

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



С 348 ж
А-537

12/11

13 - 9396

1347/2-78

В.П.Алфименков, А.В.Андронов, А.И.Иваненко,
Ю.Д.Мареев, О.Н.Овчинников

УСТАНОВКА

ДЛЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ
НА РЕАКТОРЕ ИБР-30

1975

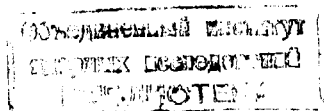
13 - 9396

В.П.Алфименков, А.В.Андросов, А.И.Иваненко,
Ю.Д.Мареев, О.Н.Овчинников

УСТАНОВКА

ДЛЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ

НА РЕАКТОРЕ ИБР-30



1. Введение

Медленные нейтроны широко используются при исследованиях в области ядерной физики и физики твердого тела. Очень ценную, иногда уникальную, информацию об особенностях взаимодействия, связанных с наличием у нейтрона спина, удается извлечь при использовании пучков поляризованных нейтронов, т.е. пучков с пространственно упорядоченной ориентацией нейтронных спинов. Работы по получению пучков поляризованных нейтронов были начаты с появлением первых мощных источников нейтронов - ядерных реакторов и ведутся до настоящего времени. Все методы поляризации медленных нейтронов основаны на использовании спиновой зависимости взаимодействия нейтронов с веществом, содержащим поляризованные частицы.

Длительное время в связи с трудностями в получении поляризованных ядерных мишеней поляризация нейтронов осуществлялась с использованием магнитного рассеяния нейтронов на магнитных моментах атомов намагниченных ферромагнетиков. Разработанные на этой основе методы¹ позволяют сравнительно легко получать пучки нейтронов с очень высокой поляризацией. Однако резкое ослабление магнитного рассеяния при возрастании энергии нейтронов не дает возможности использовать этот метод при энергии нейтронов выше ≈ 10 эВ. Интересная с точки зрения ядерной физики область резонансных нейтронов $/1 \div 10^4$ эВ/ оказывалась /в смысле возможностей получения поляризованных пучков/ методически не обес-

печенной. Этот пробел удалось восполнить в середине 60-х годов, когда в ЛНФ ОИЯИ был предложен ^{/2/} и реализован ^{/3/} новый метод поляризации пучков медленных нейтронов. В методе использована фильтрация нейтронного пучка через поляризованную протонную мишень. Его реализация оказалась возможной в связи с развитием динамического метода поляризации протонов, названного "методом солид-эффекта" ^{/4/}. Метод поляризации нейтронов пропускаем через поляризованную протонную мишень подробно изложен в работе ^{/5/}. Мы приведем лишь основные соображения, касающиеся поляризации резонансных нейтронов, необходимые для описания работающей с 1974 года в ЛНФ ОИЯИ модернизированной установки для поляризации пучков таких нейтронов.

Метод основан на использовании сильной спиновой зависимости взаимодействия медленных нейтронов с протонами. В интересующей нас области энергий определяющим процессом в n-p взаимодействии является S-рассеяние, т.е. рассеяние, идущее без участия орбитального момента количества движения. Этот процесс идет по двум спиновым каналам: $J=0$ и $J=1$, и полностью определяется соответствующими сечениями взаимодействия σ_s и σ_t , называемыми сечениями синглетного и триплетного рассеяния. В рассматриваемой области энергий σ_s, σ_t от энергии практически не зависят и соответственно равны 70,5 и 3,6 барн/см., например, ^{/6/}. Поскольку синглетное сечение значительно превосходит триплетное, фильтрация неполяризованного пучка нейтронов через поляризованную протонную мишень приведет к относительному обогащению пучка нейтронами со спином, параллельным поляризации протонов в мишени. Таким образом, фильтрованный пучок нейтронов окажется поляризованным в направлении протонной поляризации мишени.

