

СКВИД-МАГНИТОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 4,2–370 К

Д. А. Великанов

Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38. E-mail: dpona1@gmail.com

Описан магнитометр на основе СКВИДа постоянного тока, предназначенный для исследования широкого спектра веществ в слабых магнитных полях. Динамический диапазон прибора составляет $2 \cdot 10^{-8} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ Гс·см³.

Ключевые слова: сверхпроводимость, СКВИД, магнитометр, криостат, динамический диапазон.

SQUID MAGNETOMETER FOR INVESTIGATIONS OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF MATERIALS IN THE TEMPERATURE RANGE 4,2–370 K

D. A. Velikanov

Institute of Physics named after L. V. Kirenskiy of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
50/38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: dpona1@gmail.com

A magnetometer based on DC SQUID is described. It is designed to investigate a wide range of substances in weak magnetic fields. The dynamic range of the device is $2 \cdot 10^{-8} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ emu.

Keywords: superconductivity, SQUID, magnetometer, cryostat, dynamic range.

Среди различных методов магнитных измерений в последнее время наибольшее развитие получила СКВИД-магнитометрия, в основе которой лежат эффекты слабой сверхпроводимости в сверхпроводящих квантовых интерференционных устройствах (СКВИДах) [1]. Прежде всего, это связано с рекордно высокой чувствительностью метода, достигающей $5 \cdot 10^{-33}$ Дж/Гц (чувствительность по магнитному полю $\sim 10^{-14}$ Тл). Примечательно, что чувствительность данного метода не зависит от уровня сигнала, на фоне которого проводятся измерения, это позволяет надежно регистрировать малые изменения намагниченности на фоне большой статической величины.

Блок-схема СКВИД-магнитометра представлена на рис. 1. В качестве чувствительного элемента магнитометра применен интегральный СКВИД 1 постоянного тока (ПТ СКВИД), который является высокочувствительным детектором магнитного потока. Сигнал от исследуемого образца 2 к СКВИДУ передается посредством короткозамкнутого сверхпроводящего трансформатора магнитного потока, имеющего две приемные катушки 3, включенные встречно-последовательно, и входную катушку 4 СКВИДа. СКВИД через согласующий LC-контур, а также катушка 5 модуляции и обратной связи подключены к блоку 6 электроники, в котором производится усиление и обработка полезного сигнала, а также формируются сигналы для катушки 5. Градиентометрическое включение приемных катушек 3 способствует подавлению помех, вызванных вариациями магнитного поля и микрофонным эффектом. Минимальный и максимальный регистрируемый магнитный момент образца составляет, соответственно, $2 \cdot 10^{-8}$ и $5 \cdot 10^{-2}$ Гс·см³.

Криогенная часть магнитометра состоит из криостата, подключенного к откачным и газовым коммуникациям, и криогенной вставки. Магнитное поле создается сверхпроводящим соленоидом 7, работающим в короткозамкнутом режиме. И соленоид, и трансформатор потока оборудованы тепловыми ключами 8, 9. Источник тока 10, питающий соленоид, откалиброван так, чтобы на его цифровом индикаторе было отражено текущее значение поля в эрстедах. Диапазон магнитных полей прибора составляет $0 \dots \pm 1$ 500 Э, точность установки поля – 10^{-2} Э.

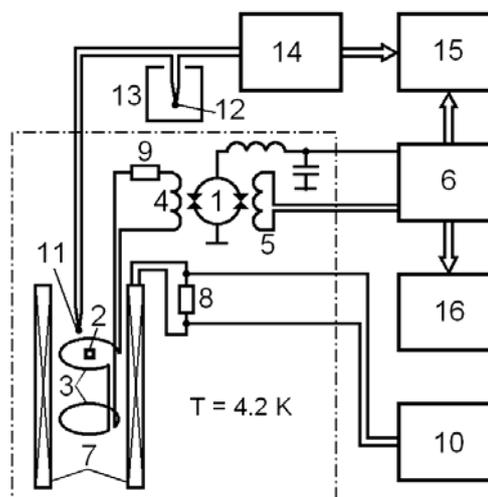


Рис. 1. Блок-схема СКВИД-магнитометра

Исследуемый образец 2 помещается в ампулу, которая теплоизолирована от гелиевой ванны с помощью

вакуумной рубашки. Температуру образца можно изменять, нагревая либо охлаждая ампулу, в пределах 4,2...370 К. Для контроля температуры служит дифференциальная термопара Au/0,07% Fe–Cu [2], ее первый спай 11 размещен вблизи образца, а второй спай 12 помещен в термостат 13. ТермоЭДС данной термопары носит сильно нелинейный характер, при повышении температуры от 4,2 до 370 К чувствительность термопары уменьшается в 7 раз, поэтому сигнал термопары необходимо линеаризовать.

