

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА
ЭКСПЕРИМЕНТА

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

2

МОСКВА · 1978

ПРОТОННАЯ ПОЛЯРИЗОВАННАЯ «ЗАМОРОЖЕННАЯ» МИШЕНЬ

Н. С. БОРИСОВ, Э. И. БУНЯТОВА, Ю. Ф. КИСЕЛЕВ, В. Н. МАТАФОНОВ,
Б. С. НЕГАНОВ, Ю. А. УСОВ

Описаны принципы работы и устройство «замороженной» поляризованной мишени, в которой поляризация $\pm 98 \pm 2\%$ протонов пропандиола с примесью Cg^V , полученная динамическим методом в поле 26,9 кГс и температуре 0,3 К, длительное время сохраняется в более слабом ≈ 10 кГс поле за счет охлаждения мишени до температуры 0,035 К.

1. ВВЕДЕНИЕ

В лаборатории ядерных проблем ОИЯИ с октября 1975 г. действует на пучке синхроциклотрона поляризованная протонная «замороженная» мишень [1]. В данной работе рассматриваются общие принципы работы «замороженной» мишени и ее устройства, приводятся описание конструктивного исполнения и характеристики криогенной и измерительной аппаратуры, полученные в реальных условиях ядерного эксперимента.

«Замороженная» поляризованная протонная мишень отличается от обычной поляризованной мишени тем, что вещество мишени после достижения высокой степени поляризации динамическим методом охлаждается до температуры ниже 0,1 К. «Замораживание» неравновесной поляризации обусловлено значительным возрастанием времени спин-решеточной релаксации ядер при сверхнизких температурах. Это позволяет прекращать динамическую поляризацию и во время экспозиции мишени в эксперименте сохранять ее стабильное значение $\sim 100\%$ в более слабом и менее однородном магнитном поле по сравнению с тем, которое требуется при динамической поляризации. В результате противоречивые требования высокой однородности поля в большом объеме при поля-

ризации и большой апертуры при регистрации вторичных частиц могут быть удовлетворены либо использованием двух различных магнитов, либо одного с изменяющимися параметрами. В обоих случаях магнитная система проще и дешевле, чем в мишени с непрерывной динамической поляризацией.

Первые предложения по созданию «замороженной» мишени [2] появились в связи с внедрением нового метода глубокого охлаждения вещества — метода растворения ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ [3]. Развитие техники метода растворения и поиск новых веществ для поляризованных мишеней [4 ÷ 6] позволили приступить к реализации этой идеи.

Рассматриваемая «замороженная» мишень не предназначена для перевода в магнитное поле другой геометрии, поскольку это не требовалось условиями ядерного эксперимента. Разработка выполнена в основном для изучения возможностей криогенной аппаратуры в условиях эксперимента на ускорителе и исследования различных характеристик самой «замороженной» мишени. Полученный опыт используется при проектировании мишени большого объема. Вместе с тем достигнутые параметры описываемой установки позволяют успешно применять ее в ядерных экспериментах [7].

2. УСТРОЙСТВО МИШЕНИ

Криостат. Общая схема «замороженной» поляризованной протонной мишени представлена на рис. 1. Гелиевый криостат 1 служит для охлаждения катушек сверхпроводящего магнита 2 и для обеспечения работы ступени растворения 3. Вся низкотемпературная часть рефрижератора растворения, включающая ступень растворения и тракты откачки ^3He и ^4He 4 и 5, может быстро демонтироваться и выниматься из криостата в случае профилактики или ремонта. Экранировка гелиевых емкостей осуществляется негерметичным экраном 6, присоединенным к емкости с жидким азотом 7. Верхняя гелиевая емкость имеет индиевое уплотнение, и таким образом, открывается доступ к системам управления и контроля сверхпроводящего магнита 8, расположенным над верхней катушкой. Для уменьшения поглощения вторичных частиц выходное окно 9 в азотном экране выполнено из медной фольги толщиной 20 мкм, выходное окно вакуумного кожуха 10 из майлара толщиной 200 мкм. Окна имеют раствор 120° в горизонтальной плоскости. Основные габариты криостата и магнита (в мм) таковы: наружный диаметр сверхпроводящих катушек — 290, внутренний — 130, высота каждой катушки — 50, зазор для прохода пучка — 30, полная высота криостата от верхнего фланца до дна — 1300, диаметр вакуумного кожуха —

