

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(государственный университет)

Кафедра прикладной физики

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ
СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ**

Лабораторная работа №25

МОСКВА 2010

УДК 538.945

Составитель д.ф.-м.н. В.А.Вентцель

Высокотемпературная сверхпроводимость:
Лабораторная работа/ Сост. В.А.Вентцель. – М.: МФТИ, 2010. – 20 с

В разработках приборов для исследований физических свойств материалов широкое применение находят узлы, использующие явление сверхпроводимости. Высокотемпературная сверхпроводимость открывает широкие возможности использования этого явления, поскольку необходимо охлаждение лишь до температур кипения жидкого азота.

В лабораторной работе изучается поведение магнитных характеристик образца при переходе в сверхпроводящее состояние. Студенты получают сведения о принципах конструирования аппаратов для работы с низкими температурами, и они приобретают навыки работы с криогенными устройствами.

© Московский физико-технический институт
(государственный университет), 2010

Содержание

1. Введение.....	4
2. Цель работы.....	8
3. Описание методики эксперимента.....	8
3.1. Принцип работы установки.....	8
3.2. Управление контроллером.....	11
3.3. Программное обеспечение.....	12
3.4. Криостат.....	14
3.5. Образцы.....	15
4. Порядок работы.....	16
4.1 Подготовка установки к работе.....	16
4.2. Выполнение работы.....	16
5. Литература.....	20

1. ВВЕДЕНИЕ

Явление сверхпроводимости было открыто в 1908 году Камерлинг–Оннесом и с тех пор продолжает привлекать к себе пристальное внимание во многом благодаря возможностям практического применения этого эффекта.

Самое важное проявление сверхпроводимости состоит в полной потере сопротивления при температуре ниже критической температуры T_c . У металлов, которые становятся сверхпроводниками, T_c изменяется от 9.3 К (Nb) до 0.01 К (W). Сверхпроводящие бинарные сплавы имеют богатейший набор T_c , самая высокая критическая температура у Nb_3Sn — 18 К. Самая высокая температура перехода порядка 120 К у высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с решеткой типа перовскита. Типичный представитель этого класса соединений — $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

Магнитное поле H , магнитная индукция B и намагниченность I (магнитный момент M единицы объёма или массы) связаны в гауссовой системе единиц соотношениями

$$B = H + I = (1 + 4\pi\chi)H = \mu H.$$

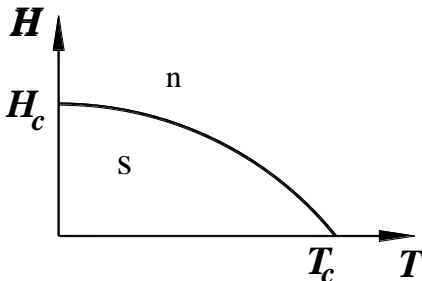


Рис.1. Область существования сверхпроводимости I рода

Из того, что внутри сверхпроводника $B = 0$, следует, что магнитная восприимчивость χ равна $-1/4\pi$. Выталкивание магнитного поля происходит за счет экранирующих токов, текущих по поверхности и создающих собственное магнитное поле, в точности равное внешнему полю. Важной индивидуальной характеристикой сверхпро-

водника является глубина проникновения магнитного поля λ , описывающая характер затухания поля в глубине:

$$B(x) = B(0) \exp(-x/\lambda).$$

Область существования сверхпроводящей фазы ограничена критическими значениями температуры, магнитного поля и транспортного тока через образец. Граница раздела нормальной и сверхпроводящей фаз представлена на рис. 1.

Рассмотрим, как ведёт себя свободная энергия F сверхпроводника в магнитном поле. В дифференциальной форме зависящая от T и H часть F имеет вид

$$dF = -SdT - MdH.$$

Для свободной энергии можно записать

$$F(H, T) = F(0, T) - \int_0^H MdH.$$

В нормальном состоянии магнитный момент парамагнетика или диамагнетика ничтожно мал. Для сверхпроводника магнитный момент равен $-H/4\pi$ и получаем для нормальной и сверхпроводящей фаз выражения

$$F_n(H, T) = F_n(0, T),$$

$$F_s(H, T) = F_s(0, T) + \frac{H^2}{8\pi}.$$

Графики этих функций изображены на рисунке 2. Переход сверхпроводника в нормальное состояние происходит при $H = H_c$ когда сравниваются потенциалы, и отсюда получаем

$$F_n(0, T) = F_s(0, T) + \frac{H_c^2}{8\pi}.$$

Металлы, которые являются сверхпроводниками I рода, имеют невысокие критические параметры. Так, например, у свинца $T_c = 7.2$ К и $H_c = 803$ Э. Для других металлов эти параметры ещё ниже.