Усиление и линеаризация термоЭДС производится в электронном блоке 14. Усиленный сигнал термопары преобразуется 12-тиразрядным АЦП, с него поступает на адресные входы ПЗУ, затем с выходов данных ПЗУ в виде опять же 12-тиразрядного кода подается на ЦАП, на выходе которого вновь формируется постоянное напряжение, но уже линейно-пропорциональное абсолютной температуре образца. Программа для ПЗУ была разработана специально под используемый тип термопары. Точность измерения температуры равна 0,1 К.

Выходы блоков 6, 14 подключаются к двухкоординатному графопостроителю 15 либо контроллеру. Для настройки и визуального контроля за работой прибора задействован многоканальный осциллограф 16.

Устройство криостата и схема откачных и газовых коммуникаций изображены на рис. 2. Криостат состоит из сосуда Дьюара 1 для жидкого азота, сосуда Дьюара 2 для жидкого гелия, капки 3, уплотнительного кольца 4, фланца 5, амортизационной прокладки 6. Сосуды Дьюара 1, 2 изготовлены из молибденового стекла и имеют цилиндрическую форму. Сосуд Дьюара 1 имеет внешний диаметр 125 мм, внутренний диаметр 105 мм, длину 600 мм. Сосуд Дьюара 2 имеет внешний диаметр 80 мм, внутренний диаметр 60 мм, длину 650 мм. Поверхности стенок, образующих вакуумное пространство сосудов Дьюара, посеребрены. Объем гелиевой ванны составляет 1,2 л.

У сосуда Дьюара 1 на нижнем торце его внешней стенки имеется технологический отросток 7, оставшийся после отпайки откачного патрубка. Пространство 8 между двойными стенками сосуда Дьюара 1 откачано до высокого вакуума при изготовлении сосуда.

В верхней части сосуда Дьюара 2 для жидкого гелия имеется стеклянный патрубок 9, который припаян к внешней стенке 10 выше верхнего края сосуда Дьюара 1 для жидкого азота. Через этот патрубок 9 перед каждой заливкой в криостат криоагентов – жидкого азота 11 и жидкого гелия 12 – производится откачка пространства 13 между двойными стенками сосуда Дьюара 2 до высокого вакуума. Тем самым обеспечивается высокая степень теплоизоляции между азотным экраном и объемом с жидким гелием [3].

Капка 3 и фланец 5 изготовлены из нержавеющей стали – коррозионностойкого материала с низкой теплопроводностью. В капке 3 выполнены выточки 14, 15, а во фланце 5 – выточка 16. Уплотнительное кольцо 4, изготовленное из вакуумной резины, расположено между капкой 3 и фланцем 5, частично заходя в выточки 14, 16, и охватывает внешнюю стенку 10 сосуда Дьюара 2 выше патрубка 9. Внутренний диа-

метр уплотнительного кольца 4 выполняется несколько меньшим, чем внешний диаметр сосуда Дьюара 2, для того чтобы обеспечить натяг соединения и, соответственно, его герметичность.

Вакуумноплотное соединение сосуда Дьюара 2 для жидкого гелия с капкой 3 обеспечивается путем стягивания между собой капки 3 и фланца 5 с помощью винтов 17. Перед сборкой криостата на уплотнительное кольцо 4 наносится вакуумная смазка. При затяжке соединения эластичное уплотнительное кольцо 4 частично выдавливается в кольцевые зазоры 18 между элементами конструкции. Тем самым предотвращается возникновение разрушающих внешнюю стенку 10 механических напряжений.

Амортизационная прокладка 6, изготовленная из пенополистирола, выполняет сразу две функции. Во-первых, смятая под воздействием торца 19, она предохраняет торец 19 от появления в нем разрушающих механических напряжений. Во-вторых, прокладка 6 препятствует току испаряющегося гелия 12 к уплотнительному кольцу 4, защищая тем самым последнее от охлаждения до низкой температуры, при которой происходит отвердевание материала кольца 4 и, как следствие, может происходить разгерметизация вакуумного соединения.

