

На правах рукописи

**СУМБАТЯН Армен Араратович**

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ  
ДЛЯ РАДИОЧАСТОТНОГО АДИАБАТИЧЕСКОГО  
ПЕРЕВОРОТА СПИНА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

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

Санкт-Петербург  
2012

Работа выполнена в Отделении нейтронных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова».

Научный руководитель: кандидат технических наук  
Соловей Валерий Анатольевич,  
ФГБУ «ПИЯФ».

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Валиев Эдуард Зуфарович,  
ФГБУН ИФМ УрО РАН,

кандидат физико-математических наук  
Трофимов Виктор Александрович,  
Отделение физики высоких энергий  
ФГБУ «ПИЯФ».

Ведущая организация: Лаборатория нейтронной физики им. И. М.Франка,  
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна.

Защита диссертации состоится «22» мая 2012 г. в «15» часов на заседании диссертационного совета Д 002.034.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН) по адресу: 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 31–33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАП РАН по адресу: Санкт-Петербург, Рижский пр., д. 26.

Отзывы на автореферат и диссертацию направлять по адресу: 190103, Санкт-Петербург, Рижский пр., д. 26, ИАП РАН, диссертационный совет.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



А. П. Щербаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Медленные поляризованные нейтроны нашли широкое применение в изучении магнитных материалов [1] благодаря их высокой чувствительности к магнитной структуре кристаллов и магнитным неоднородностям (домены, критические флуктуации магнитной плотности, спиновые волны и т. д.). В таких измерениях информация извлекается из рассеяния пучка, падающего на образец, его поляризации и деполяризации. В экспериментах с поляризованными нейтронами, с одной стороны, необходимо определенным образом ориентировать вектор поляризации  $\mathbf{P}$  (например, относительно вектора скорости нейтронов  $\mathbf{V}$  или вектора рассеяния  $\mathbf{e}$ ); с другой стороны, необходимо знать направление  $\mathbf{P}$  в прошедшем через образец пучке, т. к. при взаимодействии поляризованных нейтронов с магнитным полем образца возможны как деполяризация пучка, т. е. изменение абсолютной величины вектора поляризации  $|\mathbf{P}|$ , так и поворот вектора  $\mathbf{P}$ . Для количественного измерения деполяризации требуется перед анализатором изменять направление поляризации на обратное по отношению к ведущему полю  $\mathbf{H}_0$ . Устройства для реверса поляризации называются флипперами.

В процессе исследований на пучках поляризованных нейтронов были развиты принципиально новые методики, рожденные как на основе получаемых экспериментальных результатов, так и в результате развития теории магнитного рассеяния поляризованных нейтронов. Отметим особенность работы в области физики конденсированного состояния: создание новых установок, использующих новые методики не для одного конкретного эксперимента, а для многочисленных исследований по предложению специалистов из различных научных центров.

Большое развитие получила методика малоуглового рассеяния нейтронов, которая позволяет легко определять всю кинематику процесса рассеяния измерением только вектора поляризации. Метод малоуглового рассеяния позволяет создавать принципиально новые методики и получать информацию, порой недоступную другим методам нейтронных и рентгеновских исследований [2].

Обычная схема установки малоуглового рассеяния состоит из монохроматора, поляризатора, флипперов, образца, анализатора и детектора. Пучок из реактора коллимируется и фильтруется по спектру устройствами в биологической защите реактора. Далее пучок поляризуется отражением от зеркала-поляризатора и через флиппер попадает в модуль образца с устройством трехмерного анализа поляризации. После отражения от зеркала анализатора, аналогичного поляризатору, нейтроны попадают в детектор.

Флипперы до и после образца служат для переворота поляризации на  $180^\circ$  относительно ведущего магнитного поля с целью измерения величины поляризации по формуле

$$P = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-},$$

где  $N_+$  и  $N_-$  – количество нейтронов на детекторе, соответственно, с выключенным и включенным флиппером. Наличие двух флипперов позволяет измерить полный набор интенсивностей без переворота спина при рассеянии на образце  $N_{++}$ ,  $N_{--}$  и с переворотом  $N_{+-}$ ,  $N_{-+}$ , где первый знак означает состояние флиппера до образца, а второй – после образца.

Такие установки с трехмерным (или «векторным») анализом поляризации успешно используются на 4 и 14 каналах реактора ВВР-М. Трехмерный анализ позволяет изучать магнитное малоугловое рассеяние с разделением упругого и неупругого магнитного рассеяния с выделением ядерного и фонового рассеяния. На них изучаются критические магнитные явления, распределение магнитного поля в сверхпроводниках, магнитная текстура и пр.

Таким образом, для полной реализации возможностей поляризованных нейтронов необходимо иметь адекватную нейтронно-оптическую технику, позволяющую формировать необходимый пучок поляризованных нейтронов, управлять вектором поляризации нейтронов, падающих на образец, и анализировать поляризацию прошедших и рассеянных нейтронов.