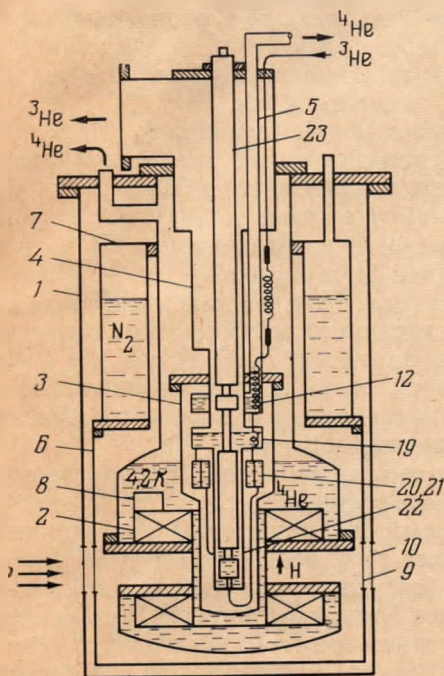


Рис. 1. Общая схема мишени

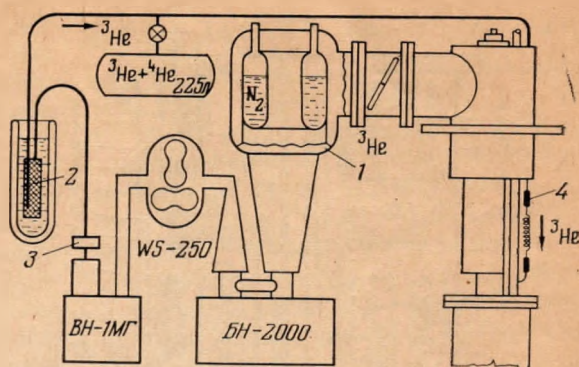


Рис. 2. Система циркуляции ^3He

400. Объем азотной емкости 15, объем гелиевых емкостей 16, полезный объем гелия 12 л.

Система циркуляции ^3He . Система циркуляции ^3He рефрижератора растворения изображена на рис. 2. Группа насосов, состоящая из диффузионного бустерного насоса БН-2000 (2000 л/с), ротационного механического насоса RUVAC WS-250 (70 л/с) и форвакуумного механического насоса ВН-1МГ (18 л/с), включенных последовательно, обеспечивает молярную скорость циркуляции ^3He в системе до $5 \cdot 10^{-3}$ моль/с. Для предотвращения загрязнения тракта откачки ^3He маслом от насоса БН-2000 использована охлаждаемая жидким азотом ловушка 1 для паров масла. Поскольку рабочее давление ^3He на входе БН-2000 изменяется в пределах $4 \cdot 10^{-2} \div 10^{-2}$ тор, то специальная изоляция азотной емкости ловушки не предусмотрена.

Возвращаемый в криостат ^3He очищается от паров и продуктов разложения масла и воздуха, поступающего из наружных течей. Наружная часть системы откачки представляет собой 3 включенных последовательно ловушки 2, охлаждаемые жидким азотом (на схеме они условно объединены). Кроме того, у входа механического ВН-1МГ установлен фильтр 3, поглощающий масляный «туман». 1-я из охлаждаемых ловушек наполнена медной стружкой, а 2 последние активированным углем. 2-я ловушка имеет большое отношение площади к толщине слоя поглотителя, а 3-я — примерно в тысячу раз меньше. Объемы 2-й и 3-й ловушек соответственно 0,8 и 0,2 л. Такая конструкция предотвращает блокирование системы очистки в случае, если 1-я ловушка пропустит часть паров и продуктов разложения масла, а с другой стороны, обеспечивает полную очистку ^3He от всех примесей, за исключением водорода. Для очистки от водорода была добавлена внутренняя си-

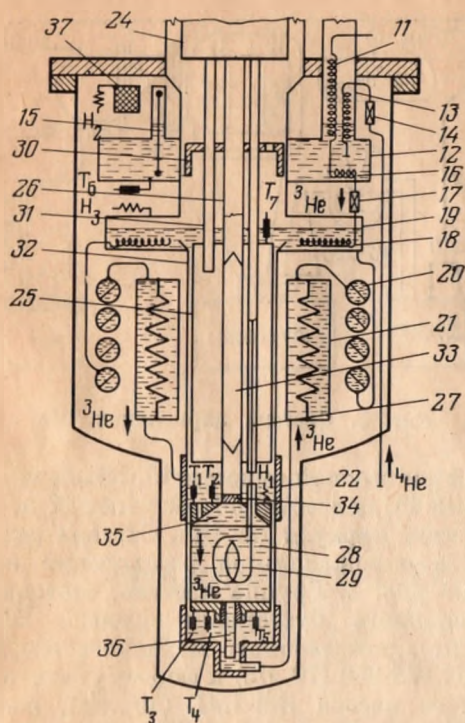


Рис. 3. Схема ступени растворения

стема очистки 4, представляющая собой 5 небольших угольных ловушек, вставленных в разрывы змеевиков охлаждения ^3He (на рис. 2 указаны 2 ловушки). После установки такой внутренней системы очистки блокирование линии возврата ^3He не наблюдалось при длительности непрерывной работы без отогревания криостата не менее 100 ч.

Ступень растворения. Устройство ступени растворения схематично изображено на рис. 1 и более подробно с теми же цифровыми обозначениями на рис. 3. ^3He после предварительного охлаждения до 4 К поступает в змеевик 11, расположенный в тракте откачки паров ^4He из гелиевой ванны, предназначенной для конденсации ^3He (конденсатор 12). Тракт откачки представляет собой виток спирали, выполненный из нержавеющей трубки ϕ 10 мм. Диаметр витка 100, расстояние между концами трубки по вертикали 30 мм. Внутри трубки расположены 2 змеевика: один для предварительного охлаждения ^3He — 11, другой змеевик — 13 — для охлаждения жидкого ^4He , который поступает в ванну-конденсатор из криостата по линии питания (капилляр с внутренним ϕ 0,3 мм и игольчатый клапан 14). Тракт откачки такой конструкции позволяет уменьшить тепловую мощность от поступающих в ванну-конденсатор ^3He и ^4He и стабилизирует заполнение