Капка 3 криостата оснащена штуцером 20 для подсоединения криогенной вставки 21, штуцером 22 для подсоединения переливного устройства 23 для жидкого гелия и патрубком 24 для возврата газообразного гелия.

Криостат посредством шлангов 25, 26, выполненных из вакуумной резины, вакуумных вентилях 27, 28, 29 и тройника 30 подсоединен к вакуумной магистрали 31 и возвратной магистрали 32. Вакуумный насос 33 через ventиль 34 подключен к вакуумной магистрали 31, а через ventиль 35 соединен с атмосферой. Возвратная магистраль 32 через обратный клапан 36 подключена к газгольдеру 37. К возвратной магистрали 32 через ventиль 38 с помощью шланга 39 подсоединяется транспортный сосуд Дьюара 40 для жидкого гелия, например, сосуд типа СТГ-40. Переливное устройство 23 для жидкого гелия имеет ventиль 41. Оно одним концом 42 вставляется в криостат в сосуд Дьюара 2 для жидкого гелия, а другим концом 43 – в транспортный сосуд Дьюара 40. Герметичность соединений достигается уплотнениями в штуцере 22 и в горловине транспортного сосуда Дьюара 40.

После монтажа криостата необходимо из сосуда Дьюара 2 для жидкого гелия удалить воздух и заполнить его газообразным гелием. Для этого ventиль 35 закрывают, включают вакуумный насос 33 и открывают ventили 34, 28. После откачки ventиль 28 закрывают, затем открывают ventиль 29, при этом сосуд Дьюара 2 заполняется газообразным гелием.

Для откачки вакуумного пространства 13 открывают ventиль 27. Откачка производится до вакуума $\sim 10^{-3}$ мм рт. ст., после чего из транспортного сосуда Дьюара для жидкого азота в сосуд Дьюара 1 заливают жидкий азот через воронку 44. После этого ventили 27, 34 закрывают, насос 33 выключают и открывают ventиль 35 для напуска в насос воздуха.