В ПИЯФ были созданы все элементы такой техники: высокоэффективные зеркала-поляризаторы и полярирующие нейтронотводы [3], монохроматоры нейтронного пучка на основе идеи Г. М. Дробкина пространственного спинового резонанса [4, 5]. Наконец, созданный в ПИЯФ адиабатический радиочастотный флиппер (АРФ) вместе с простым, экономичным генератором тока для радиочастотной (РЧ) катушки флиппера является наиболее эффективным.

АРФ был создан в ПИЯФ в рамках работы по определению электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона с помощью ультрахолодных нейтронов (УХН). В рамках этой работы по сути дела с нуля были созданы методики и средства для вывода, хранения и поляризации УХН [6–8]. Наиболее сложной оказалась задача осуществить переворот спина УХН. Существующие на тот момент методы переворота поляризации относительно поля основывались на неадиабатическом прохождении нейтронов через область с резким изменением знака ведущего магнитного поля  $H$ . Такое поле с резким изменением знака создается тонкой широкой фольгой из немагнитного материала, через которую пропускается элек-

трический ток, создающий на разных сторонах фольги магнитные поля взаимно противоположного знака. Для УХН, скорость которых мала, фольга с током – это был единственно возможный способ переворота поляризации. Основной недостаток такого флиппера в том, что пучок УХН значительно ослабляется в материале фольги и может даже отразиться от нее. При решении этой проблемы и был обнаружен эффект переворота спина в скрещенных РЧ-поле и постоянном поле, имеющем градиент вдоль направления пролета нейтронов [9]. Созданный в ПИЯФ для УХН АРФ может работать во всем диапазоне холодных и тепловых нейтронов и имеет ограничение только со стороны коротких длин волн. Впервые АРФ был использован при работе с тепловыми нейтронами в эксперименте по определению циркулярной поляризации  $\gamma$ -квантов при захвате протоном поляризованного нейтрона [10].

Большую роль в широком использовании АРФ в экспериментальных установках сыграл простой и экономичный радиочастотный генератор [11]. Этот небольшой по размеру прибор обеспечивал в катушке РЧ-ток до 6 А при напряжении на катушке 2–3 кВ.

Отметим некоторые эксперименты, для которых были созданы АРФ различного типа. Это эксперименты по электрослабому взаимодействию, по исследованию эффектов нарушения четности в реакциях взаимодействия нейтронов с легкими ядрами. В экспериментах по поиску ЭДМ нейтрона новым кристалл-дифракционным методом (DEDM) проводится анализ поляризации прямого, прошедшего через кристалл пучка нейтронов, не испытавших дифракции. Эти измерения производятся при помощи спин-флиппера, что позволяет контролировать возможные ложные эффекты, связанные с неодновременностью измерений для двух положений кристалла.

АРФ используется во времяпролетном нейтронном рефлектометре TOFRPN, который был создан в ПИЯФ для контроля качества покрытий при изготовлении нейтронно-оптических устройств. С помощью нейтронного рефлектометра исследуются физические свойства многослойных магнитных наноструктур, процессы окисления и взаимной диффузии, а также шероховатости и другие несовершенства структуры, их влияние на магнитные свойства. Измерения зеркального и незеркального рассеяния нейтронов с анализом поляризации позволят получать детальную информацию о связи магнитного состояния пленок с особенностями их структуры. Использование АРФ позволяет проводить анализ поляризации в широком диапазоне длин волн с высокой точностью [12].

С использованием разработанных при участии автора флипперов получены важные физические результаты на реакторах Института Лауэ–Ланжевена (Гренобль, Франция), Лаборатории Леона Бриллюэна (Сакле,

Франция), научного центра г. Юлих (FZK, Германия) и Геестхахта (GKSS, Германия), Дубны (ЛНФ, ОИЯИ), ПИЯФ и других центров. Наибольшее количество результатов было получено в постоянной и долговременной кооперации с GKSS. Здесь практически все установки с поляризованными нейтронами оснащены АРФ ПИЯФ.

Таким образом, актуальность работы определяется широким использованием и необходимостью разработки АРФ для новых экспериментальных установок.

## **Цели и задачи работы**

Основными целями работы является создание элементов нейтронного спектрометра, обеспечивающих эффективное реверсирование направления поляризации при проведении экспериментов с поляризованными нейтронами, исследование процессов и решение проблем, возникающих при создании таких флипперов поляризации. Задачи определяются условиями эксперимента: возможное в физическом эксперименте направление ведущего магнитного поля, объем пространства для флиппирования поляризации, нейтронотоды при атмосферном давлении или находящиеся в невысоком вакууме,  $n$ - $\gamma$ -защита, необходимость изменения частоты реверсирования поляризации и пр.

## **Научная новизна работы**

Для решения проблемы реверсирования поляризации внутри нейтронотода с продольным полем, находящегося в вакууме, создан флиппер со съемной катушкой специальной формы, охватывающей нейтронотод. На катушку получен патент.

Для реверса поляризации в экспериментах с большим объемом магнитного поля оптимизирован генератор РЧ-тока, позволяющий увеличить рабочую частоту АРФ до 150 кГц и обеспечить ток до 10 А в соленоидах с индуктивностью до 1 мГн. Проведенные исследования позволили избавиться от наводок на регистрирующую аппаратуру нейтронных экспериментальных установок при работе флиппера.

