УДК 538.9:538.945.9:536.483:537.6

РАЗРАБОТКА ВЕКТОРНОГО МАГНИТА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ДЛЯ РАБОТЫ С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ НЕЙТРОНАМИ

© 2024 г. А. В. Алтынов[a], А. П. Буздавин[a], В. И. Боднарчук[a], В. Д. Жакетов[a, b, c], А. В. Петренко[a], М. Д. Проявин[d], А. Н. Черников[a, d, *]

[a]*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980 Россия*
[b]*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141701 Россия*
[c]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия*
[d]*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, 603950 Россия*

**e-mail: chern@nf.jinr.ru*

Поступила в редакцию 12.12.2023 г.
После доработки 20.02.2024 г.
Принята к публикации 20.02.2024

Рефлектометрия поляризованных нейтронов — экспериментальный метод исследования металлических тонких гетерофазных слоистых материалов, полимерных пленок, биологических систем, свободной поверхности жидкости, магнитных жидкостей — требует экспериментального оборудования, включающего в себя специальную магнитную систему. Описанная в настоящей работе магнитная система — векторный магнит — позволит изменять направление магнитного поля в трех направлениях, позволит разместить внутри устройство термостатирования при низких и сверхнизких температурах, и будет иметь апертуру, позволяющую разместить снаружи систему детектирования нейтронов и гамма-квантов. Согласно расчетам, криомагнит позволит прикладывать максимальное поле в вертикальной плоскости до 3 Тл, а в горизонтальной плоскости до 1 Тл. Для изготовления векторного магнита в настоящей работе предложено использовать ленту из высокотемпературного сверхпроводника шириной 4 мм. Криостат с векторным магнитом будет установлен на рефлектометре “РЕМУР” на восьмом канале реактора “ИБР-2”.

Ключевые слова: векторный магнит, высокотемпературный сверхпроводник, сверхнизкие температуры, поляризованные нейтроны, рефлектометрия нейтронов.

DOI: 10.31857/S1028096024080045, **EDN:** ELRXZR

ВВЕДЕНИЕ

Явлению сверхпроводимости, открытому более столетия назад, в настоящее время находят применение в различных областях энергетики, электротехники и электроники. Несмотря на то, что на сегодняшний день открыто большое количество сверхпроводников, поиск новых сверхпроводящих материалов с заданными свойствами продолжается.

Благодаря ряду свойств тепловых нейтронов, таких как высокая проникающая способность, наличие магнитного момента, высокая изотопная и элементная чувствительность, метод нейтронографии широко применяют в исследованиях свойств сверхпроводников. Метод практически незаменим при исследовании таких явлений, как эффект Мейснера, сверхпроводящие вихри, их пространственное распределение и взаимодействие с поверхностью, дефектами и т.п. Преимуществом метода является его пространственная чувствительность, которая позволяет эффективно использовать нейтронографию для исследований систем, таких как многослойные гетерофазные и композитные материалы.

Особый интерес представляют тонкие гетерофазные системы со сверхпроводящими и ферромагнитными свойствами, с толщиной слоев в диапазоне 1–1000 Å. Поскольку магнитное поведение сверхпроводников и ферромагнетиков

противоположно, сосуществование двух подсистем с различным магнитным упорядочением в системах приводит к множеству нетривиальных эффектов [1–3]. На данный момент подробно были исследованы [4–6] двухслойные, трехслойные и периодические структуры типа F/S, где F — ферромагнитные элементы Fe, Co, Ni, Gd; S — сверхпроводящий Nb, обладающий наибольшей температурой сверхпроводящего перехода ($T_{sc} \approx 5.5$ K для пленки Nb толщиной 25 нм) среди одноэлементных сверхпроводников. При исследовании систем типа F/S важным вопросом является создание конкуренции двух подсистем с различным магнитным упорядочением, чтобы ферромагнетизм не подавлял сверхпроводимость. Для этого необходимо использовать ферромагнетики с низкими температурами фазовых переходов. Стоит отметить, что некоторые интерметаллиды на основе урана, например, UCoGe и URhGe, имеют крайне низкие значения температуры Кюри $T_{Curie} = 9$ и 2.5 K соответственно [7]. Более того, в них наблюдали переход в сверхпроводящее состояние при $T_{sc} \approx 2.5$ и 0.7 K соответственно. Таким образом, учитывая, что ряд металлов и интерметаллидов имеют температуры фазовых переходов ниже $T = 1.5$ K, а также что при понижении температуры усиливается влияние упорядочения, связанного с состоянием сверхпроводимости, можно заключить, что требуется разработка нового криостата, рассчитанного для работы при соответствующих температурах. Требования к криостату сводятся к достижению минимальной температуры $T = 0.5$ K, максимального значения индукции магнитного поля $B = 3$ Тл, наличию опции регистрации вторичного излучения в виде гамма-квантов и режима работы в замкнутом цикле. Для возможности изменения ориентации внешнего магнитного поля относительно плоскости образца во всех трех возможных направлениях требуется векторный криомагнит. Вращение магнитного поля делает возможным исследование сложных неколлинеарных и некомпланарных магнитных систем.

МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ

Одним из эффективных методов исследования магнетизма является рефлектометрия поляризованных нейтронов, позволяющая получить изотопные и магнитные профили по глубине с разрешением в несколько нм. Развитием метода является применение метода стоячих волн [8–11], что позволило существенно повысить как пространственное разрешение, так и чувствительность к слабому магнитному моменту при исследовании приповерхностных областей и гетерофазных наносистем. Подобные исследования ранее проводили на спектрометре поляризованных нейтронов (СПН) [12], а в настоящее время выполняют на рефлектометре “РЕМУР”, на реакторе “ИБР-2” [13].

Рефлектометр поляризованных нейтронов “РЕМУР” является одним из наиболее светосильных рефлектометров в мире с потоком поляризованных нейтронов на образце $\Phi = 3 \times 10^5$ нейтрон/(с·см^2). Рефлектометр работает по времяпролетному методу с рабочим диапазоном длин волн излучения ~1–15 Å и обладает возможностями проведения измерений с полным поляризационным анализом [13]. Особенностью данного рефлектометра является то, что на нем реализован режим регистрации вторичного излучения, возникающего в результате взаимодействия тепловых нейтронов с ядрами вещества изучаемого объекта: заряженных частиц и гамма-квантов. Регистрация вторичного излучения различного типа позволяет определять пространственный профиль отдельных изотопов [14, 15]. На рефлектометре “РЕМУР” проводили низкотемпературные исследования эффектов близости в сверхпроводящих ферромагнитных системах [16–18] и редкоземельных пленках с нетривиальным магнитным упорядочением [19].

МЕТОДИКА

В настоящее время рефлектометр “РЕМУР” оснащен гелиевым криостатом ORANGE50. Криостат дает возможность проводить исследования с поляризованными нейтронами в диапазоне температур от 1.5 до 300 K в магнитном поле с индукцией до 1.8 Тл, направленном параллельно поверхности образца. Большим преимуществом криостата является возможность смены образца без отогрева магнита и частичной разборки криостата (так называемая “холодная загрузка”), что сильно уменьшает время смены образца во время эксперимента. Магнитное поле на образце создают при помощи пары сверхпроводящих катушек Гельмгольца, находящихся при температуре 4.2 K. Чтобы избежать деполяризации нейтронного пучка в рассеянном магнитном поле, создаваемом катушками Гельмгольца, последние имеют асимметричность, позволяющую понизить рассеянное магнитное поле на пути нейтронного пучка. К недостаткам криостата следует отнести необходимость использования жидких азота и гелия, что является трудоемкой и дорогостоящей технологической операцией в условиях работы в экспериментальном зале реактора “ИБР-2”. Также к недостаткам криостата можно отнести невозможность проводить

исследования при температуре ниже 1.5 K. Существующая магнитная система не позволяет изменять направление магнитного поля, а также характеризуется сравнительно небольшим его предельным значением. Проблемой существующего магнита и действующего криостата является малая апертура, что не позволяет разместить близко к образцу гамма-детектор для регистрации вторичного излучения.

ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Настоящая работа направлена на модернизацию рефлектометра “РЕМУР”, в рамках которой предложено создать следующие узлы. Первый — векторный магнит на основе несимметричных катушек Гельмгольца, который позволит менять индукцию магнитного поля, направленного перпендикулярно движению нейтронов, в диапазоне 0–3 Тл в вертикальном направлении и 0–1 Тл в горизонтальном направлении. Выбранная апертура магнита позволит разместить систему детектирования нейтронов и гамма-квантов. Второй — устройство термостатирования, позволяющее работать как при температурах выше 1.5 K, так и при низких (меньше 1.5 K) и сверхнизких (до 0.5 K, в перспективе — до 0.1 K) температурах.

Применение криокулеров замкнутого цикла как для охлаждения магнита, так и предварительного охлаждения системы термостатирования исключит необходимость использования внешних поставок жидкого гелия.

Мы полагаем, что таким образом будут устранены обозначенные недостатки и проблемы рефлектометра “РЕМУР”.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КРИОКУЛЕРОВ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА

На ряде спектрометров на реакторе “ИБР-2” (“ДН-6”, “ДН-12”, “ДРВ”, “ФДВР”, “НЕРА”) для охлаждения образцов используют криокулеры замкнутого цикла, накоплен большой опыт их применения. Мы предполагаем, что новый магнит также будет охлаждаться при помощи криокулера замкнутого цикла. Он будет создан с использованием материала с высокотемпературной сверхпроводимостью, который позволит иметь рабочую температуру магнита на уровне 20 K, что существенно упрощает фоновые условия для прохождения нейтронов, так как исключает применение на их пути тепловой “супер-изоляции”, вносящей паразитное рассеяние.