этой ванны жидким ^4He . Стабилизация обусловлена уменьшением поверхности змеевиков в паровой фазе и укорочением теплового моста до фланца ступени при повышении уровня ^4He в тракте откачки. Это препятствует как чрезмерному переполнению, так и осушению ванны, если сопротивление игольчатого клапана установлено в подходящих данному режиму пределах. Были подобраны 2 положения иглы клапана, соответствующие режиму динамической поляризации и замороженному режиму, при которых небольшие изменения режима и случайные колебания укладывались в диапазон стабилизации. Для контроля за уровнем гелия в ванне был установлен линейный сверхпроводящий датчик уровня 15. Откачка ванны осуществляется механическим форвакуумным насосом ВН-4 с производительностью 45 л/с. Температура ванны контролировалась угольным сопротивлением T_6 типа Allen-Bradley, кроме того, можно было непосредственно измерять давление паров ^4He оптическим дифференциальным микроманометром. Измеренное давление менялось в пределах диапазона $0,3 \div 1,1$ тор в зависимости от режима работы рефрижератора. Объем ванны составляет 200 см^3 . На дне ванны уложен змеевик из медного капилляра 16, где и производится окончательное охлаждение и конденсация ^3He под давлением, определяемым сопротивлением дросселя 17 в линии ^3He , расположенным после конденсатора. Дроссель представляет собой капилляр из нержавеющей стали с внутренним ϕ 0,19 и длиной 250 мм.

После охлаждения жидкого ^3He в змеевике 18, расположенном на дне ванны испарения 19, ^3He поступает на вход блока теплообменников 20, 21 и затем в камеру растворения 22, где происходит переход атомов ^3He из концентрированной фазы в раствор $^3\text{He} + ^4\text{He}$ с поглощением тепла. Под действием перепада осмотического давления, возникающего при удалении ^3He из ванны испарения, атомы ^3He диффундируют вдоль каналов теплообменников, заполненных раствором, и охлаждают встречный поток концептрированного ^3He .

Блок теплообменников. Используются 2 типа теплообменников (т.о.): трубчатый 20 и сильфонный 21, включенные последовательно. Трубчатый т. о. обеспечивает работу рефрижератора при динамической поляризации, где требуется большая мощность охлаждения при сравнительно высокой температуре ($\sim 0,3 \text{ К}$). Кроме того, он необходим для предварительного охлаждения ^3He , чтобы обеспечить функционирование сильфонного т. о. в «замороженном»

режиме при температуре 0,05 К и ниже. Трубчатый т. о. состоит из двух одинаковых секций, включенных параллельно. Каждая секция представляет собой спираль из нержавеющей трубки $\phi 6,1 \times 0,5$ мм², длиной 250 см со вставленными внутрь семью капиллярами $\phi 1,7 \times 0,15$ мм². Общая площадь теплообменника составляет 1540 см²; измеренное сопротивление ламинарному потоку по каналу раствора — $2,9 \times 10^6$ см⁻³, по каналу ³He — $1,5 \times 10^7$ см⁻³. В режиме динамической поляризации, т. е. при $\sim 0,3$ К, этот теплообменник должен поглощать 12 мВт тепла при скорости циркуляции $3,5 \times 10^{-3}$ моль/с. Включение двух секций трубчатого т. о. последовательно приводило при большой скорости циркуляции к чрезмерному сопротивлению диффузии ³He в растворе и к обеднению раствора в ванне испарения. В результате, при таком включении секции трубчатого т. о. расчетная мощность охлаждения при 0,3 К не была достигнута. Этот эффект был устранен параллельным включением секций.

Сильфонный т. о. имеет большую поверхность теплообмена, равную $1,25 \times 10^4$ см². В области высоких температур сильфонный т. о. неэффективен, но для получения сверхнизких температур ниже 0,1 К они играют основную роль. Конструктивно сильфонный т. о. выполнен в виде дискового сильфона из 480 нержавеющей колец с внешним и внутренним диаметром 70 и 40 мм соответственно, толщиной 0,1 мм. Кольца сварены между собой диффузионной сваркой. Каналы для ³He и раствора выполнены на внешней и внутренней поверхностях сильфона в виде спиральных канавок; сопротивления каналов ламинарному потоку — $5,2 \times 10^5$ см⁻³ и $2,6 \times 10^5$ см⁻³ соответственно. Зазоры между гофрами сильфона задаются четырьмя рядами прокладок толщиной 0,1 мм.

Эффективность теплообмена в сильфонном т. о. определяется не только граничным сопротивлением Капицы, но также теплопроводностью ³He и раствора в зазорах между дисками. Для исследования качественной стороны работы т. о. были выполнены оценки процесса теплообмена через прямоугольную пластину, граничное теплосоппротивление которой и теплопроводность ³He и раствора полагались постоянными. При этом выражение для потока тепла от более теплого ³He к холодному раствору в одном зазоре между пластинами имеет вид

$$\dot{Q} = \frac{Lh(T_3 - T_4)(\lambda_3 + \lambda_4)}{2 \frac{\lambda_3^2 + \lambda_4^2}{\sqrt{m} \operatorname{sh}(\sqrt{ml})} + \frac{\lambda_3^2 + \lambda_4^2}{\sqrt{m} \lambda_3 \lambda_4 \operatorname{th}(\sqrt{ml})} + l} \quad (1)$$