Несложное рассмотрение процесса прохождения пучка неполяризованных нейтронов через протонную мишень толщиной t с плотностью протонов n и протонной поляризацией f_p дает следующие выражения для пропускания мишени T и поляризации фильтрованного пучка f_n :

$$T = e^{-n\sigma_0 t} \text{ch} f_p n \sigma_{pol} t,$$

$$f_n = \text{th} f_p n \sigma_{pol} t. \quad /1/$$

Здесь $\sigma_0 = 1/4\sigma_s + 3/4\sigma_t = 20,4$ барн - полное сечение n-p-рассеяния в отсутствие поляризации, а $\sigma_{pol} = 1/4(\sigma_s - \sigma_t) = 16,7$ барн - так называемое поляризационное сечение. Если наряду с протонами в мишени присутствуют и другие ядра, которые не поляризованы, то в выражении для T в показателе экспоненциального множителя $n\sigma_0$ следует заменить на суммарное по всем ядрам значение $\sum_i n_i \sigma_i$. Из соотношений /1/ следует, что с увеличением толщины мишени поляризация фильтрованного пучка возрастает, приближаясь к 1, а его интенсивность падает. Это приводит к существованию оптимальной толщины мишени, обеспечивающей проведение измерений на поляризованном пучке с максимальной статистической точностью. Для исследуемых обычно эффектов, пропорциональных нейтронной поляризации, толщина мишени оптимальна при максимальном значении произведения $f_n^2 T$. Оптимальная толщина t_{opt} зависит от соотношения между $n\sigma_{pol}$ и $\sum_i n_i \sigma_i$ и от протонной поляризации f_p .

Информацию об особенностях взаимодействия поляризованных нейтронов с веществом удобно извлекать из сопоставления результатов, полученных для двух различных ориентаций поляризации пучка. Обычно используются поляризации параллельная и антипараллельная по отношению к направлению магнитного поля на образце. Такое изменение направления поляризации пучка называется реверсом и осуществляется специальными методами. Если не предъявлять повышенных требований к стабильностям характеристик пучка и регистрирующей аппаратуры, то для проведения с поляризованным пучком точных экспериментов реверс поляризации должен проводиться быстро. Известны два метода реверса поляризации пучка немоноэнергетических медленных нейтронов. Первый метод ^{/1/}, разработанный для нейтронов малых энергий, использует адиабатический пространственный поворот поляризации пучка в спиральном магнитном поле. Этот метод обеспечивает достаточно быстрый реверс /за несколько секунд/, однако с увеличением энергии нейтронов быстро растут технические трудности его реализации. Во втором методе ^{/7/} используется присущая методу

солид-эффекта возможность изменять знак протонной поляризации, т.е. получать поляризацию, направленную как параллельно, так и антипараллельно полю на протонной мишени. Здесь реверсирование поляризации пучка проводится без ее пространственного поворота и осуществляется одинаково хорошо для нейтронов всех энергий. Этот метод, однако, требует для реверсирования поляризации пучка сравнительно много времени ≈ 1 час/, что затрудняет проведение с таким пучком точных экспериментов. В описываемой установке применен новый метод реверса нейтронной поляризации, свободный от недостатков использовавшихся ранее методов. Реверс осуществляется за счет поворота на 180° работающей протонной мишени вместе с магнитом и участками магнитного канала. Метод подробно рассмотрен ниже, в разделе, посвященном описанию системы реверса поляризации.

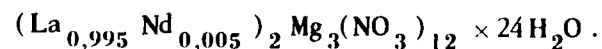
Во избежание деполяризации нейтронного пучка случайными магнитными полями на пути от поляризатора до объекта взаимодействия пучок должен проводиться в специальном магнитном канале. В этом канале создается магнитное поле /ведущее поле/, направленное вдоль поляризации пучка и заметно превосходящее возможные случайные поля.

Длительное пребывание обслуживающего персонала вблизи установки для поляризации нейтронного пучка недопустимо, поскольку установка работает в зоне повышенной радиации. Поэтому должна быть обеспечена возможность дистанционного управления установкой и контроля за ее работой.

Установка расположена на одном из нейтронных каналов импульсного реактора ИБР-30, на расстоянии ≈ 30 м от реактора. Она включает в себя поляризатор нейтронов, поляризованную протонную мишень и систему, обеспечивающую создание ведущего поля и реверса поляризации нейтронного пучка. Длина пролетной базы на канале, оборудованном поляризатором нейтронов, достигает 120 м.

II. Поляризованная протонная мишень

Основные требования к поляризованной протонной мишени - поляризатору пучка медленных нейтронов сводятся к обеспечению достаточно высокой протонной поляризации и приемлемого соотношения между $p\sigma_{pol}$ и $\sum p_i\sigma_i$. Поскольку протонное поляризационное сечение относительно велико, последнее требование - не очень жесткое. Оно допускает применение в качестве материала протонной мишени веществ со сравнительно большим количеством других /примесных/ ядер. Для целей нейтронной поляризации вполне приемлемой оказывается "простейшая" поляризованная протонная мишень, использующая монокристалл двойного лантан-магниевого нитрата с небольшой примесью неодима.



