

УДК 621.317.444

© Д. А. Великанов, Г. Ю. Юркин, Г. С. Патрин

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ОБРАЗЦА В ВИБРАЦИОННОМ МАГНИТОМЕТРЕ

Предложена схема и описано устройство стабилизации параметров механических колебаний образца для высокотемпературного вибрационного магнитометра, в котором применен прямой метод измерений. Применение данного устройства позволяет существенно уменьшить погрешность измерений. Относительная нестабильность амплитуды колебаний составляет 10^{-4} , а частоты — 10^{-5} . Экспериментальная установка предназначена для проведения измерений магнитного момента образцов от $5 \cdot 10^{-4}$ до $50 \text{ Гс} \cdot \text{см}^3$ в интервале температур 300–1000 К и магнитных полей 0–(± 15) кЭ.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время синтезируются и активно исследуются материалы, обладающие магнитными фазовыми переходами либо проявляющие иные особенности магнитного поведения при высоких температурах ($T_c \sim 400\text{--}900 \text{ К}$). В качестве примера таких материалов можно привести тонкие магнитные пленки [1] или соединения, в которых реализуется переход полупроводник—металл [2]. В первом случае масса исследуемого вещества составляет единицы микрограммов, во втором — материал имеет низкую магнитную восприимчивость ($\chi \sim 10^{-5}\text{--}10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$). Как следствие, величина магнитного момента у исследуемых образцов сравнительно невелика ($m \sim 10^{-2}\text{--}10^{-3} \text{ Гс} \cdot \text{см}^3$ (emu)). Изучение магнитных свойств подобных соединений является весьма актуальным и требует выполнения высокочувствительных высокотемпературных магнитных измерений. Для таких исследований целесообразно использовать метод вибрирующего образца.

ВИБРАЦИОННЫЕ МАГНИТОМЕТРЫ: КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Магнитометр с вибрирующим образцом и неподвижными измерительными катушками был впервые описан Фонером (Foner S.) [3]. Им же рассмотрены теоретические основы метода. В магнитометре Фонера исследуемый образец колеблется перпендикулярно постоянному намагничивающему полю в центре измерительной системы, состоящей из двух идентичных катушек. Источником магнитного поля служит электромагнит. Направление колебаний вертикальное, а магнитный момент образца, индуцированный внешним

магнитным полем, ориентирован вдоль направления силовых линий магнитного поля, т. е. горизонтально. Генератором механических колебаний является электродинамический громкоговоритель (акустический динамик), движение образца передается от него посредством штока. Измерительные катушки жестко закреплены на полюсах электромагнита, плоскости их витков параллельны намагничивающему полю и перпендикулярны направлению колебаний. Осциллирующий магнитный момент диполя образца индуцирует переменное электромагнитное поле, которое наводит в катушках электродвижущие силы (э. д. с.) противоположных знаков. Благодаря встречному включению катушек наводимые в них сигналы от образца складываются, а сигналы от вариаций магнитного поля и внешние помехи компенсируются. Такая схема соединения измерительных катушек позволяет эффективно выделить полезный сигнал от образца и минимизировать паразитные сигналы от внешних полей.

Известны и другие модификации вибрационного магнитометра, в которых намагничивающее поле и направление колебаний образца взаимно ортогональны [4–10]. Поле в этом классе магнитометров может быть создано не только с помощью электромагнита [3–7], но также с помощью соленоида [8] или пары катушек Гельмгольца [9, 10], а для регистрации полезного сигнала можно использовать систему из четырех измерительных катушек, плоскости витков которых перпендикулярны намагничивающему полю и параллельны направлению колебаний [11].