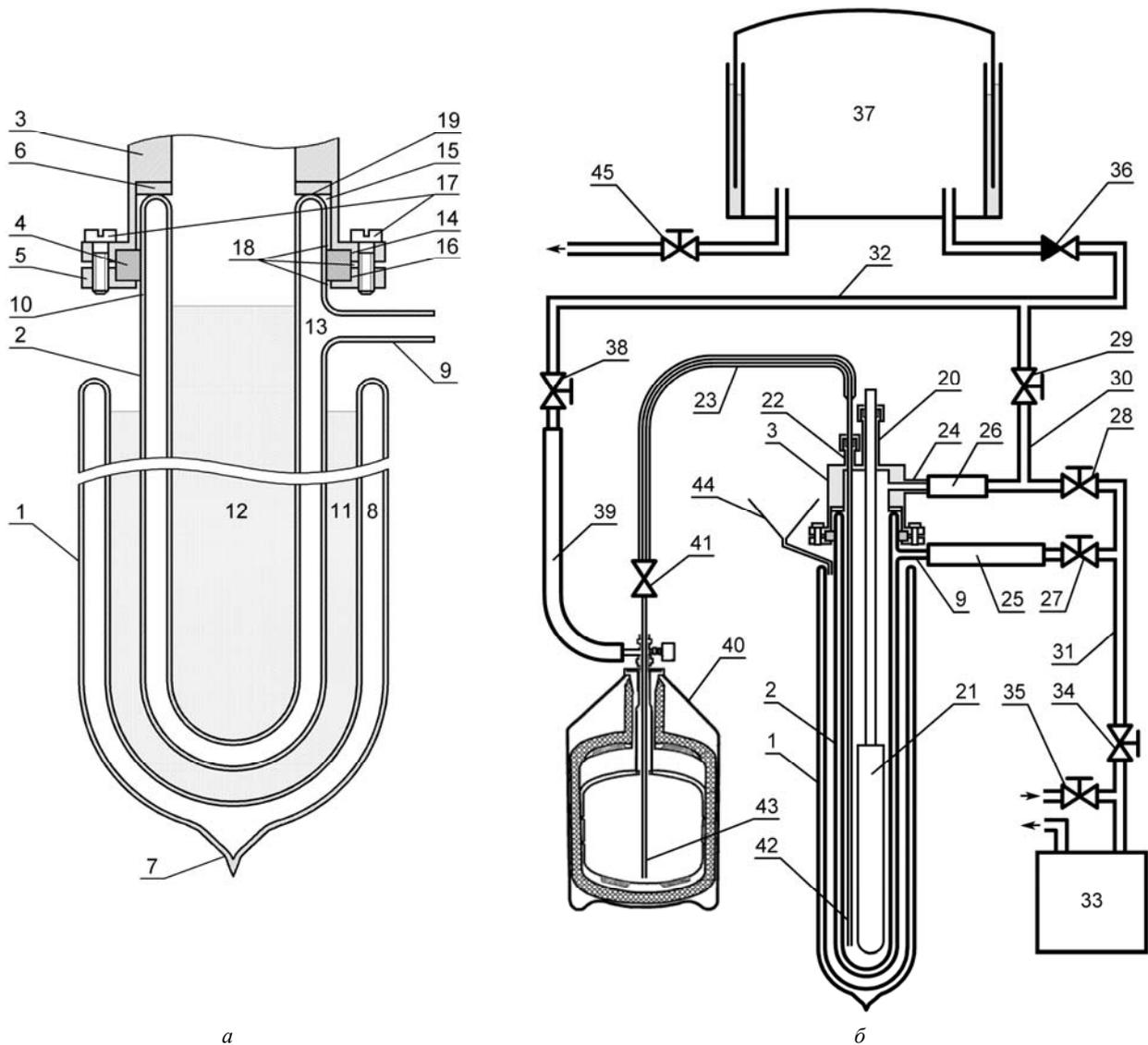


Рис. 2. Устройство криостата (а) и схема его подключения к откачным и газовым коммуникациям (б)

Далее закрывают вентиль 38, вентиль 41 открывают и заливают из транспортного сосуда Дьюара 40 жидкий гелий в сосуд Дьюара 2. После заливки вентиль 38 открывают, а вентиль 41 закрывают. Криостат готов к работе. Физические исследования проводят внутри криогенной вставки 21, внутри которой смонтированы сверхпроводящие элементы СКВИД-магнитометра.

По ходу времени испарившийся гелий из криостата, а также из транспортного сосуда Дьюара 40, по возвратной магистрали 32 поступает в газгольдер 37. Обратный клапан 36 предотвращает обратный ток гелия. По мере наполнения газгольдера 37 периодически открывают вентиль 45, и через него гелий с помощью компрессора закачивают в баллоны высокого давления.

Перейдем теперь к рассмотрению устройства блока электроники СКВИДа (поз. б на рис. 1).

Отметим, что для расширения динамического диапазона в практике СКВИДа используются в режиме нуль-детектора. Работа СКВИДа в качестве нуль-детектора основана на использовании периодической

зависимости напряжения на СКВИДе от приложенного к нему магнитного потока [1]. Упомянутая зависимость, а также вольт-амперная характеристика ПТ СКВИДа при различных значениях магнитного потока приведены на рис. 3. Для обслуживания ПТ СКВИДа была разработана электрическая схема, основные функциональные узлы которой представлены на рис. 4. Прототипом для нее послужила схема, приведенная в [4], которая была существенно модернизирована.

Постоянным током смещения задается рабочая точка СКВИДа. Для задействованного в приборе конкретного СКВИДа оптимальное значение тока смещения составило $I_0 = 32$ мкА. Магнитный поток через контур квантования СКВИДа модулируется сигналом прямоугольной формы частотой 500 кГц с амплитудой $\pm\Phi_0/4$ (Φ_0 – квант магнитного потока), который подается от генератора в катушку L_m модуляции и обратной связи, индуктивно связанную со СКВИДом. Переменное напряжение, возникающее на СКВИДе, через согласующий LC-контур подается на малошу-