В ряде экспериментов требуется высокая частота переворота спина нейтрона. Например, в экспериментах по измерению  $P$ -нечетных эффектов с целью уменьшения шумов, связанных с флуктуацией потока нейтронов реактора, включение и выключение АРФ осуществлялось с частотой 10 Гц. Показана возможность использования тока треугольной формы в АРФ. В результате испытаний установлено, что эффективность переворота спина нейтрона не хуже (в пределах погрешности измерений), чем с синусоидальной формой тока. Теоретически показано и практически

подтверждено для тока треугольной формы, что установление (включение) и спад (выключение) тока в катушке может происходить «мгновенно» (в пределах периода частоты тока) по включению и выключению управляющих сигналов.

Впервые показана возможность использования тока треугольной формы в резонансном флиппере для установки спинового эхо. Генератор позволяет менять частоту РЧ-поля в реальном времени и поддерживать установленную частоту с требуемой для физического эксперимента точностью. Предложены варианты флипперов для разных частотных диапазонов с использованием в РЧ-катушках тока как синусоидальной, так и треугольной формы.

Исследован режим многоволновой интерференции нейтронного спинового эхо. В этом режиме поляризованная нейтронная волна многократно расщепляется в магнитном поле резонансных катушек, что приводит к появлению дополнительной модуляции сигнала спин-эхо, вызванной интерференцией «классической» и «резонансной» мод спин-эхо. Приведены простые аналитические выражения, хорошо подтвержденные экспериментальным результатом. Показано, что многоволновая часть сигнала спин-эхо возникает в случае, когда в радиочастотных катушках «резонансного» прибора спин-эхо вероятность спинового переворота  $p < 1$ .

Для расчета трехмерного распределения магнитных полей катушек разных конфигураций разработаны программы на основе системы компьютерной математики MAPLE.

## **Практическая ценность диссертационной работы**

Созданы различные модели устройств для переворота спина поляризованных нейтронов в широком диапазоне длин волн, ограниченном лишь со стороны коротких длин волн, которые выбираются условиями эксперимента.

Создан АРФ, работающий на нейтроноводах с продольным направлением ведущего поля в условиях невысокого вакуума.

Создан АРФ с большой частотой реверса поляризации с использованием треугольной формы тока.

Разработана программа расчета статических магнитных полей для катушек различных типов.

Разработаны методики выбора и расчета радиочастотных катушек для решения проблем, связанных с энергетическими затратами, теплоотводом, электрической прочностью.

Создан мощный, надежный и эффективный генератор для установок с большим объемом магнитного поля и пониженным уровнем помех, с

увеличенным частотным диапазоном и током, управляемым от компьютера для питания РЧ-катушек синусоидальным током.

Создан резонансный флиппер для резонансной установки спин-эхо, позволяющий менять частоту РЧ-поля в реальном времени и широком диапазоне частот с использованием треугольной формы тока. Генератор треугольной формы тока обеспечивает стабильность тока по частоте и амплитуде и позволяет упростить создание флиппера для экспериментов по спин-эхо.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Решение проблем реверсирования поляризации для экспериментальных установок с различными требованиями и условиями, а именно:
  - флиппер большого сечения с поперечным направлением ведущего поля;
  - флиппер с продольным направлением ведущего поля для нейтроновода в вакуумном пространстве;
  - флиппер со свинцовым кожухом;
  - флиппер для экспериментов по резонансному спин-эхо.
2. Создание программы для трехмерного расчета статических магнитных полей в катушках различной формы.
3. Экспериментальное исследование и расчет трехмерного распределения напряженности поля в катушке специальной формы, созданной для нейтроновода в вакууме.
4. Оптимизация генератора синусоидального тока для реверса поляризации в экспериментах с большим сечением пучка и коротким продольным размером поля с целью увеличения тока, частотного диапазона и исключения шумов нейтронного детектора и счетной электроники, принципиально возможных от радиочастотной наводки.
5. Для экспериментов, где необходимо быстрое переключение поляризации, проведено исследование и показана возможность использования тока треугольной формы в РЧ-катушке АРФ, что позволяет включать и выключать флиппер за время, равное периоду частоты тока.
6. Исследование возможности использования тока треугольной формы в РЧ-катушке в резонансном флиппере для спин-эхо экспериментов, позволяющая менять частоту РЧ-тока в реальном времени в широком диапазоне и поддерживать высокую стабильность установленной частоты.



7. Исследование режима многоволновой интерференции нейтронного спинового эхо. Показано, что многоволновая часть сигнала спин-эхо возникает в случае, когда в радиочастотных катушках «резонансного» спин-эхо прибора вероятность спинового переворота  $p < 1$ .

## Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на XXI Совещании по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния РНИКС-2010, Европейской конференции по нейтронному рассеянию (ECNS-2011, Прага) и опубликованы в работах [1–9].

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 211 страницах, содержит 88 рисунков и 5 таблиц. Список литературы включает 95 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность настоящей работы, сформулированы ее задачи и цели. Описываются устройства для работы с поляризованными нейтронами. Излагается история создания устройства для адиабатического радиочастотного переворота спина нейтрона. Приводится краткое содержание глав диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** излагаются способы и устройства реверсирования поляризации нейтронов.