В этом монокристалле, называемом обычно ЛМН, методом солид-эффекта сравнительно легко удается достичь поляризации протонов кристаллизационной воды $f_p = 0,6 \div 0,7$. Хотя примесных ядер в ЛМН почти вдвое больше, чем протонов, это существенно не портит характеристик поляризатора, поскольку основное ослабление пучка идет на протонах /вклад $p\sigma_0$ в $\sum p_i\sigma_i$ составляет $\approx 70\%$ /. Оптимальная толщина поляризованной протонной мишени из ЛМН, предназначенной для поляризации резонансных нейтронов, $t_{opt} \approx 17$ мм. При этом поляризация фильтрованного пучка примерно равна поляризации протонов в мишени, а его интенсивность составляет $15 \div 20\%$ от интенсивности падающего пучка^{1/5}. Для достижения методом солид-эффекта высокой протонной поляризации охлажденный до температуры $1^\circ K$ монокристалл помещают в однородное магнитное поле и облучают интенсивным потоком квантов СВЧ излучения. Частота и поляризация СВЧ излучения должны соответствовать одному из запрещенных переходов в спиновой системе протон-атом парамагнитной примеси /в нашем случае Nd/. Высокая протонная поляризация достигается при насыщении такого перехода. Знак протонной поляризации

определяется тем, какой из двух возможных запрещенных переходов насыщается.

Рассмотрим отдельные узлы поляризованной протонной мишени: кристалл, магнит, криостат, СВЧ систему и систему контроля поляризации.

Кристалл

Монокристалл ЛМН - ромбоэдрический и вырастает в водном растворе в виде плоской шестиугольной пластины с большой гранью, перпендикулярной кристаллической оси z' . Свойства монокристалла, определяющие условия осуществления в нем солид-эффекта, сильно анизотропны /изменяются с изменением угла между осью z' и направлением магнитного поля/. Это приводит к тому, что при наборе мишени из нескольких монокристаллов для одновременного осуществления в них солид-эффекта необходимо с высокой точностью $\pm 0,5^\circ$ обеспечить параллельность осей z' отдельных кристаллов. Максимальная поляризация протонов в ЛМН при заданной величине магнитного поля достигается при наложении поля перпендикулярно оси z' кристалла. Применительно к использованию ЛМН для получения нейтронного пучка с поперечной поляризацией это очень удобно, поскольку позволяет изготавливать мишень из цельного монокристалла минимальных размеров. Действительно, нужная толщина монокристаллической пластины невелика ≈ 20 мм/, а большая площадь пластины может быть использована для пропускания широкого пучка. При такой ориентации монокристалла в магнитном поле с напряженностью 20 кЭ необходимая для осуществления солид-эффекта длина волны СВЧ излучения составляет ≈ 4 мм.

Магнит

Магнитное поле с напряженностью ≈ 20 кЭ создается на мишени специальным электромагнитом с диаметром полюсов ≈ 260 мм и межполюсным зазором 85 мм. Магнит имеет горизонтальное поле и С-образную форму ярма

для удобства расположения на нем криостата с мишенью и проводки нейтронного пучка. Стабильность магнитного поля не хуже $2 \cdot 10^{-4}$ и обеспечивается стабилизацией тока магнита стандартным устройством типа БТ-6. Имеется возможность дистанционного контроля и регулирования тока магнита. Магнит расположен на нейтронном пучке таким образом, что ось пучка проходит через центр магнитного зазора перпендикулярно направлению магнитного поля. В средней части зазора шиммированием создана область, размерами 20 мм вдоль пучка и 50×100 мм² перпендикулярно пучку, с неоднородностью не хуже $3 \cdot 10^{-4}$. С уменьшением перпендикулярных пучку размеров области однородность поля быстро улучшается. Так, в области 50×70 мм² неоднородность поля не превосходит 10^{-4} . Размерами области однородного поля задаются максимально возможные в установке размеры поляризованной протонной мишени. Магнит установлен на горизонтальной поворотной платформе, обеспечивающей возможность поворота магнита на 180° при реверсе поляризации нейтронного пучка.

