молекулярного водорода на внутреннем пучке накопительного кольца электронного ускорителя;
- система формирования атомарной струи поляризованной водородно-дейтериевой газовой мишени. Пассивная газовая мишень на внутреннем поляризованном протонном пучке накопительного кольца.

К основным результатам работы относятся также:

- исследования макроскопических характеристик элементов, применяемых в криогенных мишенях;
- проведение экспериментов по метрологическому обеспечению криогенных мишеней;
- разработка и использование систем управления мишенями.

#### Актуальность работы.

Детальное измерение температурной зависимости скорости  $ddm^-$  катализа позволяет исследовать механизм резонансного образования мезомолекул, обзанный существованию слабосвязанного уровня. Такие измерения являются наиболее точным экспериментальным способом определения значения этого уровня, ввиду сильной зависимости скорости катализа от энергии уровня. Сравнение теоретического и экспериментального значений энергии слабосвязанного уровня дает возможность с очень высокой точностью (до  $10^{-6}$  от энергии связи) исследовать систему трех тел с кулоновским взаимодействием, какой является мезомолекула. Эта задача и задачи исследования температурных зависимостей мезокаталитического синтеза в других системах и сделали актуальной создание криогенной ионизационной камеры с системой управления термодинамическими параметрами.

Поляризованные  $m^+$  мезоны в  $mSR$ <sup>4</sup> методе являются своеобразным микроскопическим магнитным зондом и широко применяются для исследования магнитной структуры разнообразных материалов. С открытием новых, высокотемпературных сверхпроводников  $mSR$  метод стал уникальным методом изучения внутренней магнитной структуры на микроскопическом уровне. Процесс зарождения и развития сверхпроводящей фазы при изменении температуры при различных магнитных полях представляет особый интерес. Исследования высокотемпературных сверхпроводников  $mSR$  методом и породили необходимость создания криогенной системы. Исследования  $mSR$  методом на ускорителе – дорогостоящий процесс. Поэтому очень актуальным являлась предварительная аттестация сверхпроводящих образцов и измерение макроскопических характеристик. Для этого создавалась автоматизированная установка для исследования магнитных и кинетических характеристик высокотемпературных сверхпроводников и магнетиков.

Применение накопительных колец для заряженных частиц поставило задачу создания совершенно нового типа мишеней – внутренние мишени. Большая светимость эксперимента достигается за счет многократного прохождения пучка сквозь мишень. Особый интерес представляют собой газовые водородные или дейтериевые мишени. Такая мишень была создана для использования на НЭП (электронное накопительное кольцо в ИЯФ СО РАН). Увеличение плотности газовой мишени достигается за счет использования криогенной накопительной ячейки.

Возрастающий в ядерной физике и физике элементарных частиц интерес к изучению эффектов связанных с наличием спина требует создания установок для получения поляризованных атомарных пучков водорода и дейтерия. Несколько реакций с использованием поляризованного пучка и/или мишени было предложено исследовать с помощью спектрометра ANKE<sup>5</sup> на накопительном кольце COSY-Jülich. Будут исследованы: развал дейтрона  $\bar{p} + d \rightarrow p(0^\circ) + n$ ; эффекты  $p\Lambda$  взаимодействий в конечном состоянии  $\bar{p} + \bar{p} \rightarrow p + K^+ + \Lambda$ .

Элементом поляризованной газовой мишени является формирование холодной атомарной струи. Таким образом криогенная система формирования газовой струи и средства измерения профиля плотности

---

<sup>4</sup> *Muon Spin Rotation*

<sup>5</sup> *Apparatus for studies of Nucleon and Kaon Ejectiles*

данной струи являются начальным этапом создания поляризованной газовой мишени.

### Научная новизна работы.

- В диссертации описывается криогенная ионизационная камера, впервые созданная для изучения температурной зависимости мезокаталитического ядерного синтеза в газообразном  $D_2$ , в смесях  $D_2$  и  $H_2$  и в газообразном  $HD$  в диапазоне температур 30К – 400К. С помощью системы управления получена стабильность температуры лучше чем  $\pm 0.1$ К. Проведенная калибровка по давлению насыщенных паров  $D_2$  позволила гарантировать абсолютную точность измерения температуры лучше чем  $\pm 0.1$ К. Это позволило выполнить уникальные по точности измерения энергии слабосвязанного уровня для  $m^-$  в дейтерии.

Через анализ величины  $R = \frac{Y(^3He + n)}{Y(t + p)}$ , как функции температуры мы получили возможность контролировать состояние молекулы  $ddm$  в процессе мезокатализа.

- Создана установка для исследования магнитных характеристик материалов  $mSR$  методом в интервале температур 5-300К и магнитных полей до 0.15Т. В криостате впервые применены тонкие двухслойные окна из разнородных материалов при криогенных температурах, что более чем вдвое уменьшило эффективную толщину окон вдоль пучка по сравнению с металлическими окнами. Впервые для  $mSR$  криостатов применены многоразовые индиевые уплотнения, что значительно сократило потери ускорительного времени, связанные с заменой исследуемых образцов.

- Создана газовая криогенная водородно-дейтериевая мишень для внутреннего электронного пучка в накопительном кольце. Впервые криогенная системы охлаждения газовой ячейки и системы криогенной откачки мишень были совмещены на одной емкости с жидким гелием, что позволило получить высокую плотность (до  $10^{16}$  ядер/см<sup>2</sup>) мишени и вакуум  $10^{-6}$  мбар в кольце без дополнительных средств откачки. За счет подбора температуры для каждого потока водорода(дейтерия) система достигает максимума возможной плотности, когда давление в центре газовой ячейки приближается к давлению насыщенных паров над твердым водородом(дейтерием).