Кроме этого, широко используется конструкция вибрационного магнитометра, в которой направления колебаний образца и намагничивающего поля совпадают [12–17]. В этом случае магнитное поле создается с помощью соленоида, а реги-

стрирующая полезный сигнал система представляет собой одну либо две пары аксиально-разнесенных измерительных катушек, которые жестко зафиксированы в канале соленоида. При этом плоскости витков катушек перпендикулярны намагничивающему полю. Наибольшее преимущество эта конструкция имеет при низкотемпературных измерениях, когда есть возможность разместить измерительные катушки непосредственно в жидком гелии, а обмотку соленоида выполнить из сверхпроводящего материала [13–15]. Использование сверхпроводящего соленоида позволяет достичь сильных магнитных полей ($B \sim 10$ Тл), в то же время близкое расположение измерительных катушек к образцу обеспечивает высокий уровень потокосцепления с ним и, следовательно, высокую чувствительность магнитометра ($\delta m \sim 10^{-5}$ Гс·см³).

Величину э. д. с. в измерительных катушках при достаточно малой амплитуде колебаний образца можно представить как

$$E = k \cdot m \cdot a \cdot f \cdot n,$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрии измерительной схемы; m , a , f — магнитный момент, амплитуда и частота колебаний образца соответственно; n — число витков в катушке. Нестабильность амплитуды a и (или) частоты f колебаний негативно влияет на результаты измерений. Причин возникновения нестабильности может быть несколько: изменение трения в механическом приводе в ходе эксперимента; смена образца; дрейф электрических параметров схемы, питающей генератор механических колебаний (вибратор).

В вибрационных магнитометрах применяются два метода измерений — прямой либо компенсационный; последний, в свою очередь, имеет две разновидности. При компенсационном методе удается избежать зависимости результатов измерений от значений амплитуды и частоты колебаний. Однако это достигается за счет усложнения схемы измерения.

В магнитометре Фонера [3] и ряде других конструкций [9, 10, 12] использован вариант компенсационного метода, получивший название дифференциального метода измерений. Сигнал от образца при помощи электронных схем сравнивается с сигналом от опорного магнитного момента, в качестве источника которого используют либо небольшой постоянный магнит, либо катушку с постоянным током. Источник опорного магнитного момента крепится на штоке, как правило, вне зоны действия магнитного поля на расстоянии от исследуемого образца и колеблется синхронно с ним. Для считывания сигнала от опорного магнитного момента устанавливают дополнительную пару из-

мерительных катушек. Так устраняется влияние нестабильности амплитуды и частоты колебаний на точность измерений.

Другим вариантом компенсационного метода является метод токовой оболочки, именуемый также нулевым методом измерений [18]. Основная идея состоит в том, чтобы скомпенсировать магнитный момент исследуемого образца магнитным моментом тока в компенсирующей катушке, охватывающей образец и колеблющейся вместе с ним. О величине магнитного момента образца в этом случае судят по силе тока в компенсирующей катушке. Сила тока пропорциональна величине магнитного момента образца, а суммарный колеблющийся магнитный момент близок к нулю. Метод токовой оболочки довольно широко используется в приборах [4, 7, 13, 15]. Отличительным достоинством метода является устранение погрешности, обусловленной наличием "зеркальных" изображений [19].

Высокотемпературные измерения проводить методом токовой оболочки не представляется возможным из-за того, что компенсирующая катушка, охватывающая образец, при нагреве выйдет из строя. Попутно заметим, что в этом методе также имеет место ограничение динамического диапазона магнитометра сверху, обусловленное тепловым действием тока в компенсирующей катушке. Применение же дифференциального метода требует существенного усложнения конструкции. К тому же при реализации дифференциальной схемы оказывается затруднительным точно и устойчиво скомпенсировать по величине и фазе сигналы от образца и опорного магнитного момента. Поэтому оптимальным представляется проводить высокотемпературные измерения прямым методом, приняв меры по стабилизации параметров механических колебаний образца.