Коллектив разработчиков низкотемпературной техники для спектрометров на реакторе “ИБР-2” накопил значительный положительный опыт использования материалов с высокотемпературной проводимостью для получения магнитных полей с большим значением индукции [20, 21]. Так, на спектрометре “ДН-12” установлен криостат с магнитом с максимальным вводимым током 300 А и магнитной индукцией 0.0159 Тл/А на основе высокотемпературного сверхпроводника с охлаждением криокулерами замкнутого цикла. Магнит изготовлен специалистами Научно-экспериментального отдела комплекса спектрометров Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка в сотрудничестве с Институтом электротехники ICPE-CA (Бухарест, Румыния).

ПРОЕКТ ВЕКТОРНОГО МАГНИТА

На рис. 1 представлена схема эксперимента на рефлектометре “РЕМУР”. Указанные на схеме условия формируют требования к размерам и катушкам магнитной системы. Расположение вектора магнитного поля вдоль пучка формирует требование к стойке криостата, которая позволяет вращать криостат и, соответственно, магнит вокруг вертикальной оси на угол 90°.

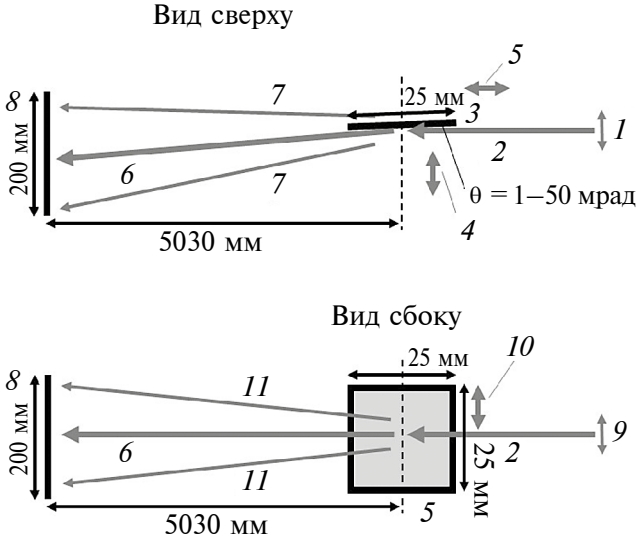

Рис. 1. Схема эксперимента на рефлектометре “РЕМУР”: *1* — горизонтальная апертура пучка шириной 0.1–1 мм, которую регулируют двумя диафрагмами; *2* — падающий пучок нейтронов; *3* — образец; *4* — магнитное поле, приложенное перпендикулярно плоскости образца; *5* — магнитное поле, приложенное в плоскости образца, направленное вдоль нейтронного пучка; *6* — отраженный пучок нейтронов; *7* — рассеянные нейтроны; *8* — позиционно-чувствительный детектор; *9* — вертикальная апертура пучка, около 20 мм, управляется двумя диафрагмами; *10* — магнитное поле, приложенное в плоскости образца, направленное перпендикулярно нейтронному пучку; *11* — рассеянные нейтроны.

Величина индукции магнитного поля в вертикальном направлении — 3 Тл, в горизонтальном направлении — 1 Тл. Это максимально доступные значения магнитного поля, полученные из расчета системы криомагнита. В горизонтальном направлении поле может быть направлено как перпендикулярно движению пучка нейтронов, так и вдоль него. Эти два положения в горизонтальной плоскости можно установить вращением криосистемы вокруг вертикальной оси, положение образца относительно нейтронного пучка в этом случае сохраняется.

Как видно из рис. 1, длина измерительной базы — 5030 мм, окно позиционно-чувствительного детектора — 200 × 200 мм; образец — пластина толщиной 1 мм с площадкой отражения 25 × 25 мм. Эти размеры, а также необходимость коллимации нейтронного пучка и размещения вблизи оптических окон криостата гамма-детектора диаметром до 60 мм определяют апертуру магнитной системы. Другим требованием является несимметричность магнитной системы (пар Гельмгольца), которая необходима для сдвига нулевой точки магнитного поля, появляющейся в такой системе, к одной из катушек относительно оси симметрии магнита. Однако необходимо сохранить однородность магнитного поля на образце около 5%. Необходимые параметры магнитной системы сведены в табл. 1.

Магнитная система состоит из двух отдельных магнитов, расположенных перпендикулярно друг другу. В вертикальном направлении в магните размещена система термостатирования при сверхнизких температурах, на расположение которой отведено отверстие диаметром 104 мм. В горизонтальном направлении открытое расстояние между катушками определяется конструкцией гамма-детектора и равно 122 мм.

Свойства и характеристики сверхпроводника — материала магнита — ограничены источником тока, который дает максимальный ток 120 А. Это ограничение согласуется также с мощностью криокулера на первой ступени, которая должна быть достаточной для получения необходимых температур токопровода, выполненного из высокотемпературного сверхпроводника.

Требованиям магнитной системы отвечает сверхпроводящая лента шириной 4 мм и толщиной 0.055 мм, производимая фирмой “С-инновации” [22]. Основные характеристики ленты приведены в табл. 2 (данные взяты из спецификации на поставляемую ленту).

Расчет параметров катушек векторного магнита

На рис. 2 представлена модель катушки, создающей поле с вертикальным направлением индукции, где показаны две группы обмоток, составляющие пару Гельмгольца. Каждая пара состоит из двух обмоток галетного типа.