- Создана система формирования и измерения профиля холодной струи атомарного водорода(дейтерия). Впервые создана система

охлаждения сопла поляризованной газовой водородно-дейтериевой мишени на основе криогенной тепловой трубы. Для стабилизации температуры сопла, определяющего температуру струи, использовалась криогенная тепловая труба на He. Температура сопла стабилизировалась в интервале 40-300K. Для измерения профиля низкотемпературного атомарного водородно-дейтериевого пучка впервые создан "монитор потока атомарного водорода/дейтерия" на основе микро-проволочного двухкоординатного детектора. Впервые создана математическая модель детектора, которая и определила диаметры проволок и позволила добиться высокой чувствительности детектора. Разработана методика подготовки поверхности микропроволочного детектора, что позволило добиться воспроизводимости результатов не хуже 1%. Создан математический аппарат восстановления профиля потока атомов на основе измерения сопротивления проволок микропроволочного детектора.

**Научная и практическая ценность работы.** В работе описываются различные криогенные мишени с системами управления. При этом удастся выделить общий подход к построению криогенных мишеней для ядерно-физического эксперимента, когда

- физическая задача определяет особенности криогенной мишени;
- условия использования мишени определяют системы управления;
- структура мишени с системой управления определяет набор дополнительных экспериментов и исследований, необходимых для успешной подготовки мишеней, работающих на пучках заряженных частиц.

Комплексный подход к решению этих проблем и представлен на примере 4-х мишеней различных типов. С использованием первых двух мишеней (криогенная ионизационная камера и криостат для *mSR* исследований) выполнены целые серии завершенных экспериментов, опубликованные более чем в пятидесяти работах. Газовая мишень с молекулярным водородом успешно установлена на накопительном кольце и ведется подготовка экспериментов. Криогенная система формирования атомарной водородной (дейтериевой) струи установлена и испытана на источнике поляризованного водорода (дейтерия). Начало экспериментов с использованием поляризованного источника планируется в 2002 году. В настоящее время источник продемонстрировал самую большую в мире интенсивность поляризованного водорода.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на:

- Международном симпозиуме "Мюонный катализ-87", май 1987, Гатчина;
- Всесоюзной конференции "Криогеника-87", июнь 1987, г. Москва;
- XXV Всесоюзном совещании по физике низких температур, 1988 г., Ленинград;
- Международной конференции "Криогеника-90", Кошице, Чехословакия;
- 3-ей научно-технической конференции "Вакуумная наука и техника", 1996 г., Гурзуф;
- 7<sup>th</sup> Int. Workshop on Polarized Gas Targets and Polarized Beams, Urbana Illinois 1997;
- International Workshop on "Polarized Sources and Targets", Erlangen 1999.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения; 6 таблиц, 45 рисунков и списка литературы. Общий объем диссертации 142 страницы.

## 2. **Краткое содержание диссертации.**

**Введение** содержит формулировку основной цели работы и ее актуальность.

**Первая глава** содержит описание общих подходов для определения типа криогенных мишеней, используемых в экспериментах на пучках заряженных частиц. Описана специфика использования криогенных мишеней в условиях ускорителей [1]. Дано общее описание систем управления для криогенных мишеней.

**Вторая глава** содержит описание криогенной ионизационной камеры для исследования вероятности мезокаталитического синтеза.

Дальнейшим развитием возможностей созданной в ЛИЯФ методики регистрации заряженных продуктов  $dd$  – и  $dt$  – синтеза с помощью ионизационной камеры<sup>6</sup> явилась разработка установки по измерению температурной зависимости параметров мюонного катализа [2]. Такие измерения стали особенно актуальны после того, как в ЛИЯФ были проведены измерения основных констант процесса  $ddm$ -катализа при

---

<sup>6</sup> Д.В.Балин, А.А.Вробьев и др. Экспериментальный метод исследования мюонного катализа ядерного  $dd$ -синтеза. Препринт ЛИЯФ-964, Л., 1984, 54с.

комнатной температуре, давших новую информацию о скорости  $ddm$ -катализа, о коэффициенте прилипания  $V_{dd}$ , об отношении каналов  $dd$ -синтеза  $R = \frac{Y(^3He + n)}{Y(t + p)}$ <sup>7</sup>. Первые измерения температурной

зависимости  $R(T)$   $ddm$ -катализа были сделаны в ПИЯФ [3]. Подобные измерения могут быть проведены только методикой ионизационной камеры. При этом благодаря 100% эффективности, достигнутому высокому быстродействию и энергетическому разрешению, ионизационная камера, в отличие от методик, основанных на регистрации нейтронов синтеза, позволяет регистрировать последовательные акты катализа, вызванные одним мюоном. Это позволяет получать абсолютные значения скорости реакции, что исключительно важно для сравнения с предсказаниями теории.

Основу установки составляет ионизационная камера высокого давления, предназначенная для работы при температурах 25-400К. Ионизационная камера - активная мишень, т.е. камера одновременно является и мишенью и детектором, регистрирующим мюоны и заряженные продукты реакций синтеза, вызванные остановившимися в ней мюонами. При разработке криогенного варианта ионизационной камеры использовалась методика, отработанная при комнатной температуре. В новой установке появились такие отличительные параметры, как: высокое давления водорода (до 110 бар), высокое напряжения (до 50 кВ), высокий вакуума (лучше чем  $10^{-6}$  мбар) в охранном объеме, широкий интервал рабочих температур (25-400К). Набор таких параметров потребовал решения серьезных методических проблем. Наиболее серьезной оказалась задача конструирования самой камеры, имеющей съемную крышку с вмонтированным в нее высоковольтным керамическим вводом, специальным вводом для подачи напряжения на сетку и многотырьковый разъем для съема сигналов с анодов. Толщина стенок камеры выбиралась из прочностных соображений и обеспечивала эффективную остановку мюонов в газе камеры при входных импульсах мюонов  $Pm=58-63$  МэВ/с.