Криостат

Криостат для охлаждения протонной мишени должен обеспечивать температуру $\approx 1^\circ$ К в условиях повышенной тепловой нагрузки за счет подачи на мишень СВЧ мощности. Этим требованиям удовлетворяет криостат с жидким ^4He с достаточно производительной системой откачки паров гелия. В выбранном нами методе реверса поляризации нейтронного пучка должна быть обеспечена возможность поворота работающего криостата на 180° . Поскольку вращать вместе с криостатом тяжелые и громоздкие насосы системы откачки гелия не представляется возможным, необходимо поворотное соединение линии откачки криостата с насосами.

Схема использованного нами криостата представлена на рис. 1. Криостат состоит из заключенных в общий вакуумный кожух /1/ азотной и двух гелиевых ванн. Наружная, азотная ванна /2/ емкостью ≈ 50 л подвешена

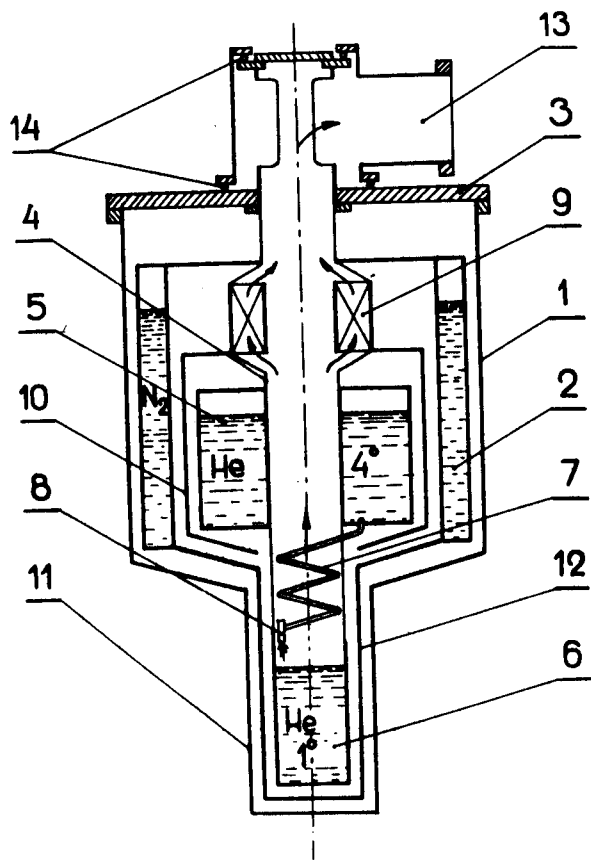


Рис. 1. Схема криостата: 1 - вакуумный кожух, 2 - азотная ванна, 3 - плита криостата, 4 - линия откачки He, 5 - 4°-ная гелиевая ванна, 6 - 1°-ная гелиевая ванна, 7 - змеевик, 8 - дросселирующий вентиль, 9 - теплообменник, 10 - медный экран, 11 - сосок из алюминиевого сплава, 12 - экран из алюминиевого сплава, 13 - патрубков, 14 - сальниковые уплотнители.

к плите /3/ криостата и защищает гелиевые ванны от теплопритока снаружи /как излучательного, так и идущего по конструкционным элементам/. На линию откачки /4/, изготовленную из нержавеющей стали, подвешена 4°-ная гелиевая ванна /5/. В эту ванну, выход из которой подсоединен к газгольдеру, заливается ≈ 25 л жид-