Для получения максимальной плотности тока обмотки необходимо наматывать без использования изолирующего слоя. Предположительно, после перехода обмоток в сверхпроводящее состояние после охлаждения, медное покрытие ленты окажется изолятором по отношению к сверхпроводящему слою, и возникнет индуктивная катушка. Такая технология намотки реализована в магнитном криостате на дифрактометре “ДН-12”.

Таблица 1. Параметры магнитной системы

Параметр	Значение
Величина индукции магнитного поля перпендикулярно пучку, в вертикальном направлении	3 Тл
Величина индукции магнитного поля перпендикулярно пучку, в горизонтальном направлении	1 Тл
Величина индукции магнитного поля вдоль пучка	1 Тл
Размеры образца с подложкой	2 мм вдоль пучка, 25 × 25 мм плоскость отражения нейтронов
Апертура падающего пучка	Высота 20 мм, до 1 мм ширина
Апертура рассеянного пучка	Определяется позиционно-чувствительным детектором с окном 200 × 200 мм, расположенным на расстоянии 5030 мм от образца; гамма-детектором на основе германия диаметром 60 мм.

Таблица 2. Характеристики стабилизированного медью сверхпроводника второго поколения, фирмы “С-инновации”, предназначенного для применения в магнитном поле

Характеристика	Значение
Элементный состав сверхпроводника, %	4–20 Ag; 5 Cu; 40 H
Толщина подложки HastelloyC276, мкм	38 ± 3
Ширина образца, мм	4
Толщина серебряного покрытия сверхпроводника, мкм	2 ± 5
Толщина серебряного покрытия подложки, мкм	1.0 ± 0.5
Толщина медного покрытия каждой плоскости, мкм	5 ± 1
Критический диаметр сгиба, мм	≤ 15
Критический ток при температуре 77 K, A	≥ 120
Критический ток при температуре 20 K и индукции магнитного поля 8 Тл, A	≥ 240

На рис. 3 представлена карта магнитного поля этой катушки. Для расчета параметров катушек было принято допущение, что катушка является кольцом с равномерной плотностью тока по сечению. Плотность тока вычисляли как произведение количества витков на силу тока, деленное на сечение кольца. Величина магнитной индукции в каждой точке получали интегрированием магнитной индукции от каждого элементарного кольца с током. Краевые условия задавали ограниченной областью распространения магнитной индукции с принятием ее величины на краях равной нулю. Ограниченная область представляла собой цилиндр радиусом 1000 мм и образующей 2000 мм, в котором по центру располагалась катушка. Полученные основные параметры для вертикальной пары катушек были следующими: ток — 120 А, диаметр первого слоя – 108 мм, верхняя группа обмоток — две двойные галеты по 297 слоев, нижняя группа обмоток — две двойные галеты по 527 слоев.

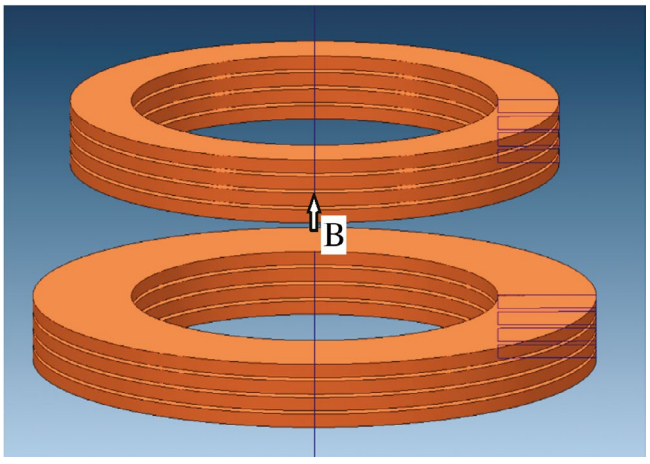

Рис. 2. Модель катушки, создающей вертикальное поле.

Аналогичным образом выполнены расчеты для горизонтальной катушки, основные параметры: ток — 120 А, диаметр первого слоя –130 мм, левая группа обмоток — две двойные галеты по 473 слоя, правая группа обмоток — две двойные галеты по 310 слоев.

Технология намотки катушки, создающей горизонтальное поле, аналогична вертикальной катушке. На рис. 4 показана карта магнитного поля горизонтальной катушки.