Для системы охлаждения был выбран принцип криостата проточного типа, в котором в качестве хладоагента используется жидкий гелий. Жидкий гелий подавался в теплообменники, расположенные на верхнем и нижнем фланцах камеры – наиболее массивных элементах системы. Там

---

<sup>7</sup> В.Р. Адыяевич et al. *Yad. Fiz.*, 1981. V.33. P.1167.

же располагались и датчики температуры Pt100<sup>8</sup>. В этих же теплообменниках располагались нагреватели для независимой стабилизации в них нужной температуры. Поток хладагента определяется давлением, стабилизируемым в сосуде Дьюара и электронным вентилем тонкой регулировки на выходе системы. Такая комбинация позволила реализовать двухконтурную систему регулирования температуры: с помощью нагревателей на теплообменниках осуществляется стабилизация температуры при любых потоках хладагента. Таким образом, физический эксперимент может начинаться практически сразу по достижению нужной температуры. В дальнейшем система с помощью электронного вентиля потока хладагента уменьшает поток жидкого гелия, сводя мощность нагревателей на теплообменниках практически к нулю. Процесс выхода на температуры стабилизации занимает 15-20 минут, оптимизация потока хладагента без нарушения режима стабилизации- 2-2.5 часа. Для регулирования выбраны два вложенных PID<sup>9</sup> закона регулирования. Система регулирования обеспечивает стабильность температуры  $\pm 0.1\text{K}$  во всем интервале температур (25-400K), несмотря на уменьшение чувствительности Pt100 при понижении температуры ниже 40K.

Система управления термодинамическими параметрами камеры пережила два поколения [4]. Первая система была построена на автономном микропроцессорном модуле, вторая - на контроллере, встраиваемом в персональный компьютер. Основной особенностью данных систем является полная гальваническая развязка экспериментальной установки, включая все сенсоры, от контроллера. Это особенно важно в условиях использования мишеней на ускорителях, где присутствуют высокий уровень помех и большие расстояния между мишенью и контролирующей аппаратурой. Все сигналы с датчиков преобразуются в частоту, которая и измеряется контроллером. Контроллер выдает сигналы с широтно-импульсной модуляцией, которые преобразуются в аналоговые (нагреватели на теплообменниках, регулировка потока хладагента).

Знание абсолютной температуры газа в криогенной ионизационной камере - одна из основных задач метрологического обеспечения установки. Все температурные датчики предварительно калибровались по давлению насыщенных паров различных газов. Особо следует отметить методику получения реперных точек на градуировочной кривой

---

<sup>8</sup> Платиновые микропроволочные датчики температуры открытого типа, имеющие сопротивление около 100 Ом при 0° С.

<sup>9</sup> *Proportional Integro-Differential* – пропорциональный интегро-дифференциальный закон регулирования.

$R_{Pt100}(T)$  с помощью тройных точек таких газов, как  $Ne$ ,  $N_2$  и  $CH_4$  [5]. Датчик помещался в сосуд с определенным газом. Сосуд охлаждался в криостате до температуры ниже тройной точки данного газа. Далее к сосуду подводился постоянный поток тепла такой, чтобы при медленном отопреве можно было гарантировать однородность температуры в сосуде. При непрерывной регистрации сопротивления датчика, как функции времени, наблюдается область стабильности сопротивления, соответствующая тройной точке. В это время происходит уменьшение объема твердой фазы газа без изменения температуры. Таким образом, только измеряя сопротивление датчика, мы можем сказать, какой температуре оно соответствует.

В реальных условиях погрешность измерения температуры определяется не только калибровкой датчиков, но и погрешностями измерительного тракта. Поэтому была проведена дополнительная низкотемпературная калибровка датчиков температуры в криогенной ионизационной камере с учетом измерительного тракта. Идея калибровки в процессе эксперимента состоит в одновременном измерении давления дейтерия в камере и температуры датчиков. Пока в камере газ, она работает при охлаждении как газовый термометр и зависимость давления от температуры определяется по закону  $P = nkT$  для идеального газа. В действительности применялся закон для реального газа, используя программное обеспечение [6]. При дальнейшем охлаждении система попадает на кривую давления насыщенных паров и закон резко меняется. Особенностью конденсационного термометра (в нашем случае вся камера) является то, что давление соответствует самой холодной точке системы – именно там происходит сжижение газа. Искусственно вводя небольшой градиент температур между верхним и нижним фланцем, удалось независимо отградуировать разные термометры сопротивления с абсолютной точностью  $\pm 0.1K$ . После всех калибровок и оптимизации программ управления погрешность стабилизации температуры и погрешность измерения температуры составляют  $\pm 0.2K$  во всем диапазоне температур 25–400K.

Элементы мишени и эксперименты с использованием мишени описаны также в [7], [8], [9].