кого гелия. В нижней части линии откачки расположена ванна /6/ небольшой емкости [≈ 1 л], заполненная испаряющимся под откачкой гелием и предназначенная для размещения резонатора с монокристаллом ЛМН. Жидкий гелий в ванну /6/ непрерывно поступает из ванны /5/ по змеевику /7/, на конце которого имеется управляемый снаружи криостата дросселирующий вентиль /8/. Змеевик подачи гелия расположен в линии откачки и служит для предварительного охлаждения поступающего в ванну жидкого гелия откачиваемыми из ванны парами. С помощью дросселирующего вентиля можно уравнивать потери гелия из ванны /6/ за счет испарения и подпитку жидкостью из ванны /5/. Таким образом, при неизменной тепловой нагрузке можно добиться постоянства уровня гелия в откачиваемой ванне. При изменении тепловой нагрузки и неизменном сопротивлении дросселирующего вентиля уровень гелия в ванне, естественно, будет изменяться. Однако в выбранной нами конструкции криостата существует тепловая связь между ваннами /5/ и /6/, стабилизирующая уровень гелия в ванне /6/. Действительно, при колебании тепловой нагрузки ванны /6/ уровень гелия в ней будет меняться так, что за счет изменения действующей длины теплового моста между ваннами будет возникать компенсирующее изменение в теплопередаче по мосту. Это означает, что небольшие колебания тепловой нагрузки ванны /6/ при фиксированном сопротивлении дросселирующего вентиля не приводят к переполнению /или осушению/ ванны, а вызывают лишь переход уровня гелия в другое стационарное состояние и соответствующее изменение тепловой нагрузки ванны /5/. Такая стабилизация уровня гелия в откачиваемой ванне очень существенна, поскольку позволяет работать без подстройки дросселирующего вентиля в условиях не очень стабильной тепловой нагрузки от СВЧ излучения. В средней части линии откачки /4/ над ванной /5/ имеется теплообменник /9/, предназначенный для уменьшения тепловой нагрузки ванны /5/ за счет теплоемкости откачиваемого из ванны /6/ газообразного гелия. Этой же цели служит и подсоединенный к теплообменнику медный экран /10/, расположенный между азотной ванной и ванной /5/. Ванна /6/ защищена от теплопритока со стороны

соска /11/ вакуумного кожуха экраном /12/, подсоединенным к азотной ванне. Сосок /11/ и экран /12/ изготовлены из алюминиевого сплава, мало ослабляющего нейтронный пучок, и имеют толщины стенок 3 и 1 мм соответственно. Ванна /6/ - медная, с толщиной стенок 1 мм. Для размещения в ограниченном зазоре магнита протонной мишени максимальных размеров зазоры между соском /11/, экраном /12/ и ванной /6/ сделаны малыми /1,5±2 мм/. Внутренний диаметр ванны /6/, ограничивающий размер протонной мишени, составляет 65 мм. Подсоединение линии откачки гелия вращающегося криостата к неподвижной системе откачки осуществляется через патрубок /13/ на герметичных сальниковых уплотнениях /14/. Линия выхода гелия из ванны /5/ связана с газгольдером гибким шлангом. Уровни гелия в ваннах контролируются поплавковыми уровнемерами. Откачка паров гелия из криостата производится последовательно включенными насосами БН-4,5 /скорость откачки $\approx 4,5 \cdot 10^3$ л/с/ и ВН-6.

Криостат обеспечивает возможность поддержания температуры $\approx 0,9^\circ K$ при СВЧ нагрузке $100 \div 200$ мВт в течение суток без доливки гелия. Во время доливки гелия в ванну /5/ режим работы откачиваемой ванны практически не меняется. При работе криостата дистанционно контролируются: 1/ давления в вакуумном кожухе и в откачиваемой ванне, 2/ количество испаренного из ванн гелия, 3/ достижение уровнем гелия в откачиваемой ванне допустимых минимального и максимального значений.

СВЧ система

Для насыщения запрещенных переходов служит СВЧ система, состоящая из СВЧ генератора, волноводного тракта, резонатора с кристаллом ЛМН и устройств контроля и стабилизации частоты. В качестве генератора используется лампа обратной волны /ЛОВ/ 4-миллиметрового диапазона с выходной мощностью в несколько

ватт. Ширина линии, соответствующая запрещенному переходу, очень мала /для ЛМН $\Delta\nu/\nu \approx 3 \cdot 10^{-4}$ /. В связи с этим для получения высокой поляризации мишени требуются стабильное и однородное по всему объему кристалла магнитное поле и стабильное по частоте СВЧ излучение.