В первом разделе приводится обзор устройств для переворота спина поляризованных нейтронов (флипперов). Указывается на преимущества радиочастотного адиабатического (в координатах вращающейся с частотой  $\omega$  системы) флиппера как устройства, работающего в широком диапазоне длин волн – от ультрахолодных до тепловых.

Во втором разделе рассматривается принцип работы АРФ: в системе координат, вращающейся с частотой  $\omega_0$ , в скрещенных полях (постоянного ( $H_0$ ) и радиочастотного ( $H_1$ )), на спин нейтрона действует эффективное поле  $H_{\text{эфф}} = H_0 - \omega_0/\gamma$ . Если поле  $H_0$  по пути нейтрона на отрезке  $L$  имеет градиент, и такой, что  $\omega_0 = \omega_L$  только в средней части флиппера, то разность  $\omega_0 - \omega_L$  будет иметь разный знак в начале пути с градиентом по-

ля и в его конце, проходя через ноль в резонансных условиях (рис. 1). Иными словами, если изменение амплитудного значения радиочастотного поля по длине  $L$  имеет колоколообразный вид и поле равно нулю в начале и конце участка  $L$ , то эффективное поле  $H_{\text{eff}}$  плавно поворачивается от направления «плюс» на  $180^\circ$  к направлению «минус», обеспечивая адиабатичность прохождения поляризации через поле  $H_{\text{eff}}$ . При этом если выполняются обычные адиабатические условия относительно  $H_{\text{eff}}$ , то в конце пути  $L$  поляризация окажется перевернутой относительно ведущего поля  $H_0$ . Вероятность переворота  $p$  зависит теперь только от коэффициента адиабатичности  $K$  [13]:

$$p = 1 - [\sin^2((\pi/2) (1 + K^2)^{1/2})] / (K^2 + 1).$$

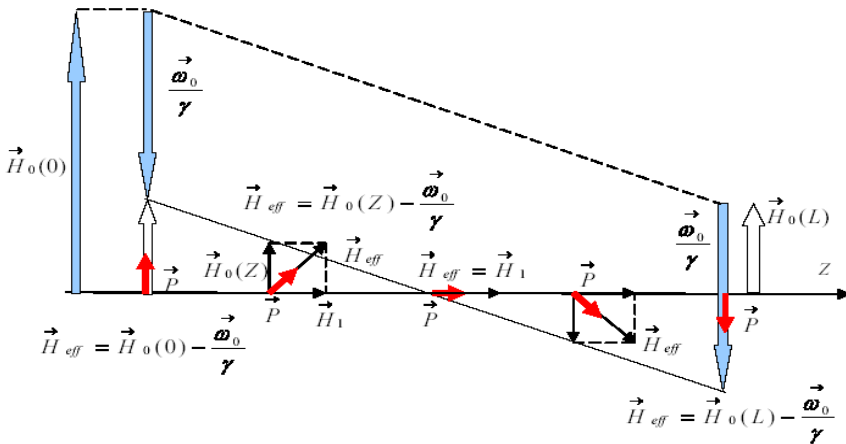


Рис. 1. Схема магнитных полей АРФ во вращающейся с частотой  $\omega_0$  системе координат

Из этой формулы видно, что максимальное отличие  $p$  от единицы при больших значениях  $K$  пропорционально  $1/K^2$ . Так, при  $K = 20$   $p_{\min} = 0,9975$ , а изменение какого-либо параметра в  $K = \gamma HL/\pi v$  (к примеру, на 10 % в сторону уменьшения  $K$ ) приведет к значению  $p_{\min} = 0,997$ .

Это означает, что, в отличие от всех других флипперных систем, эффективность работы данного флиппера слабо зависит от стабильности частоты  $\omega_0$  и амплитудного значения тока  $I_m$  в РЧ-катушке, и единственным ограничением его эффективной работы является нарушение адиабатичности  $K$ , т. е. ограничение только со стороны коротких длин волн ней-

тронов. Если спектр нейтронного пучка широкий, то с увеличением длины волны увеличивается адиабатичность и растет эффективность переворота поляризации. Благодаря этому АРФ широко используется на установках, работающих с тепловыми нейтронами.

В третьем разделе рассматривается оптимизация расчета флиппера для идеальных форм градиента ведущего поля и огибающей РЧ-поля вдоль пролетной базы [13]. В этом случае расчет флиппера упрощается. Исходные данные для расчета флиппера – это длина волны, геометрические размеры и технические возможности создания полей. Представлен пример расчета и наиболее распространенная конфигурация флиппера.

В четвертом разделе описывается генератор РЧ-тока для флиппера с большим объемом магнитного поля. Требуется обеспечить РЧ-ток 5–10 А в катушках с индуктивностью 500–1000 мкГн для частот 50–150 кГц. При этом напряжение на катушке может достигать нескольких киловольт. Чтобы обеспечить эти требования, был разработан специальный генератор, который работает на резонансной частоте последовательного колебательного контура, образованного конденсатором и индуктивностью РЧ-катушки. Благодаря проведенным исследованиям удалось уменьшить коммутационные помехи и наводки на регистрирующую аппаратуру.