**Третья глава** содержит описание криогенной системы для исследования магнитных характеристик материалов *mSR* методом.

*mSR* спектроскопия является уникальным методом исследования магнитных свойств материалов на микроскопическом уровне. Метод

позволяет эффективно исследовать различные состояния веществ<sup>10</sup>: ферромагнитные и антиферромагнитные состояния, состояния спинового стекла и другие состояния. Чувствительность методики очень высока и позволяет идентифицировать примесь любого из перечисленных состояний к основному на уровне нескольких процентов. Эксперименты выполнялись на продольно поляризованном пучке  $m^+$  [10]. Измерения могут проводиться во внешних продольных или поперечных магнитных полях. Информация о распределении локальных магнитных полей получается из временных спектров  $N_{e^+}(t)$  позитронов распада от  $m^+$ -мезонов, остановившихся в материале образца и из интегрального счета позитронов, нормированного на число остановившихся  $m^+$ -мезонов:

$$n_{e^+} = \frac{1}{N_{m^+}} \int_0^{\Delta T} N_{e^+}(t) dt,$$

где  $\Delta T = 10mc$  - анализируемый временной интервал после остановки мезона.  $N_{e^+}(t)$  - спектры аппроксимировались функцией вида:

$$N_{e^+}(t) = N_0 e^{-\frac{t}{t_m}} [1 + a_0 G(t)] + N_b, \text{ где}$$

$N_0, N_b, a_0$  - параметры, зависящие от начальной поляризации пучка мезонов, геометрии установки и характеристик детектирующей аппаратуры;  $t_m$  - время жизни мюона. В большинстве работ по  $mSR$  исследованиям было показано, что для ВТСП<sup>11</sup> материалов гаусс-распределение является достаточно хорошим приближением при описании временных  $N_{e^+}(t)$  спектров. Поэтому функция релаксации спина мюонов  $G(t)$  содержит в качестве параметров магнитные поля в месте остановки мюонов [11].

Криостат для  $mSR$  исследований должен удовлетворять следующим требованиям:

- малый (не более 50 мм) размер криостата вдоль пучка. Это обусловлено желанием охватить счетчиками максимально-возможный телесный угол, а следовательно, увеличить статистику;

<sup>10</sup> A. Shenk. *Muon Spin Rotation Spectrography : Principles and Applications in Solid State Physics* (Adam Hilger, Bristol, 1985).

<sup>11</sup> **ВысокоТемпературный СверхПроводник.**

- широкий интервал (5-300К) рабочих температур криостата;
- минимально-возможная (не более  $0.1 \text{ г/см}^2$ ) толщина стенок на пути пучка;
- отсутствие магнитных материалов в криостате (нержавеющая сталь становится магнитной при температурах ниже  $10\text{K}^{12}$ )
- удобство смены образцов в криостате, возможность работы с криостатом в режиме многосуточной непрерывной работы.

Перечисленные требования определяют конструкцию криостата [12]. Для проведения *mSR* исследований выбрана конструкция криостата проточного типа, в котором охлаждающий криоагент непосредственно обдувает исследуемый объект. Такая конструкция позволяет использовать для охлаждения различные типы хладагентов (жидкий или газообразный гелий, жидкий или газообразный азот) , что позволяет не только обеспечить весь требуемый диапазон температур, но и оптимизировать режим работы, как с точки зрения расхода криоагента, так и точки зрения стабилизации температуры.

Образец помещается в рабочую камеру криостата. Рабочая камера имеет тонкие окна из фольгированного с одной стороны стеклотекстолита толщиной  $100 \text{ }\mu\text{м}$  (медная фольга  $20 \text{ }\mu\text{м}$  и  $80 \text{ }\mu\text{м}$  стеклотекстолит). Окна клеиваются в камеру на криоэпоксидной смоле медной фольгой внутрь камеры. Диаметр окон  $70 \text{ мм}$ . Медная фольга обеспечивает вакуумную плотность окна, а стеклотекстолит принимает на себя всю нагрузку давления. Стрела мембраны окна прогиба не превышает  $3\text{-х мм}$ . Фольгированный стеклотекстолит в качестве холодных тонкостенных окон криостата имеет почти вдвое меньшую паразитную плотность для пучка мюонов и позитронов вдоль пучка. Использование таких окон является оригинальной методикой, разработанной автором. Камера криостата выдержала уже более двух сотен циклов разборки с нагрузкой и разгрузкой тонких внутренних окон давлением и более нескольких тысяч термоциклов. Система управления криостатом аналогична описанной в предыдущей главе. Характеристики расхода хладагента и точности стабилизации температуры приводятся при различных режимах работы криостата.

**Четвертая глава** содержит описания криогенных установок, созданных для аттестации сверхпроводящих материалов и магнетиков перед исследованиями на поляризованном пучке  $m^+$  *mSR* методом.

Комплексное изучение ВТСП образцов целесообразно начинать с измерения макроскопических характеристик для аттестации образцов как

---

<sup>12</sup> Зависит от состава сплава, приводится ориентировочная величина.

сверхпроводников. Необходимыми критериями сверхпроводящего состояния являются диамагнетизм, эффект Мейснера и нулевое сопротивление образца. Описанная установка создана для исследования зависимости сопротивления ВТСП образцов постоянному току и комплексной магнитной проницаемости  $m^*$  в зависимости от температуры и при различных значениях магнитного поля [13]. Измерение сопротивления производилось по четырех зондовой схеме. Измерение комплексной магнитной проницаемости выполнено резонансным методом, заключающимся в измерении добротности и индуктивности колебательного контура, содержащего в качестве сердечника исследуемое вещество в твердом или порошкообразном состоянии.