мощный предварительный усилитель, усиливается, затем поступает на синхронный детектор. Когда квазистатический поток через контур СКВИДа составляет строго $\Phi = n\Phi_0$ или $\Phi = (n+1/2)\Phi_0$, где n – целое число, напряжение V на СКВИДе представляет собой сигнал прямоугольной формы частотой 1 МГц. При синхронном детектировании этого сигнала с опорной частотой 500 кГц напряжение на выходе детектора равно нулю. При других значениях квазистатического потока Φ на СКВИДе возникает сигнал частотой 500 кГц. В этом случае на выходе синхронного детектора появляется постоянное напряжение, причем в зависимости от сдвига фаз опорного и полезного сигналов, оно имеет максимальное положительное либо отрицательное значение, когда $\Phi = (n+1/4)\Phi_0$, и максимальное отрицательное либо положительное значение, когда $\Phi = (n+3/4)\Phi_0$. Напряжение с выхода синхронного детектора интегрируется и, будучи приложенным к резистору R_{oc} в цепи обратной связи, задает ток обратной связи, который подается в катушку L_m , поддерживая постоянным полный магнитный поток через контур интерферометра. Таким образом, изменению входного потока соответствует приращение напряжения на выходе интегратора. Тумблер П служит для размыкания цепи обратной связи во время настройки прибора.

Во входном каскаде предусилителя установлен малошумящий полевой транзистор типа КП307Г, имеющий высокое входное сопротивление $\sim 10^5$ Ом. Поэтому для его оптимального согласования по шумам с низкоомным (~ 1 Ом) СКВИДом используется охлаждаемый резонансный LC-контур, вследствие чего импеданс СКВИДа увеличивается в Q раз, где Q –

добротность контура. Полоса пропускания LC-контура накладывает ограничение на быстродействие магнитометра. Обычно применение схемы с резонансным контуром в цепи согласования СКВИДа с предусилителем позволяет отслеживать изменение магнитного потока с максимальной скоростью $\sim 10^4 \Phi_0 \text{ c}^{-1}$. Если необходимо расширить частотный диапазон, то в качестве согласующих элементов следует применять широкополосные трансформаторы [5].

К выходу интегратора подключено устройство установки нуля выходного сигнала магнитометра (устройство УНВСМ). Необходимость в таком устройстве была выявлена на ранней стадии эксплуатации СКВИД-магнитометра. Дело в том, что в ходе проведения магнитных измерений наблюдается постоянный дрейф сигнала, обусловленный влиянием магнитного момента от элементов криогенной вставки. Поэтому необходимо перед снятием каждой экспериментальной точки устанавливать «ноль» на выходе магнитометра. Оказалось, что сделать это качественно традиционными методами [4; 6; 7] не представляется возможным. Как правило, юстировку выходного нулевого напряжения осуществляли путем изменения постоянного тока, подаваемого от дополнительного источника в катушку L_m обратной связи. При этом в качестве регулирующего элемента использовался переменный резистор, перестраиваемый вручную. Данная процедура занимала существенное время и отвлекала оператора от процесса собственно магнитных измерений, что приводило к потерям полезной информации и криогенных ресурсов. Также имела место недостаточная точность установки «нуля».

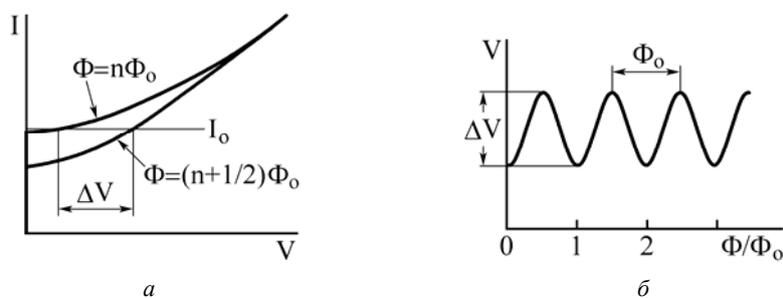


Рис. 3. ПТ СКВИД: вольт-амперная характеристика (а); зависимость напряжения от магнитного потока при постоянном токе смещения I_0 (б)