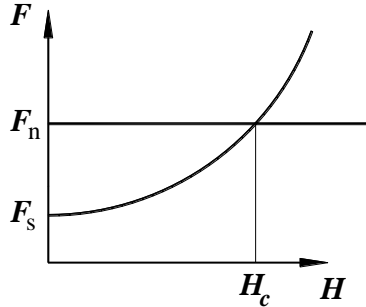


Рис. 2. Свободная энергия F в зависимости от магнитного поля

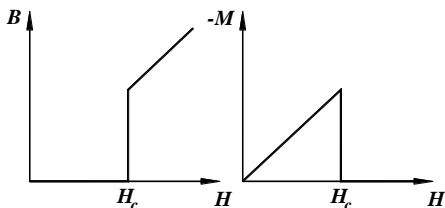


Рис.3. Магнитные характеристики сверхпроводников I рода

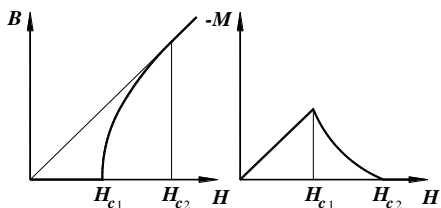


Рис.4. Магнитные характеристики сверхпроводников II рода

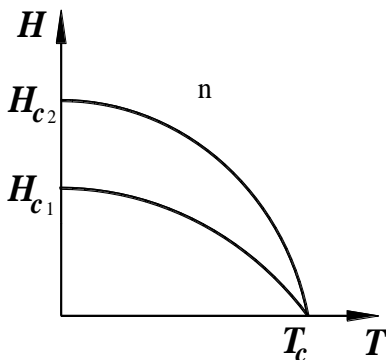


Рис.5. Область существования сверхпроводимости II рода

В магнитном поле сверхпроводник I рода намагничивается как идеальный диамагнетик. Зависимость магнитной индукции B и магнитного момента M от приложенного поля H изображена на рис. 3.

Сверхпроводники II рода в слабых магнитных полях (до H_{c1}) ведут себя так же, как и сверхпроводники I рода, а затем магнитное поле начинает постепенно проникать в глубину. Полное проникновение поля и восстановление сопротивления происходит при достижении второго критического поля H_{c2} . Магнитные характеристики сверхпроводников II рода изображены на рис. 4, а фазовая диаграмма на рисунке 5.

В области полей ниже H_{c1} они находятся в истинно сверхпроводящей ("мейснеровской") фазе, а между первым и вторым критическими полями переходят в «смешанное состояние», в котором в сверхпроводящей матрице появляются нормальные области в виде вихрей Аб-

рикосова.

Почему сверхпроводник переходит в смешанное состояние? У него имеется два индивидуальных параметра: глубина проникновения магнитного поля λ и длина корреляции ξ . Их отношение $\kappa = \lambda/\xi$ носит название параметра Гинзбурга – Ландау. Длина корреляции ξ характеризует расстояние между электронами в куперовской паре. Для чистых сверхпроводников I рода ξ имеет порядок 10^{-4} см, а λ порядка 10^{-6} см. Можно показать, что при таком соотношении параметров появление границы между сверхпроводящей фазой и зародышем нормальной фазы привело бы к положительному значению поверхностной энергии на границе раздела .

У сверхпроводников II рода отношение параметров обратное: глубина проникновения больше, чем длина когерентности. Критическое значение параметра равно $2^{-1/2}$. Если $\kappa < \kappa_{\text{крит}}$ то тогда поверхностная энергия положительна и существует только сверхпроводимость I рода. Если $\kappa > \kappa_{\text{крит}}$ то тогда поверхностная энергия отрицательна и сверхпроводнику II рода выгодно перейти в смешанное состояние.