При измерении  $m'$  и  $m''$  измеряемыми величинами являются  $f$  и  $\Delta f$ , где  $f$  - резонансная частота колебательного контура,  $\Delta f$  - ширина резонансной кривой на уровне 0.707 максимальной амплитуды резонанса. Окончательный вид формул для вычисления комплексной магнитной проницаемости за вычетом "фона", характеристик контура без образца, таков:

$$m' = 1 + \frac{b}{(2p)^2 C} \left( \frac{1}{f^2} - \frac{1}{f_0^2} \right), \quad m'' = m' \left[ \frac{\Delta f}{f} - \frac{\Delta f_0}{f_0} + 2pr_0 C (f_0 - f) \right],$$

где  $b$  - геометрический фактор катушки,  $C$  - эквивалентная емкость контура, индекс "0" означает параметры резонансного контура без образца в катушке, но при тех же самых параметрах температуры и магнитного поля. Измерения магнитной проницаемости относительно из-за модельности и неопределенности в размерах образца, помещенного в катушку.

При измерении  $R$  - сопротивления образца измеряемыми величинами являются  $U_+$  и  $U_-$  - падение напряжения на образце при различных направлениях тока  $I_+$  и  $I_-$  соответственно. Если  $U_0$  - термоЭДС и контактные разности потенциалов, возникающие в контуре, то можно записать

$$U_+ = R I_+ + U_0, \quad U_- = R I_- + U_0.$$

Используя разностный метод мы исключаем  $U_0$ .

$$R = \frac{|U_+ - U_-|}{|I_+ - I_-|}.$$

Другой особенностью измерения сопротивления является исключение влияния неоднородности тока в районе контактов на падение напряжения. В качестве образцов использовались образцы с размерами 2x2x15 мм. Токовые контакты наносились на торцы образцов, а потенциальные на расстоянии 3 мм от торца в плоскости, перпендикулярной магнитному полю (для исключения эффекта Холла).

Была разработана методика нанесения контактов на поверхность керамических образцов. Для контактов применялась In-Ga эвтектическая смесь – находящаяся в жидком состоянии при комнатной температуре. Ультразвуковым вибратором смесь наносилась на поверхность. В дальнейшем к смеси добавлялся In до затвердевания смеси. Медные контакты закреплялись в In без пайки. Поверхность сверхпроводящей керамики хорошо смачивалась и не испытывала термоударов. При измерении сопротивления образцов остаточное сопротивление (после сверхпроводящего перехода) регистрировалось ниже чем  $10^{-8}$  Ом при  $10^{-3}$  Ом до перехода.

Таким образом была создана установка для относительного измерения комплексной магнитной проницаемости и сопротивления сверхпроводящих образцов при температурах 6-300К и магнитных полях до 1.6Т. Результаты измерений опубликованы в [14].

Одной из важнейших характеристик сверхпроводящих образцов является зависимость критической плотности тока от величины внешнего магнитного поля. Критические плотности тока, как функция магнитного поля, по сути дела, определяют область применимости сверхпроводников для практических целей. Набор большого массива цифровых данных возможен только на автоматизированной установке. Современные автоматизированные установки строятся, как правило, на модульных системах и системах, включающих в себя распределенные микропроцессорные устройства [15]. Каждая микропроцессорная система в экспериментальной или технологической установке решает свою определенную подзадачу. Микропроцессорные системы объединяются в локальную сеть под управлением центрального компьютера, ведущего весь эксперимент. Одной из подзадач в установке по исследованию вольт-амперных характеристик сверхпроводников является изменение и измерение тока через образец и сбор информации о падении напряжения на сверхпроводящем образце, накопление массива данных, сервисные функции и функции по защите системы от аварийных ситуаций. Установка и результаты измерений описаны в [16].

**Пятая глава** содержит описание внутренней криогенной водородно-дейтериевой газовой мишени для внутреннего электронного пучка в накопительном кольце НЭП (электронное накопительное кольцо в НИЯФ<sup>13</sup>).

Задача внутренней газовой криогенной водородно-дейтериевая мишени создать на пути электронного пучка облако максимально плотного водорода или дейтерия. Так как на внутренних мишенях нет возможности использовать окна (материала в любом окне больше, чем в газовой мишени нашего типа), то газ из ячейки свободно растекается в обе стороны вдоль накопительного кольца. Вакуумная система кольца должна “утилизировать” остаточный газ и поддерживать вакуум в основной части кольца на уровне  $10^{-9}$  мбар. При проектировании мишени использовался впервые для такого типа мишеней вариант совмещения системы охлаждения накопительной ячейки и системы криогенной откачки отходящего газа. За счет совмещения криогенной системы охлаждения газовой ячейки и системы криогенной откачки мишень имеет высокую плотность (до  $10^{16}$  ядер/см<sup>2</sup>) и вакуум  $10^{-6}$  мбар непосредственно за пределами мишени в кольце без дополнительных средств откачки. Плотность мишени оптимизирована за счет приближения к давлению насыщенных паров над твердым водородом(дейтерием) для каждого потока водорода(дейтерия).

Мишень представляет собой гелиевый криостат заливного типа. Расход жидкого гелия в режиме нормального функционирования около 0.9 лж/час. При общей емкости гелиевого бака 30 литров долив жидкого гелия осуществляется раз в сутки. Температура газовой ячейки регулируется с помощью нагревательных элементов и контролируется с помощью калиброванных датчиков температуры (угольные резисторы ТВО). Охлаждение ячейки осуществляется жидким гелием через теплопроводящий зазор, заполняемый газообразным гелием низкого давления. Система управления допускает варьирование этого давления в широких пределах, поэтому при захолаживании или изменении температуры давление повышается до 0.5 бар., а в режиме стабильной работы уменьшается до 1 мбар., при этом мощность нагревателей, необходимая для стабилизации температуры, сводится практически к нулю (десятки мВт).

Особенностью работы на электронном пучке является наличие синхротронного излучения в кольце. В мишени была применена система, которая поглощала энергию синхротронного излучения внутри газовой ячейки и отводила ее на “азотный” экран, существенно снижая потери

---

<sup>13</sup> *Новосибирский Институт Ядерной Физики*

жидкого гелия (энергия синхротронного излучения в районе газовой ячейки около 2 Вт).