Здесь $m = \frac{\tilde{T}^3(\lambda_3 + \lambda_4)}{h(\alpha_3 + \alpha_4)\lambda_3\lambda_4}$, L — длина пластины, h — ширина зазора, T_3 — температура ³He у теплового края пластины, T_4 — температура раствора у холодного края пластины, λ_3 и λ_4 — теплопроводности ³He и раствора, \tilde{T} — средняя температура ($T_4 < \tilde{T} < T_3$), l — ширина пластины, $\alpha = R_K T^3 = \text{const}$, где R_K — сопротивление Капицы. При $\tilde{T} > 0,3$ К, т. е. в области сравнительно высоких температур, $\sqrt{m} \gg 1$ и первые 2 члена в знаменателе выражения (1) малы по сравнению с l . Выражение (1) тогда преобразуется к виду

$$\dot{Q} = (\lambda_3 + \lambda_4) \frac{Lh}{l} (T_3 - T_4), \quad (2)$$

что соответствует преобладанию теплосоппротивления ³He и раствора в зазорах над сопротивлением Капицы. При очень низких температурах, когда $\sqrt{ml} \ll 1$ и $\operatorname{sh}(\sqrt{ml}) \simeq \operatorname{th}(\sqrt{ml}) \simeq \sqrt{ml}$, выражение (1) обращается в обычное выражение для теплопередачи через границу:

$$\dot{Q} = T^3 \Delta T L l (\alpha_3 + \alpha_4). \quad (3)$$

Таким образом, сильфонный т. о. при очень низких температурах приближается к идеальному трубчатому т. о., что обусловлено сильным возрастанием сопротивления Капицы по сравнению с теплосоппротивлением ³He и раствора в зазорах.

Оценки величины $\dot{Q}/(T_3 - T_4)$, полученные из (1) при использовании данных из [8 ÷ 10], позволяют считать, что по сравнению с обычным непрерывным т. о. трубчатого типа, имеющим такую же геометрическую поверхность, теплосоппротивление нашего сильфонного т. о. при $T = 0,4$ К примерно в 100 раз меньше. Однако уже при $T = 0,1$ К отношение теплосоппротивлений уменьшается до 4, а при $T = 0,04$ К практически до 1.

Ввиду компактности при большой величине поверхности и возможности задавать оптимальное гидродинамическое сопротивление без существенного увеличения объема жидкости сильфонный т. о. в области ниже 0,1 К является наиболее предпочтительным из всех непрерывных т. о. Отметим, что требование малого гидродинамического сопротивления для больших циркуляций ³He неизбежно приводит к частичному шунтированию т. о. при сравнительно низкой циркуляции в «замороженном» режиме. В результате ухудшается качество, т. о. Тем не менее применение сильфонного т. о. оправдано, поскольку диапазон рабочих циркуляций оказался не очень большим (тепловые нагрузки

рефрижератора в «замороженном» режиме в условиях работы на ускорителе таковы, что понижение скорости циркуляции ниже 10^{-3} моль/с вело к повышению предельной температуры), а достигаемая температура достаточно низка, чтобы за время экспозиции поляризация мишени заметно не разрушалась.

Штанга мишени. Схематично устройство штанги 23 показано на рис. 1, нижняя часть штанги более подробно дана на рис. 3. Штанга состоит из песущей трубы 24, изолирующей пробки 25, волновода 26, радиочастотного кабеля 27, резонатора 28 с катушкой я.м.р. 29. Теплоkontakt 30 в области ванны-конденсатора служит для уменьшения количества тепла, поступающего в ванну испарения по волноводу, радиочастотному кабелю, измерительным проводам и трубке откачки 31 изолирующей пробки. Теплоkontakt осуществляется между медной втулкой, припаянной к указанным узлам, и стенкой ванны-конденсатора частично посредством касания и частично через газ в тракте откачки ^3He . Тонкостенная изолирующая пробка из нержавеющей стали с откачанной полостью плотно вставляется в тонкостенную нержавеющую трубку 32, соединяющую ванну испарения с камерой растворения. Зазор между стенками составляет около 0,02 мм, диаметр пробки 30 мм, длина 150 мм. Гидродинамическое сопротивление в этом зазоре примерно в 10^3 раз превышает сопротивление блока обменников по каналу раствора. Наверху изолирующей пробки расположен угольный термометр T_7 для измерения температуры ванны испарения ^3He .

Волновод из нержавеющей трубки $\phi 10 \times 0,5$ мм² в нижней части заполнен пробкой из пенопласта 33 для защиты от излучения с теплого конца волновода. Волновод имеет общий с изолирующей пробкой вакуум; герметизация нижнего конца волновода выполнена с помощью кварцевого окна 34, приклеенного эпоксидной смолой. Медный резонатор согласуется с волноводом с помощью рупора 35, имеющего отверстия для входа диффундирующего ^3He . В дне резонатора имеется трубка 36, вставляющаяся в отверстие выхода камеры растворения. Соединение трубки с дном резонатора — резьбовое со шлицевым уплотнением $\phi 10$ мм, сопротивление которого много больше сопротивления вещества мишени. Так как сопротивление зазора между трубкой и отверстием приблизительно в 100 раз превышает сопротивление шариков пропандиола, заполняющих резонатор, то ^3He принудительно диффундирует через резонатор и эффективно охлаждает вещество мишени. На резонаторе также укреплены

угольные термометры $T_1 \div T_5$ для контроля температуры рефрижератора во всем диапазоне и калибровки сигнала я.м.р. пропандиола. Нагреватель из константана H_1 служит для проверки хладопроизводительности рефрижератора.