Выгодность образования границы раздела между нормальной и сверхпроводящей фазами приводит к тому, что после некоторого критического магнитного поля H_{c1} возникает смешанное состояние. Как и в мейснеровской фазе, по поверхности продолжают циркулировать круговые токи, экранирующие внешнее магнитное поле. Наряду с этим, возникают токовые вихри Абрикосова, в которых электроны вращаются в противоположном направлении. Эти вихревые токи создают структуру, подобную длинному соленоиду, пронизывающему весь образец. Внутри вихря в области размером порядка ξ нормальная область и отличное от нуля магнитное поле. Снаружи в области размером порядка λ циркулируют сверхпроводящие токи, и вне её расположена сверхпроводящая область, в которой магнитное поле равно нулю. Чем меньше размер вихря, тем больше отношение поверхности к объему вихрей. Минимальный размер определяется условием, что поток индукции не может быть меньше кванта потока $h/2e$,

называемого флюксоном. По мере роста магнитного поля растёт число вихрей. Это приводит тому, что поля от отдельных вихрей начинают перекрываться и, наконец, индукция B достигнет величины внешнего поля H . В этот момент сверхпроводник полностью перейдет в нормальное состояние и его сопротивление станет конечным.

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является ознакомление с явлением сверхпроводимости, наблюдение перехода в сверхпроводящее состояние образца из металлооксидной керамики, определение температуры перехода T_c . Кроме того, студенты знакомятся с модуляционным методом измерения магнитной восприимчивости (АС – магнетометр) и методами регулировки температуры.

3. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1. Принцип работы установки

Для измерения магнитной восприимчивости сверхпроводника в задаче используется модуляционный метод измерения, принцип работы которого состоит в следующем. На оси прибора расположены две одинаковые измерительные катушки, одна из которых пустая, а в другой помещён исследуемый образец. Поверх этих катушек расположена третья модуляционная катушка, в которую подаётся переменный ток частоты ω , создающий небольшое переменное магнитное поле

$$h = h_0 \sin \omega t$$

В измерительных катушках наводится ЭДС $E = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}$. Магнитный поток $\Phi = BNS$, где N – число витков катушки. Площадь пустой катушки равна S_1 , а в катушке с образцом площадь состоит из площади S_0 , занятой образцом, и площади $S^* = S_2 - S_0$ без образца. В областях, где нет образца, $B = h$, а там, где поток прони-

зывает образец, $B = \mu h = (1 + 4\pi\chi)h$. Измерительные катушки включены навстречу друг другу, так что их ЭДС вычитаются. Если $N_1S_1 = N_2S_2$, то тогда разностный сигнал на выходе этой пары катушек равен

$$E = -\frac{4\pi\chi}{c} NS_0 h \omega \cos \omega t$$

Принципиальная блок-схема установки представлена на рис.1. Переменный сигнал заданной частоты с генератора синхронного детектора SR510 подается на модуляционную катушку 1 через усилитель, интегрированный в контроллер AC77. Магнитное поле, создаваемое модуляционной катушкой 1, наводит в каждой из приемных катушек 2 переменную ЭДС той же частоты

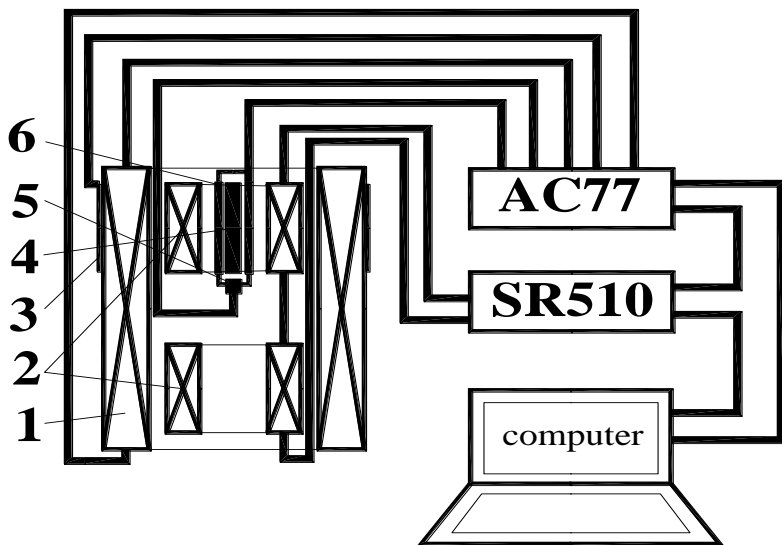


Рис. 6. Блок-схема установки. 1 – модуляционная катушка, 2 - приёмные катушки, 3 – компенсационная катушка, 4 – образец, 5 - платиновый термометр, 6 – нагреватель, AC77 – контроллер, SR510 – синхронный детектор