**Шестая глава** содержит описание системы формирования и детектирования холодной атомарной струи для источника поляризованного водорода(дейтерия).

Поляризованные мишени в настоящее время широко используются на современных ускорителях. Существует два типа поляризованных мишеней: твердотельные и газовые. Твердотельные мишени, обладая большой плотностью, применяются исключительно на выведенных пучках, так как необратимо разрушают пучок. Газовые поляризованные мишени используются преимущественно на накопительных кольцах, где несмотря на низкую плотность мишени, за счет многократного прохождения пучка, набирается большая светимость.

Впервые газовая поляризованная дейтериевая мишень была использована в Новосибирске на электронном накопительном кольце ВЭПП-3<sup>14</sup>. Несколько реакций с использованием поляризованного пучка и мишени было предложено исследовать с помощью спектрометра ANKE на накопительном кольце COSY-Jülich<sup>15</sup>.

Исходным элементом водородно-дейтериевого поляризованного источника является радиочастотный диссоциатор, в котором происходит диссоциация. Степень диссоциации в газовом разряде определяется плотностью созданной атомарной компоненты и различными механизмами рекомбинации<sup>16</sup>. Атомарный водород из диссоциатора проходит через охлаждаемое сопло, в котором формируется атомарная струя. Температура сопла и давление в диссоциаторе определяют скорость атомов – важнейший параметр для магнитной системы. Система стабилизации температуры сопла должна удовлетворять следующим условиям:

- обеспечивать стабилизацию температуры в диапазоне 60...120К с точностью  $\pm 1$  К при тепловом потоке до 20 Вт;
- обеспечивать быстрый нагрев сопла до комнатных температур, а также быстрое захлаживание;

---

<sup>14</sup> R.Gilman et al., *Nucl. Instr. and Meth. A* **327**, 277 (1993).

<sup>15</sup> S.V. Dshemuchadze et al., *COSY Exp. Proposal no.20*, V.Komarov, V.I.Komarov, *Proc. 105th Int.WE-Heraeus-Seminar, Bad Honef, feb.1-3, 1993*. Eds. E.Rösse, O.W.B.Schult (*Konferenzen des Forschungszentrum Jülich, vol.12, 1993*), p.281.

<sup>16</sup> O.Grebenyuk et al. *Annual Rep IKP 1994, Report Jül-3035 (Jülich, 1995)*

<sup>16</sup> N.KOch, *PhD Thesis, University of Erlangen-Nürnberg (1999)*.

- конструкция должна быть компактной и занимать минимум места в области между соплом и скиммером, что особенно важно для улучшения условий откачки остаточного газа.

В связи с этим была создана система охлаждения сопла, основанная на принципе криогенной тепловой трубы. Тепловая труба представляет собой вертикально установленную трубку, верхний конец которой поддерживается при низкой температуре, газ, конденсируясь на холодной поверхности стекает вниз, где испаряется, тем самым охлаждая нижнюю поверхность трубки [17], [18]. Пучок из сопла, проходя через систему скиммера и диафрагмы с дифференциальной откачкой, превращается в практически параллельный пучок атомов, который в дальнейшем поляризуется.

До настоящего времени применялись два основных типа систем охлаждения для формирования холодной струи:

- системы, основанные на криогенераторах, соединенных с соплом через медные теплопроводящие элементы (включая гибкие)<sup>17</sup>;
- системы с использованием жидкого азота<sup>18</sup>.

Тепловая труба обладает неоспоримыми преимуществами, заключающимися в:

- широком диапазоне возможных температур стабилизации, свойственном криогенераторной системе;
- малой массе теплопроводящих элементов, свойственной жидко-азотной системе охлаждения.

Для исследования криогенных тепловых труб в ПИЯФ был создан стенд на основе криогенератора RGD210<sup>19</sup> и проведены испытания различных газов. Наиболее приемлемым, с точки зрения динамического диапазона рабочих температур был выбран Ne. Измерения теплопроводимости тепловой трубы при различных давлениях Ne и наборах температур “теплого” и “холодного” концов тепловой трубы были выполнены на стенде [18]. Тепловая труба установлена на поляризованном источнике водорода(дейтерия) и экспериментально проверена возможность стабилизации температуры сопла от 30К до 150К с точностью  $\pm 0.2\text{K}$ . С помощью системы охлаждения сопла получена температурная зависимость интенсивности источника от температуры сопла. За счет оптимизации параметров холодной струи и согласовании

---

<sup>17</sup> . D. Singy, P.A. Schmelzbach, W. Gruebler, and W.Z. Zhang, *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research A*278, 349 (1989)

<sup>18</sup> T. Wise, A.D. Roberts, and W. Haeberli, *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research A*336, 410(1993)

<sup>19</sup> Двухступенчатый криогенератор на цикле Мак-Магона, Leybold GmbH.

этих параметров с магнитной системой источника удалось получить интенсивность поляризованного источника водорода на 15% выше мирового уровня [19].

Традиционный метод измерения профиля водородного атомарного пучка основан на использовании квадрупольного масс-спектрометра, в котором атомы проходят сквозь спектрометр и пересекаются внутренним электронным пучком (cross beam Quadruple Mass Spectrometer (QMS))<sup>20</sup>. Сам QMS располагается на двухкоординатном столе, что позволяет перемещать его в плоскости, перпендикулярной пучку.