Частота генератора стабилизируется по опорному резонатору. Схема стабилизации аналогична использованной в работе^{/8/} и обеспечивает стабильность частоты не хуже 10^{-4} . Для уменьшения потерь СВЧ энергии в волноводном тракте основная часть тракта выполнена в виде круглого медного волновода, по которому СВЧ мощность передается волной типа TE_{01} . Внутренний диаметр круглого волновода равен 10 мм. Преобразование волны TE_{10} в прямоугольном волноводе в волну TE_{01} в круглом волноводе осуществляется специальным преобразователем^{/9/}, изготовленным из меди методом гальванопластики. В конце круглого волновода, перед резонатором, аналогичным преобразователем осуществляется обратное преобразование волны. Полученная после обратного преобразования волна подается в резонатор по отрезку прямоугольного волновода основного сечения /1,8 x 3,6 мм²/. Теплоприток в криостат по стенке круглого волновода уменьшен за счет введения участков, изготовленных из тонкостенных нержавеющей трубок. Кристалл ЛМН помещается в медный ненастраиваемый прямоугольный резонатор с размерами 57x70x25 мм³. Фиксация кристаллов в резонаторе осуществляется тефлоновыми распорками. Для удобства первоначального запуска мишени в волноводную линию включен направленный ответвитель, отбирающий $\approx 10\%$ отраженной мощности. Это дает возможность находить положение ЭПР-линии Nd^{3+} кристалла ЛМН и осуществлять быструю настройку на нужный запрещенный переход. В связи со сложностью изменения частоты ЛОВ настройка производится изменением величины магнитного поля. При рассеиваемой в резонаторе СВЧ мощности около 100 мВт протонная поляризация $f_p = 60\%$ достигается за 40 ÷ 60 минут. Мощность СВЧ генератора и работа устройства стабилизации частоты контролируются дистанционно.

Система контроля поляризации

Поляризацию мишени необходимо контролировать как при работе с мишенью, так и в процессе запуска. При использовании поляризованной протонной мишени в качестве поляризатора нейтронного пучка имеется удобная возможность контроля поляризации по изменению прозрачности мишени для нейтронного пучка, определяемой по скоростям счета мониторов, расположенных перед мишенью и после нее. Действительно, из соотношений /1/ легко получить выражение, связывающее изменение прозрачности мишени с поляризацией фильтрованного пучка:

$$f_n = \sqrt{1 - \left(\frac{T_0}{T}\right)^2}, \quad /2/$$

где T_0 - прозрачность мишени в отсутствие протонной поляризации и T - прозрачность мишени с протонной поляризацией f_p , приводящей к поляризации фильтрованного пучка f_n . Протонная поляризация из известной поляризации пучка может быть получена с помощью соотношений /1/. При этом, естественно, должны быть известны характеристики протонной мишени: n , σ_{pol} , t . В случае малых поляризаций $T \approx T_0$ и, с введением обозначения $\Delta T = T - T_0$, соотношение /2/ может быть переписано:

$$\frac{\Delta T}{T} \approx \frac{1}{2} f_n^2. \quad /3/$$

Соотношение /3/ показывает, что контроль этим методом малых поляризаций неудобен, поскольку требует измерений пропускания с высокой точностью. В то же время, как указано выше, имеется необходимость контроля именно малых поляризаций при запуске мишени. Такой контроль осуществляется с помощью наблюдения сигнала протонного магнитного резонанса от кристалла ЛМН. Сигнал протонного магнитного резонанса регистрируется при помощи схемы Q-метра с последовательным контуром /10/. Плоская радиочастотная катушка Q-метра размещена в резонаторе, непосредственно над верхней гранью кристалла, и связана с находящейся снаружи криостата электронной схемой через настроенный коаксиальный кабель. При малых поляризациях для повышения чувстви-

тельности Q-метра используется запись сигнала Q-метра на самописце. После накачки поляризации возросший сигнал Q-метра наблюдается непосредственно на экране осциллографа. Этот сигнал, легко наблюдаемый дистанционно, используется для оперативного контроля протонной поляризации в процессе работы с мишенью на пучке нейтронов. Ценным качеством ЯМР-метода контроля протонной поляризации является его чувствительность к знаку поляризации. Среднюю по объему мишени поляризацию этим методом измерять трудно. Поэтому точные измерения поляризации в рабочих условиях проводились по изменению прозрачности мишени.

Система реверса поляризации пучка

Суть использованного нами метода реверса поляризации нейтронного пучка проиллюстрирована схемой, приведенной на рис. 2. На схеме представлен вид сверху