ты. Приемные катушки 2 имеют равное количество витков и включены навстречу друг другу (астатическая пара), поэтому в отсутствие образца суммарный сигнал катушек почти равен нулю (компенсационная схема). В области одной из приемных катушек поверх модуляционной катушки 1 намотаны две компенсационные катушки 3, на которые с контроллера подаются малые переменные сигналы управляемой амплитуды – один синфазно с сигналом модуляции, другой со сдвигом по фазе на 90° . Такая схема позволяет дополнительно компенсировать систему до достижения нулевого суммарного сигнала в отсутствие образца.

Компенсация катушек нарушается, когда в верхнюю приемную катушку помещают образец. На выходе системы появляется переменная ЭДС, величина которой пропорциональна намагниченности образца.

Сигнал раскомпенсации с астатической пары катушек подается на синхронный детектор, который выделяет и усиливает только сигнал с частотой, строго равной частоте опорного модулирующего сигнала (подаваемого с внутреннего генератора того же синхронного детектора). Этот сигнал максимален, когда фаза измеряемого сигнала совпадает с фазой опорного сигнала. Таким образом, синхронный детектор измеряет амплитуду полезного сигнала от образца, почти полностью игнорируя шумы и паразитные наводки за счет процедуры детектирования, что позволяет значительно повысить чувствительность установки. Далее сигнал, пропорциональный магнитной восприимчивости образца, передается по интерфейсу *RS-232* на компьютер в измерительную программу.

Температура образца измеряется платиновым термометром сопротивления 5, находящимся в непосредственной близости с образцом внутри приемной катушки. Нагрев измерительной ячейки с образцом и термометром осуществляется при помощи нагревателя 6, намотанного бифилярно на сапфировом держателе. Измерение сопротивления термометра и управление током нагревателя осуществляет температурный контроллер, также подключенный по интерфейсу *RS-232* к компьютеру. Таким образом, управление током нагревателя может осуществляться как в

ручном режиме ручкой потенциометра на лицевой панели контроллера, так и в автоматическом режиме компьютерной программой. Стабилизация температуры измерительной ячейки производится компьютерной программой при помощи трехпараметрического пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора температуры. Стандартный алгоритм работы ПИД – регулятора связывает величину разбаланса температуры $\Delta T = T_0 - T$ (T_0 – заданная температура) с выходным параметром (в данном случае – с током через нагреватель) регулятора через сумму трех вкладов:

$$u(t) = K_p \Delta T + K_I \int_0^t \Delta T(t') dt' + K_D \frac{d(\Delta T(t))}{dt}$$

где K_p , K_I , K_D – коэффициенты, определяющие относительные величины каждого из вкладов. Первая составляющая $K_p \Delta T$ определяет мгновенный отклик, пропорциональный разнице между текущим и заданным для стабилизации значением температуры ΔT , в то время как два следующих члена зависят от временного поведения температуры регулируемого объекта. Развертка температуры может осуществляться в двух режимах: линейная развертка температуры (используется ПИД – алгоритм с линейным изменением параметра T_0) и линейная развертка мощности, рассеиваемой нагревателем.

Зависимость $\chi(T)$ может измеряться как при нагреве измерительной ячейки (увеличение тока нагревателя), так и при охлаждении (уменьшение тока нагревателя). При этом приемные и модуляционная катушки должны постоянно находиться в жидком азоте, что необходимо для уменьшения раскомпенсации измерительной системы при изменении температуры.

3.2. Управление контроллером.

Слева вверху на лицевой панели контроллера на цифровых индикаторах выводятся текущие значения температуры измерительной ячейки и тока нагревателя соответственно. Под индикатором тока расположены выключатель и ручка ручной

развертки тока нагревателя, которые предназначены для регулирования тока нагревателя в ручном режиме. **При выполнении задачи студенты используют только автоматический режим.**

Правее расположены тумблеры полярности (0 – 180 и 90 – 270) и ручки многооборотных потенциометров, предназначенные для компенсации сигнала с астатической пары приемных катушек. Многооборотные ручки позволяют плавно менять амплитуду сигналов компенсирующих катушек, что позволяет добиться высокой точности компенсации. Процедура компенсации пустой пары катушек будет описана ниже.