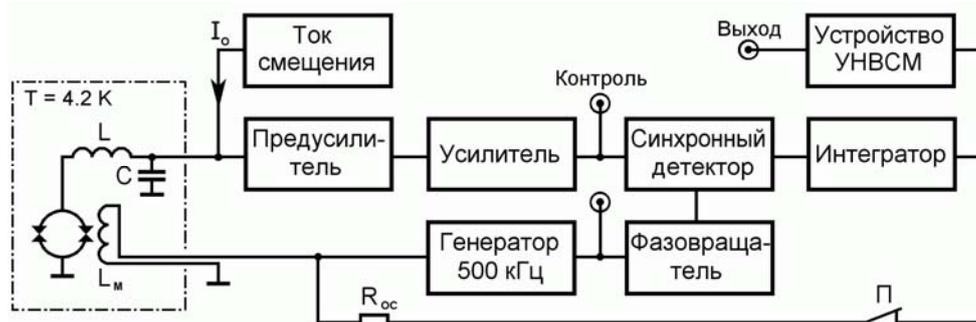


Рис. 4. Электроника ПТ СКВИДа

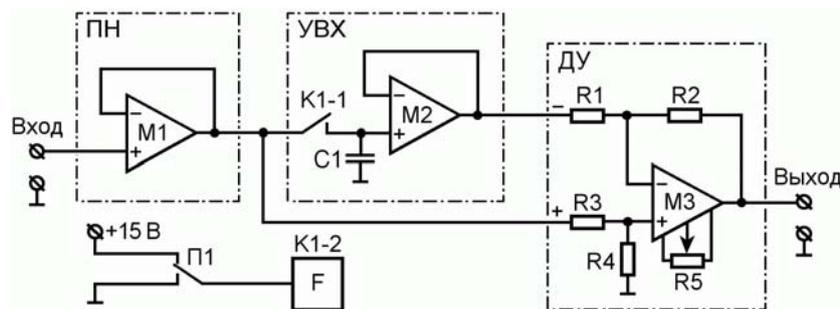


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема устройства УНВСМ:
 M1, M3 – КР140УД608; M2 – КР544УД1А; K1 – КР590КН7; C1 – К73-17-160В-1,5мкФ±20 %-В;
 R1–R4 – С2-10-0,25-2,05 кОм ± 0,5 %; R5 – СП5-3В-1,0-4,7 кОм ± 5 %; П1 – ПКН6-1

Принципиальная электрическая схема устройства УНВСМ показана на рис. 5. Оно содержит повторитель напряжения (ПН) на операционном усилителе (ОУ) M1, устройство выборки-хранения (УВХ) на ОУ M2, запоминающем конденсаторе C1 и электронном ключе K1-1 и дифференциальный усилитель ДУ на основе ОУ M3. ПН является буферным каскадом и служит для устранения воздействия УВХ на устойчивую работу магнитометра. Номиналами постоянных резисторов R1–R4 определяется коэффициент передачи ДУ. Подстроечный резистор R5 служит для балансировки ОУ M3.

Устройство УНВСМ имеет два режима: «установка нуля» и «измерение». Переключение режимов работы устройства осуществляется ключом K1-1. Замкнутое положение ключа K1-1 соответствует режиму «установка нуля», разомкнутое – режиму «измерение». Электронный ключ K1-1 снабжен схемой управления K1-2, подключенной к кнопочному переключателю П1. Оператор с помощью переключателя П1 имеет возможность выбирать нужный режим. Заметим, что в обоих режимах напряжение с выхода ПН постоянно поступает на неинвертирующий вход ДУ.

Установка нулевого напряжения магнитометра происходит в режиме «установка нуля». В этом режиме ключ K1-1 замыкается, и УВХ устанавливается в режим отслеживания входного сигнала. При этом на инвертирующий вход ДУ проходит напряжение с выхода ПН. Напряжения на обоих входах ДУ сравниваются между собой, в результате чего на выходе ДУ устанавливается нулевое напряжение.

В режиме «измерение» ключ K1-1 размыкается, и УВХ переходит в режим хранения мгновенного значения входного сигнала. Таким образом, напряжение на инвертирующем входе ДУ сохраняется постоянным в процессе измерения. В то же время при изменении входного сигнала происходит изменение напряжения на неинвертирующем входе ДУ. Вследствие чего на выходе ДУ появляется напряжение, значение которого равно разности между текущим значением входного напряжения и напряжением, которое было на входе устройства УНВСМ в момент переключения устройства из режима «установка нуля» в режим «измерение».

Наличие устройства УНВСМ позволяет исключить неоднозначность установки нуля, обусловленную мануальным характером действий оператора, что, в свою

очередь, позволяет снизить погрешность измерений на СКВИД-магнитометре, освободить оператора от оперативных действий по настройке «нуля» вручную.