**Во второй главе** описываются флипперы, созданные для установок с различным направлением ведущего поля.

В первом разделе приводятся расчет основных параметров радиочастотного поля катушек, исходя из объема и требуемой напряженности поля  $H_1$ . Сравниваются технические варианты создания необходимого РЧ-поля (кольца Гельмгольца или соленоид). Представлены результаты расчета напряженности поля в катушках различной конфигурации, сделанные с помощью системы компьютерной математики MAPLE. Показано, что энергетические затраты на создание необходимого поля при помощи колец Гельмгольца на порядок больше, чем при использовании соленоидальных катушек.

Во втором и третьем разделах рассмотрены флипперы с поперечной и продольной конфигурацией ведущего поля, созданные для конкретных физических установок.

В частности, при создании флиппера для установки малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов с детектором, занимающим большую площадь, возникли сложные проблемы. Они связаны с большой угловой апертурой рассеянного пучка, и флиппер должен иметь большое поперечное сечение при ограниченной длине. Такой флиппер был создан для малоугловой установки SANS2 и рефлектометра поляризованных нейтронов PNR (исследовательский центр GKSS в Геестхахте, Германия).

Новая модификация флиппера была создана для малоугловой установки исследовательского центра в г. Юлих (Германия). Особенность данного флиппера состояла в том, что РЧ-катушка большого сечения была расположена внутри свинцового кожуха, а градиентная катушка – снаружи. Расстояние между катушкой и кожухом 25 мм. Проведенные исследования показали, что потери в РЧ-катушке увеличились на 25 %, что приемлемо для РЧ-генератора. Необходимым условием является то, чтобы края кожуха не образовывали короткозамкнутый виток (свинцовые пластины должны быть изолированы друг от друга). С помощью компьютерной программы были оптимизированы градиентные катушки, которые имели сложную форму.

В третьем разделе рассмотрены особые проблемы, возникающие при разработке флиппера, работающего на нейтроноводе в условиях невысокого вакуума, причем направление ведущего магнитного поля нейтроновода (вдоль нейтронного пучка) не позволяет использовать соленоид. Использование же РЧ-катушек Гельмгольца создало бы проблемы из-за высокого напряжения на катушке и больших энергетических затрат для создания необходимой напряженности РЧ-поля.

В ряде экспериментов РЧ-катушка должна располагаться в форвакуумном окружении, что приводит к газовому разряду и короткому замыканию. Далее, большинство физических установок используют длинные нейтроноводы без возможности «одевать» флиппер в виде полый трубы через конец нейтроновода. Флиппер необходимо делать из двух половинок, чтобы иметь возможность устанавливать его в любом месте нейтроновода. Обе эти задачи – «вакуум» и «длинный нейтроновод» – решены созданием флиппера для установки малоуглового рассеяния нейтронов REFSANS мюнхенского реактора FRM-2. Испытания флиппера показали его высокую эффективность,  $P > 0,995$ , по всему рабочему сечению нейтроновода ( $18 \times 9 \text{ см}^2$ ) (рис. 2).

Для данного флиппера были разработаны специальные катушки в специальном конструктиве. Каждая катушка представляет собой однослойную спираль, противоположные сегменты которой изогнуты под прямым углом к плоскости спирали. Катушки устанавливаются снаружи нейтроновода так, чтобы витки сегментов шли параллельно оси нейтроновода. Каждая катушка состоит из 25 витков медного провода диаметром 2,4 мм. Получен патент на изобретение.

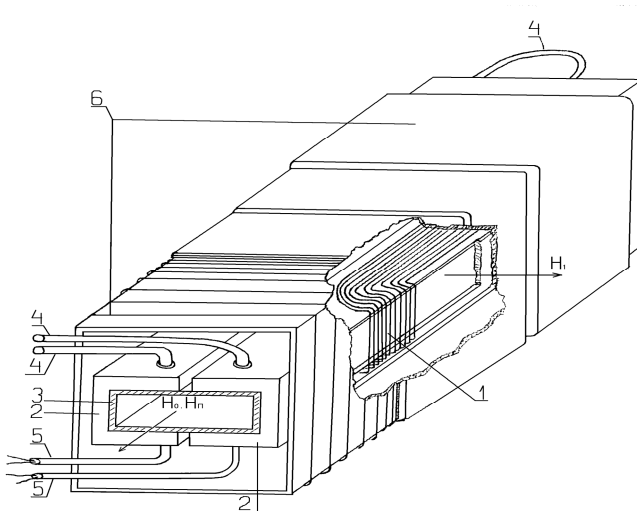


Рис. 2. Общий вид устройства для переворота спина поляризованных нейтронов: 1 – РЧ-катушка для создания переменного поля  $H_1$ , 2 – бокс из диэлектрического материала, внутри которого помещены катушки, 3 – нейтронотвод, 4 и 5 – воздуховоды и выводы питания РЧ-катушки, 6 – соленоид для создания постоянного градиентного поля  $H_0$