Штанга мишени уплотняется на верхнем фланце тракта откачки ^3He , там же присоединяется специальное шлюзовое устройство, позволяющее вынимать штангу мишени из рефрижератора, не нарушая герметичности тракта откачки ^3He . Такое устройство штанги мишени позволяет менять вещество мишени в процессе работы установки, благодаря чему описываемая мишень может использоваться и как исследовательская установка.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕФРИЖЕРАТОРОВ

Для измерения характеристик рефрижератора применялись различные угольные термометры, калибровка которых производилась равновесным сигналом я.м.р. самого вещества мишени. Так как время спин-решеточной релаксации быстро растет с понижением температуры, то для того, чтобы время установления теплового равновесия в системе ядерных спинов не было слишком большим, при сверхнизких температурах приходилось значительно снижать магнитное поле. Сигнал я.м.р. от протонов пропандиола наблюдался только в магнитном поле 26,9 кГс. Поэтому после выдержки вещества мишени при заданных условиях магнитное поле быстро поднималось до величины 26,9 кГс. Процедура подъема магнитного поля была выбрана такой, чтобы не могло происходить заметных изменений поляризации вещества. Такой прием является своеобразным «замораживанием» статической поляризации протонов вещества мишени. Точность такой калибровки достаточно высока и определяется в основном точностью калибровки сигнала я.м.р. в области 1,5 К с помощью тщательно калиброванного в магнитном поле угольного резистора T_1 (эти измерения производились в отдельной установке).

Недостатком калибровки является то, что различным температурам на калибровочной кривой соответствуют различные магнитные поля. Для определения изменения температуры раствора при изменении магнитного поля в камеру растворения были помещены угольные термометры со слабой зависимостью показаний от магнитного поля (Resistor-Speer 220 Ом). Повышение температуры из-за увели-

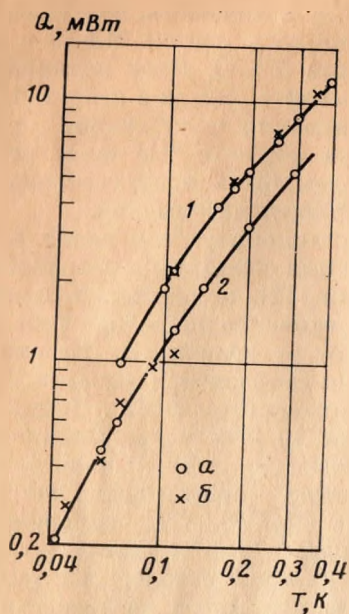


Рис. 4. Холодопроизводительность рефрижератора, а — теория, б — эксперимент; $1 - z = 2,6 \cdot 10^{-3}$ моль/с, $2 - 1,57 \cdot 10^{-3}$

чения магнитного поля оказалось незначительным. Это объясняется, по-видимому, хорошей механической связью ступени растворения с магнитом и тем, что большинство узлов низкотемпературной части (обменники и камера растворения) изготовлены из нержавеющей стали. Косвенным подтверждением правильности калибровки термометров в магнитном поле является тоже хорошее совпадение измеренной и расчетной холодопроизводительности рефрижератора.

На резонаторе штанги мишени были размещены следующие термометры: Allen-Bradley (18 Ом) для калибровки сигнала я.м.р. в области 1,5 К (T_1 на рис. 3), 2 термометра Speer 220 Ом (на входе резонатора — T_2 и на выходе — T_3), угольные термометры 870 (T_4) и 875 (T_5), изготовленные в Институте физических проблем.

Измеренная холодопроизводительность рефрижератора указана на рис. 4. Кратко работу рефрижератора можно проиллюстрировать следующими характеристиками: при молярной скорости циркуляции ^3He в системе $\dot{n}_3 = 3,5 \times 10^{-3}$ моль/с и тепловой нагрузке 12 мВт температура раствора $T = 0,3$ К, а при $\dot{n}_3 = 10^{-3}$ моль/с в «замороженном» режиме $T = 0,035$ К. Нужно отметить, что этот же рефрижератор в лабораторных условиях позволял достичь $T = 0,02$ К при $\dot{n}_3 = 7 \times 10^{-4}$ моль/с.

4. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИОГЕННОЙ ЧАСТИ УСТАНОВКИ

Запуск установки начинается с заливки жидкого N_2 в азотную ванну и гелиевые емкости сверхпроводящего магнита. Азотное охлаждение установки занимает около 3 ч. Узлы ступени растворения охлаждаются с помощью теплообменного газа (гелия). Штанга мишени вводится в конце азотного охлаждения с помощью съемного шлюзового устройства, которое позволяет изолировать нижнюю охлажденную часть штанги и шарики замороженного пропандиола от внешней атмосферы на всех этапах загрузки вещества в установку. После заливки N_2 в магнит производится его откачка до давления 0,15 атм, а затем принудительное опорожнение гелиевых емкостей от жидкого N_2 .