Конструктивно электроника ПТ СКВИДа выполнена в виде двух блоков. Все функциональные узлы, за исключением предварительного усилителя, смонтированы внутри приборного корпуса, имеющего габариты 480×360×100 мм³. Предусилитель смонтирован в титановом корпусе с габаритами $\varnothing 32 \times 80$ мм³ и закреплен на капке криостата. Предусилитель соединен с основным блоком экранирующим кабелем длиной 2 м.

Калибровка выходного сигнала магнитометра проводилась следующим образом. По известной методике [7] была изготовлена образцовая катушка-эквивалент, имитирующая однородно намагниченный короткий образец цилиндрической формы, и была рассчитана ее константа, составившая 0,104 Гс·см³/А. Катушка-эквивалент помещалась на место образца в одну из приемных катушек трансформатора потока, затем через нее пропусклся ток, и регистрировался отклик магнитометра. В ходе калибровки было установлено, что в наиболее чувствительном поддиапазоне напряжение 1 В на выходе прибора соответствует магнитному моменту $4,6 \cdot 10^{-5}$ Гс·см³ (emu).

СКВИД-магнитометр предназначен преимущественно для снятия двух типов экспериментальных кривых: 1) зависимостей магнитного момента исследуемых образцов от температуры $M(T)$ при постоянном магнитном поле; 2) зависимостей магнитного момента от магнитного поля $M(H)$ при постоянной температуре. Кроме того, предусмотрено изучение релаксационных зависимостей (зависимостей магнитного момента от времени $M(t)$), при неизменных температуре и магнитном поле. Все магнитные измерения проводятся исключительно в режиме короткого замыкания сверхпроводящего соленоида; при этом магнитный поток в контуре соленоида квантуется, а величина магнитного поля принимает строго фиксированные значения.

При измерениях слабомагнитных веществ важно учитывать, что держатель, на который крепится образец, сам по себе тоже обладает магнитными свойствами. Поэтому необходимо, помимо всего, проводить измерение магнитного момента пустого держателя при условиях, идентичных условиям измерения исследуемого образца. При обработке результатов сигнал от держателя вычитается.

Итак, в ходе работ по созданию СКВИД-магнитометра был применен ряд новшеств, в том числе, описанных в [3; 8], которые существенно повысили производительность и улучшили ряд технико-эксплуатационных характеристик прибора по сравнению с известными устройствами аналогичного назначения. Схемотехническое построение блока электроники СКВИДа обеспечивает малое время (~1 мс) и высокую точность (~0,02 % от динамического диапазона на каждом из пределов измерений) установки нуля выходного сигнала магнитометра [8]. За счет конструктивного решения криостата удается сохранять его теплоизоляционные свойства неизменно высокими, отпадает надобность в периодических ремонтно-восстановительных работах с сосудом Дьюара для жидкого гелия, повышается эффективность использования сосуда Дьюара для жидкого азота [3]. Конструкция криогенной части исключает при захлаживании появление разрушающих механических напряжений в стеклянных сосудах Дьюара, позволяет минимизировать потери дорогостоящего криоагента, каковым является гелий. Так расход жидкого гелия на первичную заливку криостата составляет 4–5 л, а на каждую последующую доливку требуется около 2 л жидкого гелия.

Благодаря высокой чувствительности, магнитометр позволяет исследовать статические магнитные свойства у широкого спектра веществ: от сильномагнитных ферро- и ферримагнетиков до спиновых стекол, мультислойных пленок и наноструктур [9–11]. Метод СКВИД-магнитометрии имеет большие перспективы при исследовании магнитных характеристик веществ, содержащих незначительное количество магнитных примесей, а также микрограммовых образцов. Наконец, высокая чувствительность метода позволяет проводить измерения в очень слабых полях, менее 10 Э. В ряде случаев, в частности, при исследовании высокотемпературных сверхпроводников, это обстоятельство имеет принципиальное значение.