Приводятся экспериментальное исследование распределения напряженности РЧ-поля, создаваемого катушками, а также расчет поля, сделанный с помощью системы компьютерной математики MAPLE. Для проведения поляризации используется магнитное поле  $H$ , направленное вдоль оси нейтронотвода. Поле создается соленоидом большего внутреннего сечения, чем сечение нейтронотвода, что дает возможность сдвигать нейтронотвод при его юстировке. Нейтронотвод и соленоид помещены в вакуумированный кожух. Флиппер располагается в вакуумном пространстве между нейтронотводом и соленоидом. На длине флиппера  $L$  соленоид создает градиентное поле  $H_0$  вдоль оси нейтронотвода, а РЧ-поле  $H_1$  перпендикулярно  $H_0$ . Во избежание газового разряда в вакууме РЧ-катушки и подводящие провода находятся при атмосферном давлении и обеспечены надежным отводом выделяемого тепла.

Принципиальное решение конструкции флиппера, удовлетворяющего всем требованиям эксперимента, показано на рис. 2.

**В третьей главе** исследуется интерференционный режим нейтронного спинового эхо. В этом режиме поляризованная нейтронная волна многократно расщепляется в магнитном поле резонансных катушек.

Это приводит к возникновению дополнительных особенностей сигнала спин-эхо, отсутствующих в хорошо известных режимах нейтронного спинового эхо: «классическом» и «резонансном». Подобное поведение проанализировано с использованием рамзеевского метода разделенных осциллирующих полей, приведены простые аналитические выражения, хорошо подтвержденные экспериментальным результатом. Подтверждено, что интерференционная часть сигнала спин-эхо возникает, когда в радиочастотных флипперах «резонансного» прибора спин-эхо вероятность спинового переворота  $p < 1$ .

Предложены варианты флипперов для экспериментов по нейтронному резонансу и нейтронному резонансному спин-эхо (NRSE) в различном частотном диапазоне.

**В четвертой главе** описываются генераторы, обеспечивающие необходимый ток (необходимую напряженность осциллирующего поля  $H_1$ ) в РЧ-катушке флиппера.

Для реализации адиабатического способа переворота спина нейтрона требовалось создать РЧ-поле в катушках с большими линейными размерами частотой до 150 кГц и напряженностью поля до 30 Э. Чтобы создать такое поле в соленоидальных РЧ-катушках, необходимо обеспечить ток,  $I_m$ , 3–10 А. При этом напряжение, приложенное к катушкам, достигает 0,5–5 кВ. Поэтому было решено использовать свойство последовательного контура: малое напряжение на входе контура и, значит, малое напряжение питания при высоком напряжении на катушке.

В первой части описывается простой и экономичный генератор РЧ-тока, построенный по схеме двухтактного ключевого генератора с самовозбуждением на двух транзисторах NPN-типа. В таком генераторе транзисторы работают в ключевом режиме, что снижает рассеиваемую мощность. Последовательное включение LC-контура дает возможность при низких напряжениях на коллекторах транзисторов, не превышающих напряжения питания, снимать большие значения колебательной мощности (напряжение на катушке 1,5–2 кВ при токе 5 А). Приведен расчет генератора.

Во второй части описывается генератор на комплементарных транзисторах (PNP- и NPN-типа). Генератор обеспечивает ток до 10 А на частотах до 150 кГц в катушках с индуктивностью до 1 мГн. Приводятся результаты экспериментального исследования и моделирования в системе МСАР работы генератора. Так как генератор работает в ключевом режиме, то на синусоидальный ток накладываются искажения, возникающие при коммутации элементов схемы. Высокочастотные искажения могут приводить к помехам при счете нейтронов. Благодаря проведенным исследованиям удалось значительно снизить коммутационные помехи, и

уменьшить наводки на регистрирующую аппаратуру. В частности, приведены данные, показывающие, что при счете нейтронов возникала систематическая ошибка из-за работы генератора (разница в количестве нейтронов с включенным и выключенным генератором). Эта ошибка была устранена при работе с усовершенствованным генератором. Получен патент на полезную модель.

В третьей части описывается генератор тока в катушке не синусоидальной, а пилообразной формы, дающий дополнительные возможности в использовании флипперов. В некоторых случаях (например, для исследования нейтронной интерференции, в экспериментах с резонансным спин-эхо) необходимо плавно изменять рабочую частоту генератора в заданных пределах и обеспечивать стабильность установленной частоты. В ряде экспериментов требуется высокая частота переворота спина нейтрона. Например, в экспериментах по измерению  $P$ -нечетных эффектов с целью уменьшения шумов, связанных с флуктуацией потока нейтронов реактора, включение и выключение генератора осуществлялось с частотой 10 Гц. Ниже описывается генератор, который позволяет плавно изменять частоту и практически мгновенно (в пределах периода  $T$ ) включать и выключать ток в катушке  $L$ . Генератор состоит из задающего генератора, который обеспечивает стабильность по частоте, и усилителя (двухтактная полумостовая схема с полевыми транзисторами, работающими в ключевом режиме). Если первый импульс управления имеет длительность в четверть периода, то резко сокращается переходный период установления тока в катушке индуктивности. На рис. 3 представлены осциллограммы переходного периода в схеме с длительностью импульса управления в четверть периода (*a*) и для сравнения – в схеме с импульсами управления в полпериода (*б*). В первой схеме при напряжении питания 60 В, частоте 45 кГц и индуктивности катушки 200 мкГн нет переходного процесса. Во второй схеме четкий переходный процесс.