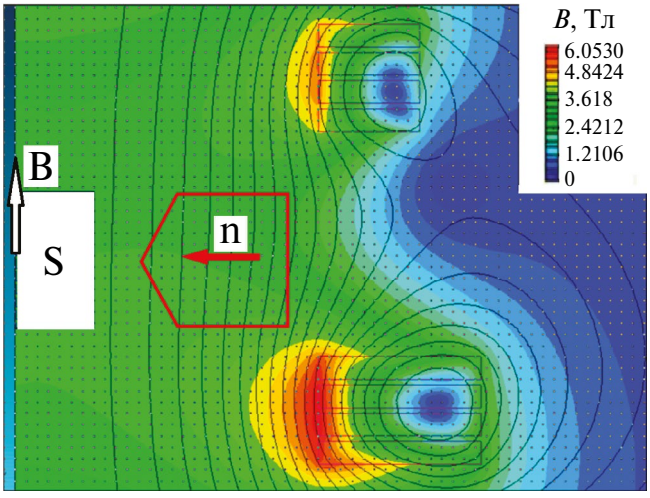

Рис. 3. Карта магнитной индукции *B* вертикальной катушки при токе 120 А, поле в центре – 3 Тл, максимальное поле на первом слое – 5.5 Тл, диаметр первого слоя — 108 мм. Показана сетка с шагом 2 мм. Расстояние между верхней и нижней обмотками — 40 мм. *S* — образец; **n** — направление потока нейтронов.

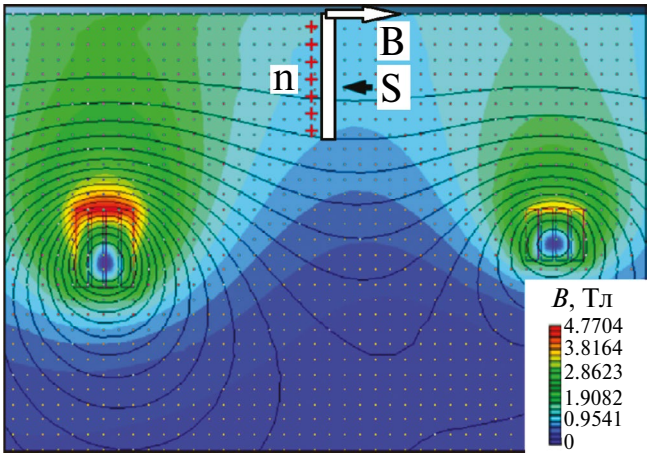

Рис. 4. Карта магнитной индукции B горизонтальной катушки: ток — 120 А, поле в центре — 1 Тл, максимальное поле на первом слое — 4.7 Тл, диаметр первого слоя — 130 мм. Показана сетка с шагом 5 мм. Расстояние между верхней и нижней обмотками — 130 мм. S — образец.

На рис. 5 представлена конструкторская трехмерная модель векторного магнита.

Ленту поставляют мотками длиной от 100 до 300 м. Для получения необходимой длины для намотки каждой двойной галеты необходимо делать спаи из поставленных кусков ленты. Конечный результат карты магнитного поля будет непринципиально отличаться в зависимости от длин кусков поставленной ленты. Результат расчетов показал, что общая длина ленты, необходимой для реализации проекта, составляет 2.9 км.

ТЕРМОСТАТИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ТЕМПЕРАТУР НИЖЕ 1.5 К И ХОЛОДНАЯ ЗАГРУЗКА ОБРАЗЦА ПРИ СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

У коллектива разработчиков низкотемпературной техники для спектрометров на реакторе “ИБР-2” имеется положительный опыт получения температур ниже 1.5 К. Например, разработана установка для получения температур до 0.5 К путем откачки паров жидкого ^{3}He [23, 24]. Для предварительного охлаждения в этой установке использован криокулер замкнутого цикла. Установку применяют для очистки ^{3}He от примесей для использования его в газовых детекторах нейтронов. Также эту установку можно использовать как ожижитель ^{4}He.

Вместе с тем отрабатывают методику холодной загрузки образца в камеру, охлаждаемую растворением ^{3}He в ^{4}He [25]. При таком подходе тепловая связь образца в камере с камерой растворения осуществляется как с газообразной фазой ^{4}He, так и путем переноса по сверхтекучей пленке ^{4}He.

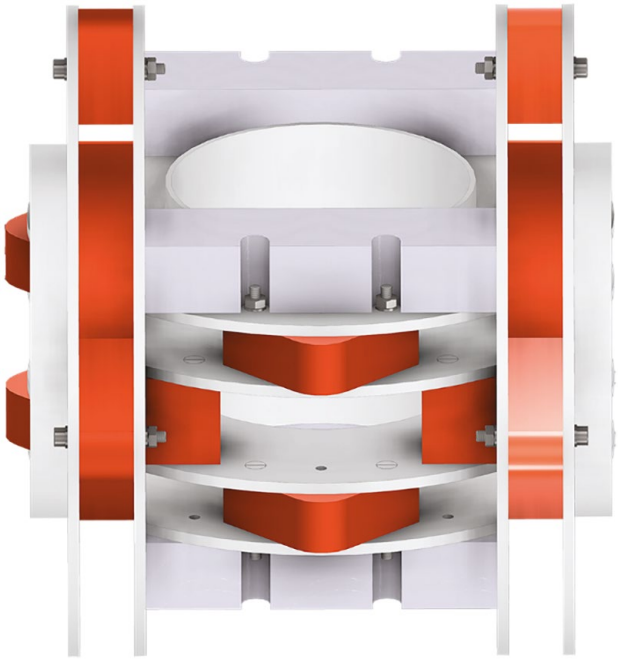

Рис. 5. Конструкторская трехмерная модель магнита.