При прямом методе [5, 6, 8, 10, 16, 17] измеряют э. д. с., которая наводится в измерительных катушках колеблющимся магнитным моментом исследуемого образца. Необходимым условием точности измерений этим методом является постоянство амплитуды a и частоты f колебаний образца. Основной причиной нестабильности амплитуды колебаний является изменение силы трения в подвижных частях магнитометра. В связи с этим предлагаются различные меры для поддержания постоянства амплитуды колебаний: мощность электродинамика выбирают с запасом [5]; механическую часть магнитометра изготавливают с особой тщательностью; амплитуду колебаний, например, пытаются стабилизировать с помощью медных гофрированных мембран, надетых на шток [6]. Стабильность параметров колебаний во времени определяется, кроме всего, стабильностью генератора переменного напряжения, питающего вибратор. Как правило, в конструкциях вибрационных магнитометров для питания вибра-

тора используют генераторы звуковых частот. Неустойчивость частоты, равно как и амплитуды подобных генераторов составляет $\sim 10^{-2}$. Общая же погрешность измерений может быть $\sim 10^{-1}$. Конечно, можно просто контролировать изменения амплитуды колебаний и учитывать их при обработке результатов измерений. В таком случае для контроля амплитуды колебаний используют сигнал с дополнительных катушек, наведенный витком с током или небольшим постоянным магнитом, колеблющимся синхронно с образцом [8, 10, 17]. Однако это не совсем удобно.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ВИБРАЦИОННЫЙ МАГНИТОМЕТР

Мы предлагаем оснастить вибрационный магнитометр, в котором используется прямой метод измерений, устройством стабилизации параметров механических колебаний образца. Такое устройство применено нами в конструкции высокотемпературного вибрационного магнитометра. При этом стабильность частоты колебаний обеспечивается применением высокостабильного задающего генератора с кварцевой стабилизацией частоты и последующим ее делением, а стабилизация амплитуды колебаний происходит за счет электромеханической отрицательной обратной связи.

Вначале рассмотрим назначение и принцип действия основных узлов высокотемпературного вибрационного магнитометра. Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

В основе построения прибора лежит традиционная конструкция [3]. Вибратор 1 — генератор механических колебаний электродинамического типа — приводит в движение исследуемый образец 2. Вибратор питается от генератора переменного тока 3, в котором предусмотрена возможность регулировки уровня выходного напряжения. Постоянный магнит 4, колеблющийся синхронно с образцом, индуцирует переменное электромагнитное поле, которое наводит э. д. с. в неподвижных катушках Гельмгольца 5. Сигнал обратной связи с катушек Гельмгольца поступает на электронный блок 6, где вырабатывается напряжение, которое подводится к генератору 3 и управляет величиной его выходного напряжения таким образом, чтобы поддерживать постоянным значение э. д. с. в катушках Гельмгольца, а значит, и амплитуду механических колебаний. Генератор 3, вибратор 1, блок 6, катушки Гельмгольца 5 и магнит 4, соединенные соответствующими связями, собственно и являются устройством стабилизации параметров механических колебаний.

Намагничивающее поле создается лабораторным электромагнитом ФЛ-1 [20]. Электромагнит запитан от источника питания постоянного тока 7,

которым, в свою очередь, управляет блок развертки и стабилизации поля 8. Имеется четыре различных скорости развертки поля. С помощью переключателя 9 можно инвертировать направление тока в обмотке электромагнита, тем самым осуществляется возможность измерений как в положительных, так и в отрицательных магнитных полях. Диапазон магнитных полей составляет $0 \div (\pm 15)$ кЭ. Измерение напряженности магнитного поля производится датчиком Холла 10, размещенным между полюсами электромагнита. Датчик Холла подключен к стандартному измерителю магнитной индукции 11.

Температуру образца можно регулировать в диапазоне $300 \div 1000$ К. Для этого используется проточный термостат, центральную часть которого, размещенную в зазоре между полюсными наконечниками электромагнита, упрощенно можно представить в виде конструкции из трех тонкостенных металлических трубок, расположенных концентрически. По внутренней трубке к образцу 2 подается газообразный азот, предварительно нагретый с помощью нагревателя 12, который подключен к источнику питания 13. Молекулярный азот, являясь химически малоактивным, предохраняет от окисления детали термостата и исследуемый образец. Азот поступает по шлангу из транспортного сосуда Дьюара 14. Избыточное давление в сосуде Дьюара создается с помощью погруженного в жидкий азот нагревателя 15, который подключен к источнику питания 16.