Испытания проводились на 4 пучке ВВР-М на одном из трех флипперов, входящих в состав малоуглового дифрактометра «Вектор» (мультидетекторная установка малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов с анализом поляризации рассеянных нейтронов), в режиме измерения поляризации прямого пучка. Флиппер располагался после поляризатора, в качестве градиентного поля использовалось рассеянное поле поляризатора. Источником РЧ-тока являлся резонансный генератор, описанный выше. Сначала измерялась поляризация со штатным резонансным генератором, затем с генератором пилообразного тока. С помощью специальной программы, управляющей установкой «Вектор», было измерено количество нейтронов при включенном и выключенном генераторе при различных величинах тока и частоты. Время измерений менялось и

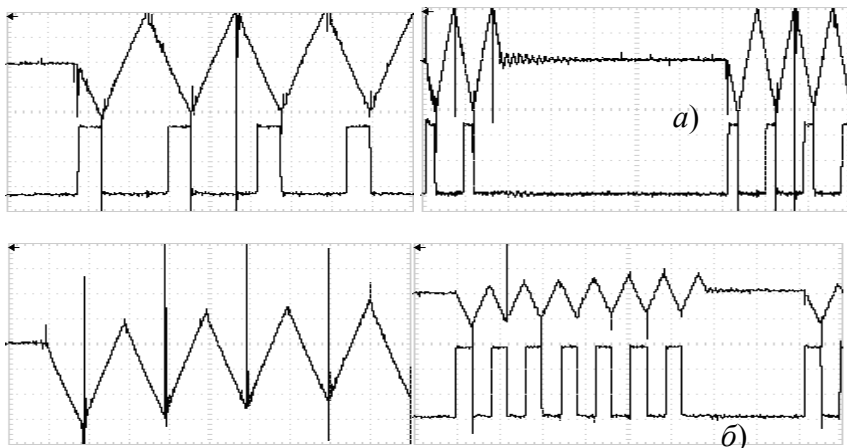


Рис. 3. Осциллограммы тока в катушке индуктивности при включении и выключении с импульсами управления в четверть периода (*a*) и полупериода (*б*)

составляло 15, 30 и 60 с. Ток в катушке менялся изменением напряжения питания генератора. При использовании генератора синусоидального тока поляризация пучка составила величину  $P = 0,9858 \pm 0,0005$ , при использовании тока треугольной формы  $P = 0,9856 \pm 0,0005$ .

В результате испытаний установлено, во-первых, что эффективность переворота спина нейтрона с генератором пилообразного тока не хуже (в пределах погрешности измерений), чем с генератором синусоидальной формы тока.

Во-вторых, теоретически показано и практически подтверждено, что установление (включение) и спад тока (выключение) в катушке может происходить «мгновенно» (в пределах периода РЧ-тока) после включения и выключения управляющих сигналов при ширине импульсов тока, равных четверти периода.

В третьей части представлены также результаты работы резонансного (неадиабатического) флиппера для спин-эхо с генератором синусоидальной и треугольной формы тока в РЧ-катушке. Из сравнения резонансных кривых флипперов с синусоидальной и треугольной формой тока можно сделать вывод о том, что форма тока в РЧ-катушке не оказала влияние на работу резонансного флиппера. Полученный результат позволяет использовать генератор с треугольной формой тока в экспериментах по спин-эхо.

**В пятой главе** представлена программа расчета магнитного поля в системе компьютерной математики MAPLE. Расчет ведется на основе



закона Био–Савара для катушки особой формы. Катушка создана для флиппера на нейтроноводе в условиях невысокого вакуума.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