Не прямой метод измерения профиля пучка связан с использованием компрессионной трубки<sup>21</sup>. Этот метод основан на измерении давления в объёме с компрессионной трубкой. Если есть возможность перемещать компрессионную трубку в плоскости, перпендикулярной пучку, то можно измерять профиль пучка. Специальная процедура калибровки позволяет измерять абсолютный поток на входе в компрессионную трубку.

Оба метода хорошо известны и тщательно исследованы в большом количестве работ. Главные ограничения этих методов:

- невозможно проводить измерения профиля пучка, не разрушая пучок. Т.е. в момент проведения физического эксперимента невозможно контролировать профиль пучка, стабильность пучка;
- механическая система для организации двухкоординатного перемещения в вакууме достаточно сложна и требует отдельного проектирования на стадии проектирования ABS. Приспособление как QMS устройств, так и компрессионной трубки к существующим поляризованным источникам очень затруднено.
- измерения с помощью QMS возможны только при условии хорошего вакуума ( $10^{-5}$  мбар.), что делает невозможным измерения в первой и второй ступенях поляризованного источника.

Наибольший интерес представляют измерения профиля атомарного пучка в первой ступени ABS. Именно там теряется до 95% процентов атомарного пучка. Следовательно, даже незначительное увеличение плотности атомарной струи в области ее формирования может существенно увеличить поток поляризованных атомов и, следовательно, плотность поляризованной мишени. Именно созданию прибора для таких измерений и посвящена данная работа.

---

<sup>20</sup> *Diploma Thesis of M. Mikirtychiants. Measurements of degree of dissociation at the Polarized Atomic beam source for ANKE Spectrometr at the COSY-Jülich Accelerator. Jülich 1999.*

<sup>21</sup> *Diploma Thesis of M.E. Nekipelov. Device for Absolute Atomic Beam Intensity Measurements at the ANKE Atomic Beam Source. Jülich 1999.*

В работе реализована идея регистрации изменения сопротивления тонких проволок из-за нагрева от рекомбинации атомов на поверхности проволок. Известно, что коэффициент прилипания к металлу (вероятность свободного атому остаться на поверхности после соударения с ней) для атомарного водорода достаточно велик<sup>22</sup>, причем не зависит от скорости водородных атомов (до 10000м/с) и от угла падения на поверхность. Попытки измерения тепла рекомбинации на тонких проволоках в источниках атомарного водорода проводились различными группами, но без успеха и без публикации результатов. Главная проблема состоит в чрезвычайно низкой плотности тепла, которую необходимо измерить. Характерная плотность атомарного потока около  $10^{16}$  атомов/см<sup>2</sup>/с. Плотность теплового потока при рекомбинации атомов на поверхности не превышает 0.002 Вт/см<sup>2</sup>. Измерения такой плотности не простая задача, при этом изменения сопротивления проволоки были менее 0.1%. Математическая модель для нагрева проволоки при рекомбинации атомарного потока водорода на поверхности проволоки была построена автором в [20]. Оказалось, что диаметр проволок<sup>23</sup> лежит в очень узком интервале. Именно эта особенность и определяла низкую чувствительность в других экспериментах. Для W/Re проволок возможный диаметр оказался  $5 \pm 2$  мкм. На качественном уровне это понятно – уменьшение диаметра связано с тепловым балансом. “Приход” тепла - это линейная функция диаметра – количество атомов, падающее на поверхность пропорционально длине проволоки, умноженной на диаметр. Тепло “расходуется” по двум направлениям: излучение и теплоотвод на холодные концы проволоки. Излучение также линейная функция диаметра (площадь поверхности), в то время как теплоотвод вдоль проволоки – квадратичная функция диаметра. Следовательно, для увеличения нагрева проволоки необходимо уменьшать диаметр. Но нижний предел диаметра определяется теплоотводом через излучение. Когда происходит локальный перегрев, чувствительность падает очень быстро. Именно построение математической модели позволило определить параметры проволоки и

---

<sup>22</sup> *Winkler Interaction of atomic hydrogen with metal surfaces. Appl. Phys. A67, 637-644 (1998).*

<sup>23</sup> *Рассматривались проволоки из различных материалов. Выбор, на основе таких параметров, как теплопроводность, температурный коэффициент сопротивления и коэффициент отражения был остановлен на вольфрамowych проволоках легированных рением и покрытых золотом.*

определило успех эксперимента. Все тесты проводились с проволоками производства Luma metal<sup>24</sup>.

Воспроизводимость измерений везде, где определяющую роль играет поверхность, один из основных вопросов методики. В целых сериях экспериментов сигнал с проволоки менялся на порядки величины без видимой причины. По частным сообщениям именно это и останавливало все группы, которые делали попытки создания такого прибора. Методика прокаливания проволоки в потоке атомарного водорода до температуры 900С приводит к воспроизводимости результатов лучше 1%. Итак, сопротивление проволоки содержит стабильную и воспроизводимую информацию о потоке атомарного водорода, причем полезный сигнал существенно превышает все побочные эффекты и шумы.

Поместив проволоку в поток атомарного водорода мы можем определить лишь интеграл проекции плотности потока на данную проволоку. Сразу возникла идея создания двухкоординатной сетки из проволок (XY) в плоскости, перпендикулярной оси пучка. Это и определило конструкцию монитора [21]. Итак, у нас есть 16 цифр – сопротивления проволок в потоке атомарного водорода (8-X, 8-Y). Пусть  $\{R_{a,i}\}_{i=1..8}^{a=x,y}$  сопротивления проволок в различных плоскостях (x,y) и с различными порядковыми номерами. Достаточно легко ответить на вопрос – очень важный для проводки любых пучков, где его центр. Можно определить:

$$x_C = \sum_{i=1}^8 x_i \frac{R_{x,i} - R_{0x,i}}{R_{0x,i}} \quad y_C = \sum_{i=1}^8 y_i \frac{R_{y,i} - R_{0y,i}}{R_{0y,i}},$$

где индекс “0” означает соответствующее сопротивление при отсутствии атомарного пучка. Разброс сопротивлений для проволок в отсутствии пучка составляет примерно 5%, поэтому используются индивидуальные параметры для каждой проволоки.