Гелиевое охлаждение сверхпроводящего магнита и ступени растворения проводится в течение 4,5 ч. Для того чтобы угольная ловушка ступени растворения 37 (рис. 1) преждевременно не адсорбировала обменный газ, на нее в конце гелиевого охлаждения подается тепловая мощность 0,3 Вт с помощью нагревателя H_2 . Таким образом удается охладить узлы ступени растворения до $T \leq 10$ К. После выключения нагревателя ловушка быстро адсорбирует теплообменный газ, обеспечивая хорошую вакуумную изоляцию. После того как уровень жидкого гелия достигает открытого конца линии питания ванны-конденсатора, включается насос, откачивающий ее. Заполнение ванны-конденсатора происходит за время порядка 5 мин.

Конденсация газовой смеси $^3\text{He} + ^4\text{He}$ в количестве 225 л с концентрацией ^3He 30% производится в течение 30 мин. В то же время вводится ток в сверхпроводящий магнит. После установления теплового равновесия в камере растворения на уровне 1,5 К калибруется сигнал я.м.р. от протонов вещества мишени. Запуск рефрижератора растворения осуществляется последовательным включением механического насоса ВН-1МГ, ротационного насоса WS-250 и БН-2000. После охлаждения ванны испарения и достижения низкого давления в тракте откачки ^3He включается нагреватель ванны испарения H_3 , поддерживающий высокую циркуляцию ^3He в рефрижераторе. Время, за которое рефрижератор достигает рабочего состояния, составляет $30 \div 40$ мин.

После завершения динамической поляризации мишень «замораживается», т. е. быстро охлаждается до сверхнизких температур. Скорость охлаждения такова, что температура

раствора с момента выключения с.в.ч. понижается до 0,15 К за 2 мин; в дальнейшем в течение 15 мин достигается температура 0,05 К. Полное время охлаждения до предельной температуры 0,035 К составляет $20 \div 25$ мин. По мере охлаждения камеры растворения скорость циркуляции постепенно уменьшается путем изменения тока нагревателя ванны испарения. Разрушения поляризации во время процедуры «замораживания» замечено не было.

Испаряемость жидкого гелия в нашем варианте в основном определяется конструкцией криостата и сверхпроводящим магнитом. Рефрижератор растворения потребляет жидкий гелий достаточно экономично во всех режимах работы. Полное потребление гелия установкой 0,7 л/ч в «замороженном» режиме и 1,1 л/ч в режиме динамической поляризации. Так как полезный объем жидкого гелия 12 л, то в среднем подливка жидкого гелия осуществляется через каждые 16 ч. Эта операция обычно занимает $15 \div 20$ мин и производится без нарушения режима работы установки.

Большинство операций на установке во время запуска и экспозиции мишени осуществляется дистанционно, т.е. с включенным ускорителем, что значительно увеличивает время использования мишени в эксперименте. В конце эксперимента штанга мишени вынимается из установки и вместо нее в камеру растворения вводится безводородный эквивалент мишени. Нижняя часть штанги мишени вместе с веществом помещается в специальный холодильник в инертную атмосферу и при температуре, близкой к азотной, сохраняется до следующего эксперимента.

5. АППАРАТУРА «ЗАМОРОЖЕННОЙ» ПОЛЯРИЗОВАННОЙ МИШЕНИ

Измерительная аппаратура мишени состоит в основном из системы с.в.ч. накачки поляризации, блока питания сверхпроводящего магнита, приборов для измерения температуры, Q-метра для измерения ядерной поляризации. Для накачки поляризации использовался с.в.ч. генератор ОВ-13, имеющий выходную мощность $70 \div 100$ мВт в диапазоне $74 \pm 0,5$ ГГц. Стабилизация и сдвиг частоты генератора осуществлялись системой автоматической подстройки частоты по опорному высокочастотному ($Q = 3 \cdot 10^5$) резонатору, разработанному в Донецком физико-техническом институте. Для грубого измерения абсолютной частоты с точностью 10^{-3} применялся также стандартный

волномер. С.в.ч. мощность, поступающая в криостат, измерялась мостом МЗ-22 с термисторным датчиком М5-50. Блок питания сверхпроводящего магнита описан в работе [11]. В режиме замораживания поляризации для уменьшения расхода жидкого ^4He из-за теплоподвода по тоководам была предусмотрена работа со сверхпроводящей перемычкой.

Для дистанционного измерения сверхнизких температур был специально разработан импульсный омметр [12], показания которого зависят только от активного сопротивления термометра и не зависят от реактивных параметров измеряемой цепи (паразитной емкости и индуктивности подводящих проводов). Выделяемая в сопротивлении 10 кОм мощность при измерении не превосходит 10^{-13} Вт. В некоторых случаях для сравнения применялся также прибор Cryo-Bridge (ЧССР). Для измерения поляризации в данной работе применен Q-метр [13] с жесткой фазовой автоподстройкой резонансной частоты приемного последовательного колебательного контура [14]. Схема автоподстройки работает непосредственно на рабочей частоте Q-метра, равной 114,5 МГц. Опорным напряжением схемы автоподстройки служит в.ч. напряжение генератора Q-метра. Фаза опорного напряжения при записи неусиленного сигнала я.м.р. в тепловом равновесии подстраивается специальной схемой автоподстройки таким образом, чтобы устранить изменение фона (базовой линии) в низкочастотном тракте Q-метра. Эта дополнительная автоподстройка фазы позволяет записывать интегральную интенсивность неусиленного сигнала с точностью не хуже 1%. Выделение сигнала я.м.р. из шума и запись интегральной интенсивности сигналов осуществляются стробоскопическим интегратором. Прибор позволяет также записывать с накоплением форму сигналов дисперсии χ' , поглощения χ'' и работать в режиме записи производных этих сигналов. Общая погрешность измерения поляризации Q-метром не более 2,5%. Поправка на нелинейность δ , вводимая по формуле $E_{\text{изм}} = E(1 + \delta)$, где $E_{\text{изм}}$ и E соответственно измеренное и действительное значения усиления поляризации, рассчитывалась на э.в.м. Расчет показывает, что при максимальной глубине модуляции сигналом я.м.р. в.ч. напряжения на контуре Q-метра от 0 до 25% поправка δ линейно возрастает от 0 до 1,1% и от 0 до -1,2% для сигналов положительной и отрицательной поляризации соответственно. Более детальное изложение методики введения погрешности приведено в [13].

6. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦА

В качестве образца использовался комплекс Cr^V , образующийся в пропандиоле-1,2 путем восстановления Cr^{VI} [15 ÷ 18]. Исходным соединением является $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ марки «х.ч.» Перед использованием $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ измельчался в пудру и высушивался в течение 2 ч при 120 °С. Пропандиол-1,2 марки «ч» перед использованием перегонялся. Образцы пропандиола-1,2 с различной концентрацией Cr^V готовились следующим образом: смесь 60 мл пропандиола-1,2 и $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (в отношении по весу 24 : 1) перемешивалась магнитной мешалкой в течение 180 мин при постоянной температуре 65 °С и давлении 10 ÷ 15 тор. Колба, в которой проходила реакция, была соединена с возвратным холодильником.

7. ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ «ЗАМОРОЖЕННОЙ» МИШЕНИ

Экспериментальные результаты, приведенные ниже, получены при эксплуатации «замороженной» протонной мишени в рабочих условиях синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем. Рабочий объем мишени 15 см³, коэффициент заполнения образцом резонатора 0,6, средний диаметр шариков 2,0 мм. Эффективная площадь шариков 180 см². Концентрация парамагнитных примесей, при которой получена максимальная поляризация $\pm 98 \pm 2\%$, равна $1,8 \cdot 10^{20}$ спин/см³, $H_0 = 26,9$ кГс. Расстояние между максимумами коэффициента усиления $H = 100$ Гс. График, характеризующий скорость накачки P_+ и P_- , приведен на рис. 5. Кривая 1 соответствует максимальной скорости накачки поляризации обоих знаков при мощности $W_+ = 0,8$ мВт/см³ и $W_- = 0,44$ мВт/см³, т.е. мощность, требуемая для накачки P_- , приблизительно в 1,8 раза меньше,

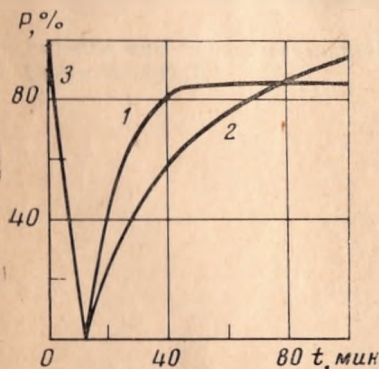


Рис. 5. Зависимость поляризации от времени накачки (1 и 2) и разрушение поляризации (3)

чем для накачки P_+ , что находится в соответствии с [6]. Для увеличения поляризации свыше 85% при максимальной скорости накачки приходилось снижать уровень с.в.ч. мощности (понижать температуру решетки). При мощности $W_+ = 0,4$ мВт/см³ время накачки положительной поляризации возрастает (кривая 2).

Зависимость поляризации от времени накачки аналогична полученной в [20], т. е.

$$(P_{\text{макс}} - P(t))/P_{\text{макс}} = \exp(-t/\tau_n),$$

охлаждаемым водопроводной водой. Колба защищалась от воздействия света. Через 180 мин получалось рабочее вещество мишени с концентрацией $1,5 \cdot 10^{20}$ спин/см³. Затем уменьшением добавления до 1 тор концентрация увеличивалась до желаемой величины. Методика приготовления образца отличалась от использованной в [6] следующим: время реакции увеличено вдвое (с 90 до 180 мин); не производилась отгонка пропандиола во время реакции; концентрирование осуществлялось лишь на конечной стадии реакции; уменьшено весовое отношение компонентов реакции с 15 : 1 до 24 : 1. Оценка концентрации Cr^V в приготовленных таким способом образцах осуществлялась по приведенной в работе [6] зависимости полуширины линии электронного парамагнитного резонанса (э.п.р.) от концентрации Cr^V . Для отработки методики приготовления образцов использовалась специальная установка [19] со сменными образцами. С помощью этой установки измерялись времена релаксации, времена накачки поляризации и коэффициент усиления при температурах до 0,9 К. Присутствие Cr^{III} в рабочих образцах не было замечено при использовании спектрометра э.п.р. с чувствительностью 10 спин/см³, где τ_n — время накачки; $P_{\text{макс}} = 98 \pm 2\%$ — максимальное значение поляризации. Кривая 3 на рис. 5 показывает разрушение поляризации при перестройке частоты с.в.ч. поля на противоположный максимум коэффициента усиления. Время разрушения поляризации составляет 12 мин.