Справа на лицевой панели расположены разъёмы *SINE IN* для подключения генератора синхронного детектора и *INSERT* – для подключения измерительной вставки, а также выключатель питания *220V POWER*.

3.3. Программное обеспечение.

Управление экспериментом осуществляется программой персонального компьютера в набор функции которой входят следующие основные действия:

- опрос приборов и сбор информации о текущих значениях температуры и амплитуды сигнала с приемных катушек, визуализация полученных данных;
- построение по полученным данным графика зависимости сигнала с приемных катушек от температуры и запись данных в файл;
- линейная развертка мощности, рассеиваемой нагревателем в зоне ячейки с образцом, с заданной в программе скоростью;
- стабилизация и линейная развертка температуры ячейки с образцом с заданной в программе скоростью.

В верхнем левом углу основного окна экспериментальной программы расположены поля индикации сигнала синхронного детектора и задания количества измерений для усреднения (сред-

нее арифметическое). В самом низу слева расположено поле выбора частоты сигнала модуляции.

Между указанными полями расположен блок «Температура» предназначенный для контроля за температурой и управления её изменением.

В блоке «Температура» доступны следующие возможности управления и контроля:

- визуализация текущего значения температуры;
- визуализация текущего значения тока нагревателя;
- запуск «вверх», «вниз» и остановка линейной развертки температуры или мощности, рассеиваемой нагревателем (в зависимости от выбранной опции в диалоговом окне «Контроллер температуры»);
- визуализация и управление и текущими параметрами развертки температуры или мощности, рассеиваемой нагревателем;
- вызов диалогового окна «Контроллер температуры».

Диалоговое окно «Контроллер температуры», предназначенное для стабилизации температуры в режиме ПИД – регулирования. В поле «Температура, К» выводится текущее значение температуры, поле «Установка Температуры, К» позволяет задавать значение стабилизируемой температуры ячейки с образцом. Поля «Параметры регулятора» используются для задания значений параметров ПИД – регулятора, при этом в автоматическом режиме числа в полях «Вклад в сигнал управления» отражают вклады соответствующих ПИД – компонент в выходном сигнале регулятора. Переключатель «Регулятор» предназначен для переключения между автоматическим и ручным режимами стабилизации температуры. Поле «Ток нагревателя, мА» используется для задания тока через нагреватель в ручном режиме регулятора, а также для отображения текущего значения тока нагревателя в автоматическом режиме. Кнопка «Сброс тока» предназначена для быстрого выключения тока в ручном режиме. Переключатель «Развертка» позволяет выбирать между режимами линейной развертки температуры и квадратичной развертки тока нагревателя (линейная развертка мощности).

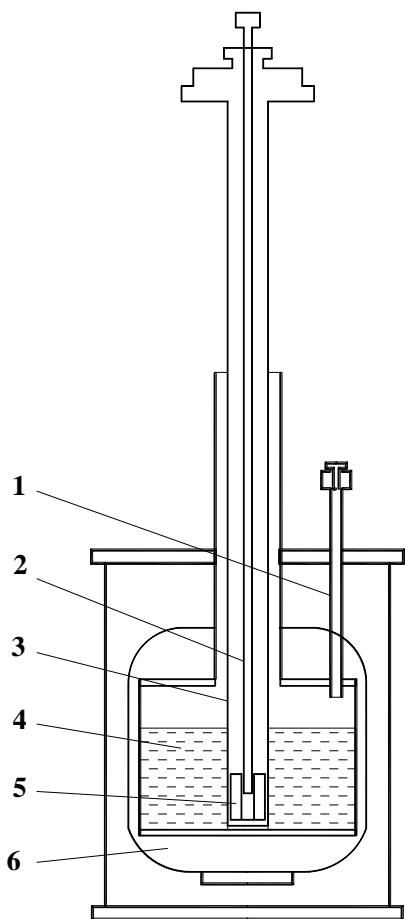


Рис.7. Криостат. 1 – заливка жидкого азота, 2 – трубка с образцом, 3 – вставка измерительная, 4 - ёмкость с жидким азотом, 5 - модуляционные и измерительные катушки, 6 – вакуумное пространство

В правой части диалогового окна «Контроллер температуры» приводится график, показывающий изменения температуры образца в режиме реального времени. Вертикальный масштаб задается линейным переключателем, расположенным под графиком.