В нашем случае процедура восстановления профиля пучка следующая:

- мы задаем моделью пучка (например, двумерное распределение Гауса). Это распределение содержит ряд параметров, которые необходимо определить;
- задав начальное значение параметров, мы, численно решая дифференциальное уравнение, находим сопротивления проволок;

---

<sup>24</sup> Luma Metall AB, Box 701, S-391 27 Kalmar, Sweden, Schweden.

- далее параметры модели пучка вирируются с минимизацией среднеквадратичного отклонения расчетных сопротивлений от измеренных.

Результаты измерений и математические методы обработки данных с монитора потока атомарного водорода(дейтерия) описаны в [22].

**Заключение** содержит основные результаты проделанной работы.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы**

1. А.А. Васильев и др. Конструкция лабораторного криостата шахтного типа. Препринт ЛИЯФ-1579, февраль 1990, 17 стр.
2. Д.В. Балин, ... , А.А. Васильев и др., Криогенная ионизационная камера для изучения мюонного катализа, Препринт ЛИЯФ-1630, август 1990, 24 стр.
3. D.V. Balin, ... , A.A. Vassiliev et al., Investigation of temperature dependence of the muon catalyzed fusion in deuterium, Muon Catalyzed Fusion 2 (1988) 241-246.
4. А.А. Васильев и др. Микропроцессорная система измерения и стабилизации температуры криогенной ионизационной камеры. Международная конференция "Криогеника-90", Кошице, Чехословакия, 1990.
5. А.А. Васильев и др. Микропроцессорная система контроля параметров низкотемпературных термометров по давлению насыщенных паров. Всесоюзная конференции "Криогеника 87", июнь 1987, г. Москва.
6. Л.М. Коченда, А.А. Васильев и др. Программное обеспечение на языке ФОРТРАН-4 для расчета термодинамических характеристик исследуемых ступеней центробежных криогенных микропроцессоров. Препринт ЛИЯФ-1348, декабрь 1987, 32 стр.
7. Е.М. Маев, ... , А.А. Vassiliev et al., Search for Muon Catalyzed  $d^3He$  - fusion, Нур. Interact. 118 (1999) 171-176.
8. Е.М. Маев, ... , А.А. Vassiliev et al., Measurement of the Muon Transfer Rate from Deuterium to  $^3He$  at low temperature, Нур. Interact. 118 (1999) 121-125.
9. N.I. Voropaev, ... , A.A. Vassiliev et al., First observation of spin flip in  $dm$ -atoms via formation and back decay of  $ddm$  molecules, Нур. Interact. 118 (1999) 135-140.
10. С.Г. Барсов, А.А. Васильев и др., Измерение магнитных характеристик  $YBa_2Cu_3O_{6,9}$ -керамики  $mSR$  методом, Сверхпроводимость: физика, химия, техника, 1989, т.2, №5, стр. 42-50.

- 
11. S.G. Barsov, ... , A.A. Vassiliev et al., Anisotropy of magnetic properties of textured supercond.  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+d}$ , Нур. Interact. 63(1990) 87-92.
  12. А.А. Васильев и др., Криостат для *mSR* исследований, Препринт ЛИЯФ-1638, сентябрь 1990, 14 стр.
  13. А.А. Васильев и др. Автоматизированная установка для исследования магнитных и кинетических характеристик высокотемпературных сверхпроводников и магнетиков, Препринт ЛИЯФ-1463, декабрь 1988, 37 стр.
  14. А.А. Васильев и др. Автоматизированная установка для аттестации сверхпроводящих образцов, материалы XXV Всесоюзного совещания по физике низких температур, Л., 1988. Сверхпроводимость, с. 221.
  15. А.А. Васильев и др. IBM PC-программно-аппаратная система для программирования и отладки контроллеров на базе МПК БИС КР580. Препринт ЛИЯФ-1590, март 1990, 16 стр.
  16. А.А. Васильев и др. Автоматизированная установка для исследования вольтамперных характеристик сверхпроводящих материалов". Препринт ЛИЯФ-1675, март 1991, 12 стр.
  17. A.Vassiliev et al, Proc. 7<sup>th</sup> Int. Workshop on "Polarized Gas Targets and Polarized beams" Urbana/Illinois 1997 (AIP Conf. Proc. 421, 1997), p.479.
  - 18 .A. Vassiliev et al., Cryogenic Ne Heat Pipe Cooling System for An Atomic Beam Source, Preprint PNPI-2175, 1997, 30 p.
  - 19 M. Mikirtychiants, ..., A.Vassiliev et al., The polarized atomic beam source for ANKE at COSY Juelich. Proc. Deutsche Physikalische Gesellschaft, Erlangen, March, 2001.
  20. A. Vassiliev, Two dimensional On-line Monitor of atomic Hydrogen (Deuterium) Flow, Preprint PNPI-2260, 1998, 29 p.
  21. А.А. Васильев, Монитор тепловых потоков, Препринт ЛИЯФ-1622, август 1990, 20 стр.
  - 22 A. Vassiliev, et al. Investigation of the Atomic Hydrogen Beam with a two dimensional Multiwire Monitor. Proc, International Workshop on "Polarized Sources and Targets", Erlangen 1999 (AIP Conf.Proc.200, 1999).