В [26] описан криостат с рефрижератором растворения ^{3}He в ^{4}He, который совмещен с рефрижератором ^{3}He или ^{4}He, и позволяет производить холодную загрузку образца через вертикальную шахту — трубку диаметром 12 мм. Криостат предназначен для исследований в диапазоне температур 28 мК—4.2 К, его упрощенная схема представлена на рис. 6. Здесь контуры циркуляции обоих рефрижераторов имеют общую ванну с внутренней температурой среды 1 К, в которой происходит ожижение ^{3}He или ^{4}He в конденсаторах, а также располагаемые в ванне испарения капиллярные теплообменники для дополнительного охлаждения конденсированных ^{3}He или ^{4}He. Камера образца является испарителем рефрижератора ^{3}He или ^{4}He. Для осуществления теплового контакта камеры образца с камерой растворения предусмотрен теплообменник.

В [25] сделан пересчет характеристик рефрижератора растворения [26] на диаметры шахты большего размера, включая диаметр — 34 мм, для случая заполнения камеры образца изотопом ^{4}He. Поскольку камера образца герметична по отношению к камере растворения, эта схема криостата будет использована в нейтронном эксперименте на рефлектометре “РЕМУР”. Тепловая связь образца с камерой растворения будет осуществляться путем массового переноса по сверхтекучей пленке после заполнения камеры образца изотопом гелия ^{4}He.

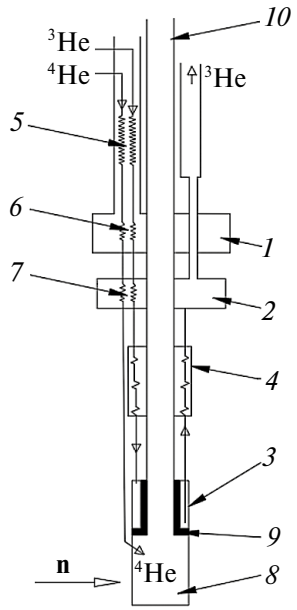

Рис. 6. Рефрижератор растворения ^{3}He в ^{4}He и совмещенный с ним рефрижератор ^{4}He: *1* –ванна с внутренней температурой среды 1 K; *2* — ванна испарения; *3* — камера растворения; *4* — теплообменники рефрижератора растворения; *5* — теплообменники системы циркуляции рефрижераторов; *6* — конденсаторы; *7* — капиллярные теплообменники; *8* — камера образца; *9* — теплообменник; *10* — шахта — трубка для загрузки образца в камеру образца; **n** — направление потока нейтронов.

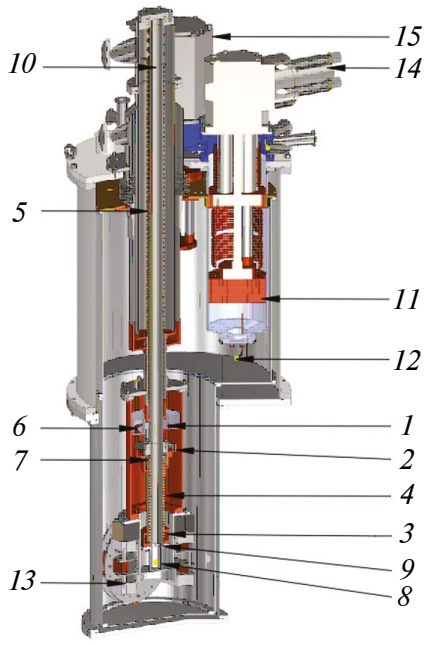

Рис. 7. Конструкторская модель криостата векторного магнита. Позиции *1–10* совпадают с рис. 6; *11* — ожижитель ^{4}He, *12* — трубка подачи жидкого ^{4}He, *13* — векторный магнит, *14* — криокулер ожижителя, *15* — криокулер, предназначенный для охлаждения векторного магнита.

На рис. 7 представлена конструкторская модель криостата векторного магнита и его система термостатирования. Криостат содержит рефрижератор растворения ^{3}He в ^{4}He, охлаждаемый жидким ^{4}He, который нарабатывается в ожижителе, расположенным в этом же криостате. Ожижитель основан на криокулере замкнутого цикла. Криостат также имеет второй криокулер, который охлаждает векторный магнит.

Таким образом, модель исключает необходимость использования внешних поставок жидкого ^{4}He. Однако для ее реализации газовые коммуникации криостата необходимо оборудовать мягким газгольдером для хранения газообразного ^{4}He объемом около 1.5 м^3, что соответствует 2 л жидкого ^{4}He. Такое количество жидкого ^{4}He достаточно для максимального заполнения ванны рефрижератора растворения ^{3}He в ^{4}He и нижней части ожижителя ^{4}He.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация настоящего проекта позволит достичь следующих результатов. Будет получена технология создания сильных магнитных полей с использованием высокотемпературной сверхпроводящей ленты шириной 4 мм с диметром первого слоя до 130 мм, который определяет свободный проход не менее 120 мм. Будет реализована технология получения сильных магнитных полей с использованием высокотемпературной сверхпроводящей ленты без использования диэлектрической изоляции с целью получения максимальной плотности тока и компактности катушек. Будет разработан векторный магнит, позволяющий менять направление магнитной индукции в двух направлениях, а третье направление будет задаваться вращением криостата вокруг вертикальной оси магнита. Будет разработан рефрижератор растворения ^{3}He в ^{4}He с холодной загрузкой образца с диаметром шахты 34 мм, предназначенный для работы на пучках тепловых нейтронов. Рефрижератор растворения будет охлаждаться жидким ^{4}He, нарабатываемым в ожижителе на основе криокулера замкнутого цикла, расположенным в общем с рефрижератором растворения криостате. Указанные выше технологические достижения позволят развить рефлектометрию поляризованных нейтронов в область сверхнизких температур.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, соглашение № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15.