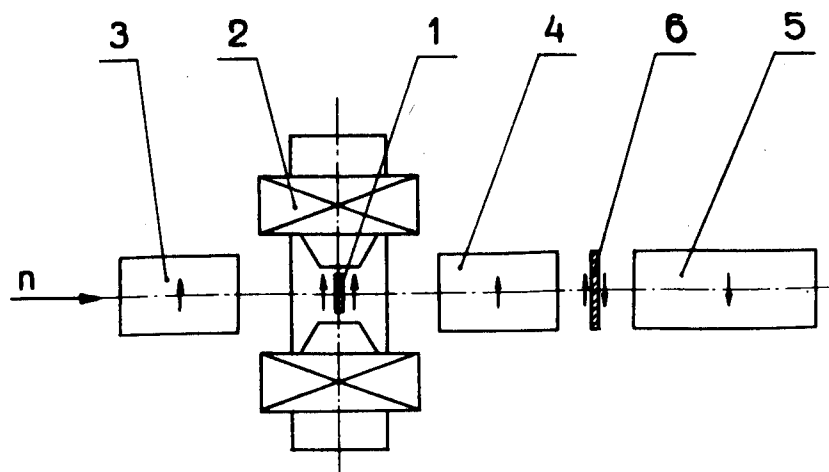


Рис. 2. Схема системы реверса поляризации пучка: 1 - поляризованная протонная мишень; 2 - электромагнит; 3, 4, 5 - участки магнитного канала; 6 - токовая фольга. Стрелками обозначены направления магнитных полей и нейтронного пучка.

на поляризованную протонную мишень /1/, расположенную в магнитном зазоре электромагнита /2/, участки магнитного канала /3, 4, 5/ и токовую фольгу /6/. Малыми стрелками указаны направления магнитного поля в разных частях установки, а большой стрелкой - направление нейтронного пучка. неполяризованный пучок через участок магнитного канала /3/ доходит до поляризованной протонной мишени. Пройдя через поляризованную протонную мишень, пучок поляризуется и попадает в участок магнитного канала /4/. В поле этого участка, совпадающем по направлению с полем в зазоре электромагнита, пучок адиабатически доводится до токовой фольги. Токовая фольга расположена посередине между участками магнитного канала /4/ и /5/. Текущий через фольгу ток /вертикально, сверху вниз/ создает между имеющими антипараллельные поля участками магнитного канала /4/ и /5/ область резкого изменения направления магнитного поля. Эту область поля поляризованный пучок проходит неадиабатически /не изменяя направления поляризации/ и попадает в участок магнитного канала /5/ с направлением поляризации, совпадающим с направлением протонной поляризации в мишени. Для реверса поляризации работающая протонная мишень вместе с магнитом поворачивается на 180° вокруг вертикальной оси, перпендикулярной направлению пучка и проходящей через середину мишени. Одновременно поворачиваются и закрепленные на магните участки магнитного канала /3/ и /4/ и токовая фольга. В результате такого поворота направление поляризации протонной мишени /вместе с направлением поля магнита/ изменится на обратное. Участок магнитного канала /4/ и токовая фольга переместятся в область неполяризованного пучка, где они на пучок не влияют, а к участку магнитного канала /5/ подойдет участок /3/. Теперь пучок, поляризованный мишенью в обратном направлении, адиабатически проводится в магнитном канале, имеющем по всей длине поле того же направления, что и поле электромагнита. Таким образом, поляризация пучка окажется реверсированной. В этом методе реверс поляризации пучка резонансных нейтронов от их энергии не зависит. Время, необходимое для реверса, задается временем поворота системы и может

быть сделано достаточно малым. При проведении, с использованием этого метода реверса поляризации, точных экспериментов может мешать "аппаратурная" асимметрия, связанная с поворотом мишени. Асимметрия проявляется в скоррелированных с поворотом мишени изменениях интенсивности пучка и величины его поляризации. Она возникает за счет возможного небольшого отличия угла поворота от 180° , а также за счет возможных неоднородностей пучка и мишени. Эта асимметрия, однако, не представляет серьезной опасности, поскольку, с одной стороны, при тщательной наладке установки она может быть сделана достаточно малой и, с другой стороны, ее можно экспериментально учесть с использованием упоминавшейся выше возможности изменять знак протонной поляризации мишени.

Конструктивно система реверса поляризации нейтронного пучка осуществлена следующим образом. Поляризованная протонная мишень размещена в криостате, жестко закрепленном на ярме электромагнита. К ярму электромагнита с двух сторон прикреплены участки магнитного канала длиной 600 мм каждый, в которых создается магнитное поле ≈ 200 Э, по направлению совпадающее с полем в зазоре электромагнита. Размеры межполюсных зазоров участков магнитного канала составляют 150 мм по горизонтали и 300 мм по вертикали. На конце одного из участков закреплена алюминиевая токовая фольга с размерами 300 мм по горизонтали, 400 мм по вертикали и толщиной 1 мм. Через фольгу течет ток величиной 2000 А. Электромагнит нижней плоскостью ярма установлен на поворотную платформу и может поворачиваться на 180° вокруг вертикальной оси, проходящей через центр магнитного зазора. Поворот платформы осуществляется через редуктор специальным электроприводом. Привод обеспечивает поворот на 180° системы, имеющей суммарный вес около 8 т, за время ≈ 10 с. Точность угла поворота не хуже $\pm 0,2^\circ$.