Запись данных в файл осуществляется при включенной кнопке «Старт» в основном окне экспериментальной программы. Имя файла, в который записываются данные, вводится в дополнительном диалоговом окне, активируемом при нажатии кнопки «Выбор...». Данные в файл записываются в следующем формате: 1 столбец – температура (К), 2 столбец – сигнал с синхронного детектора (В), 3 столбец – время с запуска программы (с), 4 столбец – частота модуляции (Гц).

3.4. Криостат

Схематически устройство криостата изображено на рис. 7. Жидкий азот заливается в сосуд

Дьюара 4, который состоит из цилиндрического сосуда, заключённого внутри сосуда с выпуклыми крышками. Пространство между стенками сосудов откачено до высокого вакуума, а поверхности сосудов обмотаны слоями суперизоляции, которая обладает низкой теплопроводностью и прекрасной отражательной способностью. Эти сосуды укреплены на верхнем фланце стойки, через который проходят центральная трубка для опускания прибора 3 и боковая трубка для заливки жидкого азота 1. Обе трубки снабжены пробками, которые имеют сальниковое уплотнение с резиновым кольцом, поджимаемым накидной гайкой.

В центральное отверстие вставляется держатель с системой модуляционных и измерительных катушек, а также с термометром и нагревателем 5. Система катушек помещена в медный стакан, вставленный в тонкостенную трубку из нержавеющей стали, которая выходит в тёплую зону криостата. Образец на длинной трубке 2 из этого же материала вставляется в держатель через сальниковое уплотнение в верхней части держателя.

Для контроля за уровнем жидкого азота в сосуде используется медная трубка. При погружении её тёплого конца в жидкость азот начинает интенсивно кипеть и фонтанировать через верх трубки.

3.5. Образцы

В работе исследуются образцы из металлооксидной керамики состава $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ или другого состава, в котором могут быть заменены редкоземельные элементы. Такая замена практически не влияет на температуру сверхпроводящего перехода, поскольку все они образуют кристаллическую решётку типа перовскита, в которой решающим, с точки зрения сверхпроводимости, является наличие плоскостей, в которых чередуются атомы меди и кислорода.

Образцы приготавливаются из смеси окислов металлов в нужном соотношении иттрия, бария и меди (1:2:3). Смесь прессуется в виде цилиндров и спекается на воздухе при температуре порядка 1500° С. Структура керамики такова, что отдельные кристаллиты спечены между собой, но между ними остаются пусто-

ты. Таким образом, не весь объём образца заполнен сверхпроводящим материалом. Керамика получается сверхпроводящей при концентрации кислорода от 6.5 до 7. Со временем кислород покидает решётку, и возникают несверхпроводящие области. Это отличает керамические образцы от сплошных металлических образцов, в которых сверхпроводимость существует во всём объёме образца.

4. ПОРЯДОК РАБОТЫ

4.1. Подготовка установки к работе

Перед работой внимательно изучите настоящее описание. Перед тем, как включать приборы убедитесь в правильности подключения приборов в соответствии со схемой, данной в приложении.

Убедитесь, что выключатель ручного управления нагревателем на лицевой панели контроллера находится в положении “*off*”, а ручка развертки тока нагревателя находится в крайнем левом положении. Включите последовательно питание контроллера, затем питание синхронного детектора. Включите компьютер и запустите программное обеспечение.

Установка готова к работе.

4.2. Выполнение работы

Подготовьте криостат к работе. Для этого поместите вставку в криостат и небольшими порциями залейте жидкий азот через воронку. Для определения уровня азота опустите в заливное отверстие медную трубку. Для нормальной работы установки необходимо, чтобы в начале фонтанирования жидкого азота верхний конец медной трубки находился на уровне верха заглушки для штока с образцом.

Рекомендуемое время охлаждения вставки до азотной температуры 20 минут.

Установите в программе рекомендуемую частоту модуляции 27 Гц.

Дождитесь, пока ячейка охладится до температуры около 85 К и приступите к настройке установки.