СИН.21.0021) в части создания технического проекта; частичной финансовой поддержке РНФ, грант № 22-72-00116 — обоснование научной программы низкотемпературных исследований; частичной финансовой поддержке ИПФ РАН, проект № FFUF-2022-0007 в части моделирования теплопритока по токовводам.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mironov S.*, *Mel'nikov A.S.*, *Buzdin A.* // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 113. P. 022601. https://doi.org/10.1063/1.5037074
2. *Buzdin A.I.* // Rev. Mod. Phys. 2005. V. 77. P. 935. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.77.935
3. *Anderson P.W.*, *Suhl H.* // Phys. Rev. 1959. V. 116. P. 898. https://doi.org/10.1103/PhysRev.116.898
4. *Nikitenko Yu.V.*, *Zhaketov V.D.* // Phys. Particles Nuclei. 2022. V. 53. P. 1089. https://www.doi.org/10.1134/S1063779622060065
5. *Khaydukov Yu.*, *Pütter S.*, *Guasco L.*, *Morari R.*, *Kim G.* // Beilstein J. Nanotechnol. 2020. V. 11. P. 1254. https://doi.org/10.3762/bjnano.11.109
6. *Klenov N.*, *Khaydukov Yu.*, *Bakurskiy S.*, *Morari R.*, *Soloviev I.*, *Boian V.*, *Keller Th.*, *Kupriyanov M.*, *Sidorenko A.*, *Keimer B.* // Beilstein J. Nanotechnol. 2019. V. 10. P. 833. https://doi.org/10.3762/bjnano.10.83
7. *Aoki D.*, *Ishida K.*, *Flouquet J.* // J. Phys. Soc. Jpn. 2019. V. 88. Iss. 2. P. 022001. https://www.doi.org/10.7566/JPSJ.88.022001
8. *Aksenov V.L.*, *Jernenkov K.N.*, *Khaidukov Yu.N.*, *Nikitenko Yu.V.*, *Petrenko A.V.*, *Proglyado V.V.*, *Andersson G.*, *Wappling R.* // Physica B. 2004. V. 356. P. 9. https://www.doi.org/10.1016/j.physb.2004.10.036
9. *Kozhevnikov V.F.*, *Giuraniuc C.V.*, *van Bael M.J.*, *Temst K.*, *Haesedonck Ch.V.*, *Mishonov T.M.*, *Dalgliesh T.R.*, *Khaidukov Yu.N.*, *Aksenov V.L.*, *Fomin V.M.*, *Devreese J.T.*, *Indekeu J.* // Phys. Rev. B. 2008. V. 78. P. 012502. https://www.doi.org/10.1103/PhysRevB.78.012502
10. *Aksenov V.L.*, *Nikitenko Yu.V.*, *Khaidukov Yu.N.*, *Vdovichev S.N.*, *Borisov M.M.*, *Morkovin A.N.*, *Mukhamedzhanov E.Kh.* // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2009. V. 3. P. 495. https://www.doi.org/10.1134/S1027451009040016
11. *Khaydukov Yu.N.*, *Aksenov V.L.*, *Nikitenko Yu.V.*, *Zhernenkov K.*, *Nagy B.*, *Teichert A.*, *Steitz R.*, *Ruhm A.*, *Bottyan L.* // J. Supercond. Nov. Magn. 2011. V. 24. P. 961. https://www.doi.org/10.1007/s10948-010-1041-0
12. *Фатеев О.В.*, *Черемухина Г.А.*, *Черненко С.П.*, *Заневский Ю.В.*, *Лаутер Х.*, *Кожевников С.И.*, *Никитенко Ю.В.*, *Петренко А.В.* // ПТЭ. 2001. Т. 2. С. 5.
13. *Аксенов В.Л.*, *Жерненков К.Н.*, *Кожевников С.В.*, *Лаутер Х.*, *Лаутер-Пасюк В.*, *Никитенко Ю.В.*, *Петренко А.В.* // Сообщения ОИЯИ. 2004. С. 47.
14. *Zhaketov V.D.*, *Hramko K.*, *Petrenko A.V.*, *Khaydukov Yu.N.*, *Csik A.*, *Kopatch Yu.N.*, *Gundorin N.A.*, *Nikitenko Yu.V.*, *Aksenov V.L.* // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2021. V. 15. P. 549. https://www.doi.org/10.1134/S1027451021030356
15. *Zhaketov V.D.*, *Petrenko A.V.*, *Vdovichev S.N.*, *Travkin V.*, *Csik A.*, *Kopatch Yu.N.*, *Gledenov Yu.*, *Sansarbayar E.*, *Gundorin N.A.*, *Nikitenko Yu.V.*, *Aksenov V.L.* // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2019. V. 13. P. 478. https://www.doi.org/10.1134/S1027451019030352
16. *Zhaketov V.D.*, *Nikitenko Yu.V.*, *Khaidukov Yu.N.*, *Scryabina O.*, *Csik A.*, *Borisov M.M.*, *Mukhamedzhanov E.Kh.*, *Vdovichev S.N.*, *Litvinenko E.I.*, *Petrenko A.V*, *Churakov A.V.* // JETP. 2019. V. 129. P. 258. https://www.doi.org/10.1134/S1063776119070136
17. *Khaydukov Yu.N.*, *Kravtsov E.A.*, *Zhaketov V.D.*, *Progliado V.V.*, *Kim G.*, *Nikitenko Yu.V.*, *Keller T.*, *Ustinov V.V.*, *Aksenov V.L.*, *Keimer B.* // Phys. Rev. B. 2019. V. 99. P. 140503. https://www.doi.org/10.1103/PhysRevB.99.140503
18. *Khaydukov Yu.N.*, *Vasenko A.S.*, *Kravtsov E.A.*, *Progliado V.V.*, *Zhaketov V.D.*, *Csik A.*, *Nikitenko Yu.V.*, *Petrenko A.V.*, *Keller T.*, *Golubov A.*, *Kupriyanov M.Yu.*, *Ustinov V.V.*, *Aksenov V.L.*, *Keimer B.* // Phys. Rev. B. 2018. V. 97. P. 144511. https://www.doi.org/10.1103/PhysRevB.97.144511
19. *Devyaterikov D.I.*, *Kravtsov E.A.*, *Proglyado V.V.*, *Zhaketov V.D.*, *Nikitenko Yu.V.* // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2022. V. 16. P. 839. https://www.doi.org/10.1134/S1027451022050299
20. *Dobrin I.*, *Chernikov A.*, *Kulikov S.*, *Buzdavin A.*, *Culicov O.*, *Morega A.*, *Dobrin A.* // IEEE Trans. Appl. Superconduct. 2016. V. 26. P. 1. https://www.doi.org/10.1109/TASC.2016.2520086
21. *Chernikov A.*, *Dobrin I.*, *Kovalenko N.*, *Kulikov S.*, *Culicov S.*, *Popovici I.*, *Dobrin A.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1021. P. 012048. https://www.doi.org/10.1088/1742-6596/1021/1/012048
22. S-Innovations (2020) Россия. https://www.s-innovations.ru/
23. *Chernikov A.N.* Refrigerator ^{3}He based on closed cycle cryocooler cooling. // Proc. International Conference Condensed Matter Research at the IBR-2. April 25-292022, Dubna. P. 47.
24. *Chernikov A.N.* // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2023. V. 17. P. 473. https://www.doi.org/10.31857/S1028096023040040
25. *Черников А.Н.* Рефрижератор растворения ^{3}He в ^{4}He с вертикальной загрузкой предназначенный для нейтронного эксперимента. // Тезисы докладов РНИКС, 27 сентября — 1 октября 2021, Екатеринбург. С. 279.
26. *Chernikov A.N.*, *Kiselev Yu.F.* // Cryogenics. 1990. V. 30 P. 52. https://www.doi.org/10.1016/0011-2275(90)90115-S