III . Заключение

Первые эксперименты на поляризованном нейтронном пучке, полученном с помощью описанной выше уста-

новки, проводились с использованием монокристалла ЛМН площадью $\approx 25 \text{ см}^2$ и толщиной $\approx 15 \text{ мм}$. Средняя по объему кристалла протонная поляризация, измеренная по изменению прозрачности мишени для пучка нейтронов, достигала $60 \div 70\%$. Контроль и управление работой всей установки осуществлялись с дистанционного пульта, расположенного на расстоянии $\approx 1 \text{ км}$ от установки. Стабильность поддержания протонной поляризации мишени при ручной коррекции условий СВЧ накачки дежурным оператором оказалась удовлетворительной. Потеря интенсивности нейтронного пучка в конструктивных элементах поляризатора /криостат, резонатор, фольга, воздух/ составляет $40 \div 50\%$. Для повышения стабильности мишени подготовлена система стабилизации поля электромагнита по протонному резонансу. Планируется увеличение площади мишени до $50 \div 60 \text{ см}^2$.

Проведены предварительные исследования аппаратурной асимметрии, связанной с реверсом поляризации пучка. Измерялось изменение прозрачности неполяризованной мишени для нейтронов при повороте магнита. Пучок нейтронов при этом был сколлимирован до размеров, заведомо перекрывааемых мишенью. Оказалось, что изменение прозрачности зависит от положения коллиматора и, при фиксированной энергии нейтронов, выбором соответствующего положения коллиматора может быть сделано достаточно малым. Оптимальные положения коллиматора для нейтронов разных энергий оказались различными. Например, минимизация асимметрии для нейтронов с энергией в несколько кэВ до $0,1\%$ приводила к появлению асимметрии $\approx 1\%$ для нейтронов с энергией $\approx 1 \text{ эВ}$. Это явление, по-видимому, связано с неоднородностями пучка и мишени и со сложной зависимостью от энергии нейтронов прозрачности мишени и входящих в пучок конструктивных элементов. Аналогичные измерения, проведенные с поляризованной мишенью, показали, что поляризация протонов мишени заметно на асимметрию не влияет. В дальнейшем для уменьшения асимметрии планируется работа по улучшению однородности кристалла ЛМН и нейтронного пучка.

На описанном выше пучке поляризованных медленных нейтронов начаты исследования спиновой зависимости

взаимодействия нейтронов с ядрами атомов редкоземельных элементов^{/11/}.

В заключение авторы благодарят руководство Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ за интерес к работе, а также всех сотрудников лаборатории, принимавших участие в создании этой сложной установки, в особенности Б.И.Аполлонова, С.И.Неговелова, Б.А.Родионова и М.С.Язвницкую за постоянную практическую помощь в работе.

Литература

1. Ю.Г.Абов и др. Поляризованные медленные нейтроны, Атомиздат, М., 1966.
2. Ю.В.Таран, Ф.Л.Шапиро. ЖЭТФ, 44, 2185 /1963/.
3. P. Draghicescu et al. Phys.Lett., 12, 334 (1964).
4. К.Джеффрис. Динамическая ориентация ядер, Мир, М., 1965.
5. В.И.Лушиков и др. ЯФ, 10, 1178 /1969/.
6. С. де Бенедетти. Ядерные взаимодействия, Атомиздат, М., 1968.
7. G.A.Keyworth et al. Phys.Rev., C, 8, 2352 (1973).
8. Л.Б.Парфенов, Б.С.Неганов. Препринт ОИЯИ, 13-4143, Дубна, 1968.
9. P.H.Wolfert. IEEE Transaction, MMT-11, 430 (1963).
10. М.Н.Дражев, А.И.Иваненко. Препринт ОИЯИ, P13-7176, Дубна, 1973.
11. В.П.Алфименков и др. Препринт ОИЯИ, P3-8599, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 декабря 1975 года.