### **Список публикаций по теме диссертации**

1. *Сумбатян А. А., Аксельрод Л. А., Слюсарь В. Н., Экерлибэ Х.* Патент РФ на изобретение «Устройство для адиабатического радиочастотного переворота спина поляризованных нейтронов», № 2294572, заявка № 2005108899, 28 марта 2005 г.
2. *Сумбатян А. А., Слюсарь В. Н.* Патент РФ на полезную модель «Генератор переменного тока в катушке индуктивности» № 2006124212, 5 июля 2006 г., МПК H03B 5/12, H02M 7/537.
3. *Аксельрод Л. А., Окорочков А. И., Слюсарь В. Н., Соловей В. А., Сумбатян А. А., Экерлибэ Х.* Способы и устройства реверсирования поляризации нейтронов. Препринт ПИЯФ–2665. Гатчина, 2006. 14 с.
4. *Григорьев С. В., Майгула Н. В., Слюсарь В. Н., Соловей В. А., Сумбатян А. А.* Проектирование радиочастотных катушек резонансных адиабатических флипперов поляризованных нейтронов: Препринт ПИЯФ–2710. Гатчина, 2007. 14 с.
5. *Майгула Н. В., Соловей В. А., Сумбатян А. А.* Использование системы компьютерной математики MAPLE для вычисления распределения магнитного поля в катушках флиппера. Препринт ПИЯФ–2771. Гатчина, 2008. 22 с.
6. *Слюсарь В. Н., Соловей В. А., Сумбатян А. А.* Драйвер тока пилообразной во времени формы для РЧ-катушки флиппера. Препринт ПИЯФ–2769. Гатчина, 2008. 14 с.
7. *Сумбатян А. А., Слюсарь В. Н., Окорочков А. И., Eckerlebe Н.* Способы и устройства реверсирования поляризации нейтронов. Приборы и техника эксперимента. 2009. № 3. С. 1–5.
8. *Слюсарь В. Н., Соловей В. А., Сумбатян А. А.* Использование тока треугольной формы в устройствах реверсирования поляризации нейтронов. Приборы и техника эксперимента. 2009. № 4. С. 1–4.
9. *Четвериков Ю. О., Пиядов В. В., Аксельрод Л. А., Григорьев С. В., Сумбатян А. А.* Нейтронное многоволновое спиновое эхо. Поверхность. 2011. № 7. С. 13–19.
10. *Касман Я., Колхидашвили М., Плешанов Н., Пусенков В., Слюсарь В., Сумбатян А., Сыромятников В., Ульянов В., Щебетов А., Хахалин С.* Двухмодовый рефлектометр на поляризованных нейтронах с анализом поляризации после образца. Препринт ПИЯФ–2213. Гатчина, 1997. 36 с.

## Цитируемая литература

1. *Окороков А. И., Рунов В. В., Волков В. И., Гукасов А. Г.* Векторный анализ поляризации нейтронов. Препринт ЛИЯФ–106. Л., 1974. 24 с.
2. *Окороков А. И.* Техника и методика малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов. Поверхность. 1997. № 7. С. 55–71.
3. *Драбкин Г. М., Окороков А. И., Щебетов А. Ф.* Поляризующее зеркало А. С. 437470. Бюллетень изобретений. 1975. № 25.
4. *Agatalyan M. M., Drabkin G. M., Sbitnev V. I.* Spatial Spin Resonance of Polarized Neutrons. A Tunable Slow Neutron Filter. Phys. Rep. 1988. V. 168, № 5. P. 265–303.
5. *Grigoriev S. V., Runov V. V., Okorokov A. I. et al.* Spatial Spin Resonance of Polarized Neutrons in Amplitude-Modulated Magnetic Fields. NIM. 1997. V. A389. P. 441–446.
6. *Егоров А. И., Лобашов В. М., Назаренко В. А. и др.* Получение, хранение и поляризация ультрахолодных нейтронов. Ядерная физика. 1974. Т. 19, № 2. С. 300–310.
7. *Ежов В. Ф., Иванов С. Н., Лобашев В. М., Назаренко В. А., Порсев Г. Д., Сердюк О. В., Серебров А. П., Тальдаев П. П.* Адиабатический метод раздельных осциллирующих полей. Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 24, № 1. С. 39–43.
8. *Алтарев И. С., Борисов Ю. В., Брандин А. Б., Егоров А. И., Ежов В. Ф., Иванов С. Н., Лобашов В. М., Назаренко В. А., Порсев Г. Д., Рябов В. Л., Серебров А. П., Тальдаев Р. Р.* Поиск электрического дипольного момента нейтрона. Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29. С. 794–796.
9. *Серебров А. П.* Исследования с ультрахолодными и холодными нейтронами на реакторе ВВР-М ([http://hepd.pnpi.spb.ru/publishing/pnpi\\_25\\_content\\_nrd.html](http://hepd.pnpi.spb.ru/publishing/pnpi_25_content_nrd.html)).
10. *Коломенский Э. А., Копелиович В. Б., Лобашов В. М., Назаренко В. А., Окороков А. И., Пирожков А. Н., Смотрицкий Л. М., Харкевич Г. И., Щебетов А. Ф.* Относительно роли триплетного состояния в реакции радиационного захвата теплового нейтрона протоном. Ядерная физика. 1977. Т. 25, № 2.
11. *Слюсарь В. Н., Князьков В. А., Пирожков А. Н.* Генератор синусоидального тока высокой частоты флиппера тепловых поляризованных нейтронов. Препринт ЛИЯФ–1164. Л., 1986. 20 с.

12. Сыромятников В. Г., Плешанов Н. К., Пусенков В. М., Щебетов А. Ф., Ульянов В. А., Касман Я. А., Хахалин С. И., Колхидашвили М. Р., Слюсарь В. Н., Сумбатян А. А. Четырехмодовый нейтронный рефлектометр. Препринт ПИЯФ–2619. Гатчина, 2005. 48 с.

13. *Grigoriev S. V., Okorokov A. I., Runov V. V.* Peculiarities of the Construction and Application of a Broadband Adiabatic Flipper of Cold Neutrons. Nucl. Instr. Meth. in Phys. Rev. A. 1997. V. 384. P. 451–456.