Development of a Vector Magnet Based on High-Temperature Superconductors for Working with Polarized Neutrons

A. V. Altynov[1], A. P. Buzdavin[1], V. I. Bodnarchuk[1], V. D. Zhaketov[1, 2, 3], A. V. Petrenko[1], M. D. Proyavin[4], A. N. Chernikov[1, 4, *]

[1]Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow region, 141980 Russia
[2]Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, 141701 Russia
[3]Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia
[4]A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

**e-mail: chern@nf.jinr.ru*

Polarized neutron reflectometry is an experimental method for studying metallic thin heterophase layered materials, polymer films, biological systems, free liquide surfaces, and magnetic fluids. It requires experimental equipment that includes a special magnetic system. The described magnetic system, a vector magnet, will allow one to change the direction of the magnetic field in three directions, to place a temperature-control device inside at low and ultra-low temperatures, and will have an aperture that allows one to place a system for detecting neutrons and gamma radiation outside. According to calculations, the cryomagnet will allow the application of a maximum field of up to 3 T in the vertical plane, and of up to 1 T in the horizontal plane. It is proposed to use a 4 mm wide high-temperature superconductor tape to manufacture the vector magnet. A cryostat with a vector magnet will be installed on the REMUR reflectometer on the eighth channel of the IBR-2 reactor.

Keyworlds: vector magnet, high-temperature superconductor, ultra-low temperature, polarized neutrons, neutron reflectometry