Первый этап

Прежде всего нужно как можно точнее скомпенсировать сигнал в измерительных катушках до помещения в них образца. Для этого нужно подать в компенсационные катушки 3 (см. рис. 6) сигнал нужной амплитуды с нужным сдвигом фазы. Используя ручки компенсации на передней панели контроллера, добейтесь компенсации в пределах 200 нВ следующим образом:

1. Оперируя кнопками точного изменения сдвига фазы на синхронном детекторе (сектор *PHASE*, кнопки *FINE*), подберите такой сдвиг фазы, при котором сигнал наименее чувствителен к положению ручки регулировки амплитуды сигнала компенсации, синфазного с сигналом модуляционной катушки.
2. Ручкой регулировки амплитуды и переключателем полярности сигнала компенсации, сдвинутого по фазе на угол $\varphi = 90^\circ$ относительно сигнала модуляционной катушки, установите сигнал синхронного детектора близким к нулю. Измените сдвиг фазы на 90° (лицевая панель синхронного детектора, сектор *PHASE*, кнопки 90°),
3. Ручкой регулировки амплитуды и переключателем полярности сигнала компенсации, синфазного с сигналом модуляционной катушки установите сигнал синхронного детектора близким к нулю. Измените сдвиг фазы на 90° (лицевая панель синхронного детектора, сектор *PHASE*, кнопки 90°),
4. Повышая чувствительность синхронного детектора (лицевая панель синхронного детектора, сектор *SENSIVITY*) до 1 мкВ и повторяя шаги 3 и 4, добейтесь значений сигнала синхронного детектора в пределах 200 нВ.

Второй этап

Установите на синхронном детекторе необходимую чувствительность и сдвиг фазы, определенный с помощью калибровочного образца. Процедура калибровки проводится так:

1. поместите на держатель штока калибровочный образец (феррит),
2. поместите шток с образцом в измерительную вставку,

3. дождитесь, пока образец охладится и установятся фиксированные значения температуры и сигнала,
4. постепенно перемещая шток вверх-вниз найдите такое положение, при котором сигнал максимален,
5. установите сдвиг фазы измеряемого сигнала на синхронном детекторе таким, при котором сигнал максимален,
6. еще раз повторите пункты 4 и 5,
7. запишите найденное значение сдвига фазы для данной конфигурации,
8. удалите шток с калибровочным образцом из измерительной вставки.

Третий этап

По окончании калибровок установите образец в держатель штока и поместите шток с образцом в канал измерительной вставки.

При установке образца на держатель штока заполняйте оставшиеся пустоты в держателе медицинской ватой, чтобы образец жестко фиксировался в ячейке. Также используйте вату для плотной фиксации ячейки с образцом на штоке чтобы не уронить ячейку на дно дьюара в процессе эксперимента.

Дождитесь, пока образец охладится и установятся фиксированные значения температуры и сигнала. Постепенно перемещая шток вверх-вниз, найдите такое положение, при котором сигнал максимален.

Установите в программе название и расположение файла для записи данных.

Четвёртый этап

Для измерения температурной зависимости магнитной восприимчивости $\chi(T)$ необходимо подобрать нужные параметры ПИД – закона при управлении работой контроллера .

При линейной развертке температуры необходимо:

- Открыть диалоговое окно «Контроллер температуры» и поставить переключатель развертки в положение «Температура».
- Установить в поле «Установка температуры» начальное значение температуры, которое на 5 – 10 градусов выше

минимальной температуры, до которой охладился образец.

- Установить корректные ПИД – параметры и включить автоматическую стабилизацию температуры (Рекомендуемые параметры $K_P = 4$, $K_I = 0,15$, $K_D = 10$), дождаться удовлетворительной стабилизации температуры и закрыть диалоговое окно «Контроллер температуры». Подход температуры к выбранному значению должен носить характер сильно затухающих осцилляций.
- Задайте желаемую скорость развертки температуры, нажмите «старт» для записи данных в файл и запустите развертку.

При установке скорости развертки температуры учитывайте, что **максимальные точность измерения температуры и чувствительность установки достигаются при минимальной скорости развертки.**

По достижении максимальной температуры, нажмите кнопку «стоп», остановите развертку и запустите развертку в обратную сторону.

Завершайте эксперимент в следующем порядке:

- убедитесь, что ток нагревателя равен нулю,
- достаньте шток с образцом,
- постепенно поднимите вставку в верхнее положение и дождитесь отогрева измерительной ячейки,
- выключите программу, приборы и компьютер,
- достаньте вставку из криостата.

Литература

1. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики. Электричество. Т.3.- М.: Наука, 1977. - С. 332- 345.
2. *Роуз-Инс А., Родерик Е.* Введение в физику сверхпроводимости. - М.: Мир, 1972. - 272 С.