На рис. 6 показана зависимость времени ядерной релаксации при температуре 0,04 К от поля H_0 . Качественно ход релаксации согласуется с [6], однако время релаксации T_1 оказалось в 2 ÷ 3 раза меньше. Такое расхождение возможно, если учесть, что T_1 существенно [20] зависит от способа приготовления мишени и испытывает резкую зависимость от концентрации ($T_1 \sim N_e^{-3}$, где N_e — концентрация пара-

¹ Измерения производились в Казанском физико-техническом институте Казанского филиала АН СССР С. В. Лучкиной и Г. Г. Боровиковым.

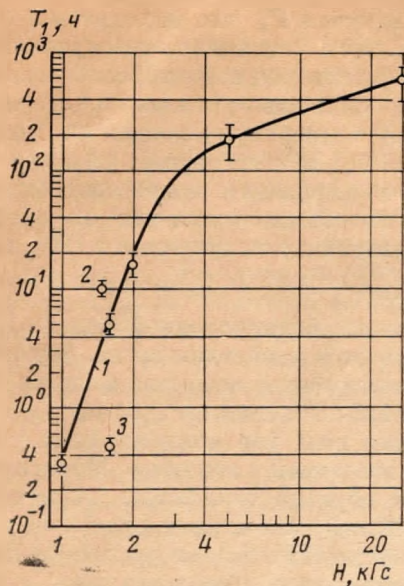


Рис. 6. Зависимость времени ядерной релаксации T_1 от напряженности магнитного поля H_0 . 1 — 0,04 К, 2 — 0,037, 3 — 0,062

магнитных центров). В нашем случае это дает уменьшение расхождения в $1,5 \div 2$ раза. Другой причиной, уменьшающей T_1 , в нашем случае может быть радиационное облучение мишени в процессе измерения T_1 . В области температур ниже 0,05 К было обнаружено различие во временах релаксации положительной и отрицательной поляризации. Время $T_1^+ > T_1^-$, что связано, по-видимому, с изменением температуры решетки за счет релаксации зеemanовской энергии ядерных спинов.

Авторы выражают благодарность В. П. Джеллепову и Ю. М. Казаринову за большую помощь и постоянное внимание к настоящей работе. Авторы благодарят Р. Л. Хамидулина, А. О. Орлова, О. Н. Шевелева, И. З. Крахтинова, Н. А. Петухова и П. А. Шлифертова за качественное изготовление сложных дета-

лей установки. Авторы признательны В. В. Куликову за разработку большей части узлов мишени и В. Н. Трофимову за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. С. Борисов, Э. И. Бунятова, Ю. Ф. Киселев, В. Н. Матафонов, Б. С. Неганов, Ю. А. Усов, Препринт ОИЯИ, 13-10253, 1976, Дубна; Препринт ОИЯИ, 13-10257, 1976, Дубна.
2. Б. С. Неганов, Вестн. АН СССР, 1968, 12, 49.
3. Б. С. Неганов, Н. С. Борисов, М. Ю. Либург, ЖЭТФ, 1966, 50, 1445.
4. Н. С. Борисов, Э. И. Бунятова, Ю. Ф. Киселев, Б. С. Неганов, Л. Б. Парфенов и др., Препринт ОИЯИ, Р6-7408, 1973, Дубна.
5. W. de Voer, T. O. Niinikoski, Nucl. Instrum. and Methods, 1974, 114, 495.
6. W. de Voer, CERN, 74-11, 1974, Geneva.
7. Н. С. Борисов, Л. И. Глонти, М. Ю. Казаринов, Ю. М. Казаринов, В. С. Киселев и др., ЖЭТФ, 1977, 72, 405.
8. R. Rabebaugh, NBS Technical Note, 1967, 362.
9. Н. С. Борисов, Б. С. Неганов, Г. Феллер. Сообщение ОИЯИ, Р8-7008, 1973, Дубна.
10. O. V. Lounasmaa, Experimental Principles and Methods below 1K, 1974, p. 31, London.
11. Ю. Ф. Киселев, ПТЭ, 1972, № 5, 162.
12. Ю. Ф. Киселев, Ю. П. Прокофьев, Препринт ОИЯИ, Р13-9375, 1975, Дубна.
13. Ю. Ф. Киселев, В. Н. Матафонов, Препринт ОИЯИ, Р13-10101, 1976, Дубна; ПТЭ, 1977, № 5, 55; Ю. Ф. Киселев, А. П. Сапожников, Сообщение ОИЯИ, Р13-10694, 1977, Дубна.
14. V. Petřicek, Nucl. Instrum. and Methods, 1968, 58, 111.
15. Н. С. Гарифьянов, Б. М. Козырев, В. Н. Федотов, Докл. АН СССР, 1968, 178, 808.
16. H. Glättli, M. Odehnal, J. Ezratty, A. Malinovski, A. Abragam, Phys. Lett., 1969, 29A, 250.
17. A. Masaike, H. Glättli, J. Ezratty, A. Malinovsky, Phys. Lett., 1969, 30A, 63.
18. H. Glättli, Proc. 2nd Int. Conf. on Polarized Targets, Berkeley, 1971, p. 281.
19. Н. С. Борисов, Ю. Ф. Киселев, В. Н. Матафонов, Сообщение ОИЯИ, 13-9391, 1975, Дубна.
20. В. А. Ацаркин и др., Физ. тв. тела, 1973, 15, 843.

Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна. Получено 10.XII.1976