Библиографические ссылки

1. Кларк Дж. Принципы действия и применение СКВИДов // ТИИЭР. 1989. Т. 77, № 8. С. 118–137.
2. Температурные измерения : справочник / О. А. Герашенко, А. Н. Гордов, А. К. Еремина и др. Киев : Наук. думка, 1989.
3. Пат. РФ № 2304745. Криостат / Д. А. Великанов. Оpubл. 20.08.2007, Бюл. № 23.
4. Clarke J., Goubau W. M., Ketchen M. B. Tunnel junction dc SQUID: fabrication, operation, and performance // J. Low Temp. Phys. 1976. Vol. 25, № 1/2. P. 99–144.
5. Wellstood F., Heiden C., Clarke J. Integrated dc SQUID magnetometer with a high slew rate // Rev. Sci. Instrum. 1984. Vol. 55, № 6. P. 952–957.
6. Дробин В. М., Лоботка П., Трофимов В. Н. Блок регистрации сверхпроводящего квантового магнитометра // ПТЭ. 1987. № 3. С. 158–161.
7. Клименко А. Г. Универсальный СКВИД-магнитометр для магнитных исследований в слабых полях в диапазоне температур 1,5–300 К // Препринт № 85-1. ИНХ СО АН СССР. Новосибирск, 1985. 42 с.
8. Пат. РФ № 2246119. Магнитометр со сверхпроводящим квантовым интерферометрическим датчиком / Д. А. Великанов. Оpubл. 10.02.2005, Бюл. № 4.
9. Влияние магнитного поля на межслоевое взаимодействие в пленках (Co/Si/Gd/Si)_n / Г. С. Патрин, В. О. Васковский, Д. А. Великанов, А. В. Свалов // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 75, № 3. С. 188–190.
10. Magnetic Properties of PT and IR Nanoparticles / E. A. Petrakovskaya, V. G. Isakova, D. A. Velikanov et al. // Nanomaterials: New Research Developments. New York : Nova Science Publishers. 2009. P. 21–36.
11. Magnetic and magneto-optical properties of Ni-Ge layered films / I. S. Edelman, D. A. Velikanov, A. V. Chernichenko et al. // Physica E. 2010. Vol. 42. P. 2301–2306.

Referens

1. Klark Dzh. *ТИИЭР*. 1989, vol. 77, № 8, pp. 118–137.
2. Gerashchenko O. A., Gordov A. N., Yeromina A. K. et al. *Temperaturnyye izmereniya: Spravochnik* (Temperature measurement: A Handbook). Kiev, Nauk. Dumka, 1989, 704 p.
3. Velikanov D. A. *Kriostat* (Cryostat). Patent RF № 2304745, publ. 20.08.2007, bull. № 23.
4. Clarke J., Goubau W. M., Ketchen M. B. Tunnel junction dc SQUID: fabrication, operation, and performance. *J. Low Temp. Phys.* 1976, vol. 25, № ½, pp. 99–144.
5. Wellstood F., Heiden C., Clarke J. Integrated dc SQUID magnetometer with a high slew rate. *Rev. Sci. Instrum.* 1984, vol. 55, № 6, pp. 952–957.
6. Drobina V. M., Lobotka P., Trofimov V. N. *Blok registratsii sverkhprovodyashchego kvantovogo magnitometra* (The detection of a superconducting quantum magnetometer). *PTE*, 1987, № 3, pp. 158–161.
7. Klimentenko A. G. *Universalnyy SKVID-magnitometr dlya magnitnykh issledovaniy v slabyykh polyakh v diapazone temperatur 1,5–300 K* (Universal SQUID magnetometer for magnetic studies in weak fields in the temperature range 1.5–300 K). Preprint № 85-1, INKH SO AN SSSR, Novosibirsk, 1985, 42 p.
8. Velikanov D. A. *Magnitometr so sverkhprovodyashchim kvantovym interferometricheskim datchikom* (Magnetometer with a superconducting quantum interferometric sensor). Patent RF № 2246119, publ. 10.02.2005, bull. № 4.
9. Patrin G. S., Vaskovskiy V. O., Velikanov D. A., Svalov A. V. *Pis'ma v ZHETF*. 2002, vol. 75, № 3, pp. 188–190.
10. Petrakovskaya E. A., Isakova V. G., Velikanov D. A. et al. Magnetic Properties of PT and IR Nanoparticles. In the book «Nanomaterials: New Research Developments». New York: Nova Science Publishers. ISBN: 978-1-60456-300-9. 2009, pp. 21–36.
11. Edelman I. S., Velikanov D. A., Chernichenko A. V. et al. Magnetic and magneto-optical properties of Ni-Ge layered films. *Physica E*. 2010, vol. 42, pp. 2301–2306.