Воздух из пространства между внутренней и средней трубками в целях создания тепловой развязки откачивается форвакуумным насосом 17. Для контроля уровня вакуума применена вакуумная лампа 18, подсоединенная к вакуумметру 19. Пространство между средней и внешней трубками заполняется проточной холодной водой. Таким способом удастся защитить измерительные катушки от перегрева и выхода из строя.

Для измерения температуры служит дифференциальная термопара 20 типа К (хромель—алюмель) [21]. Один спай термопары размещен непосредственно вблизи образца, а другой находится в термостате 21, в котором поддерживается постоянная температура 315 К. Термо-э. д. с. термопары измеряется вольтметром постоянного тока 22.

Полезный сигнал от образца 2 регистрируется двумя измерительными катушками 23, которые соединены последовательно навстречу друг другу. Э. д. с., наведенная в измерительных катушках, усиливается в блоке усилителей напряжения 24, затем сигнал обрабатывается синхронным детектором 25 и фильтруется с помощью фильтра нижних частот 26. Опорный сигнал для синхронного детектора вырабатывается блоком 6. Для удобства настройки магнитометра и для визуального контроля за его работой используется двухлучевой

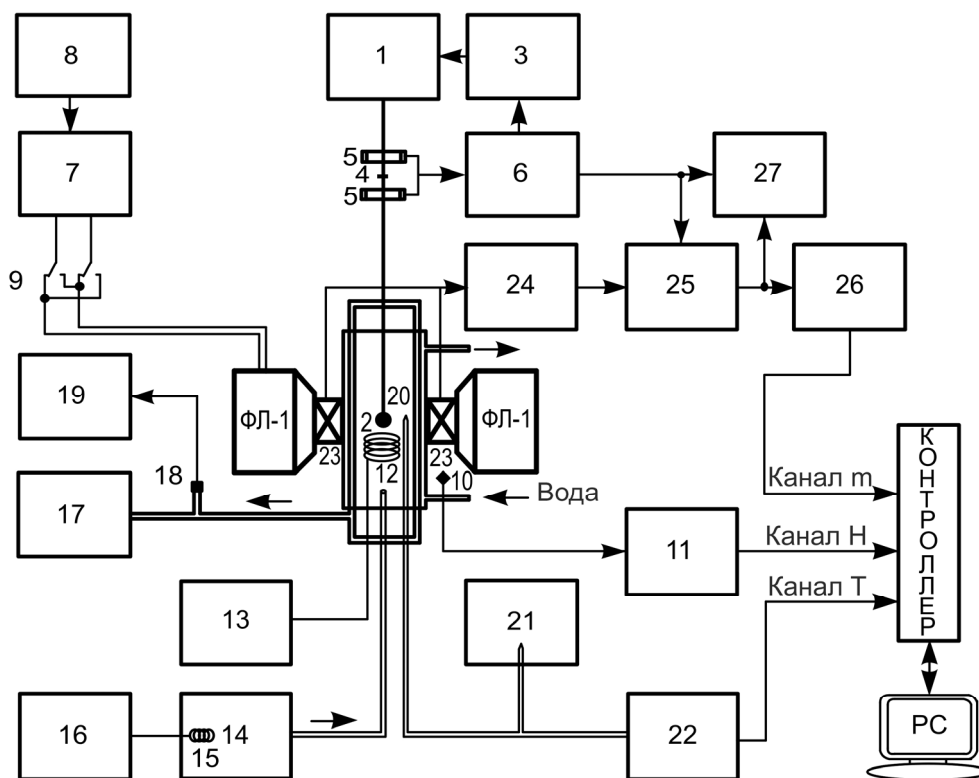


Рис. 1. Блок-схема автоматизированного высокотемпературного вибрационного магнитометра.

1 — вибратор; 2 — исследуемый образец; 3 — генератор переменного тока; 4 — подвижный постоянный магнит; 5 — неподвижные катушки Гельмгольца; 6 — электронный блок; 7 — источник постоянного тока питания лабораторного электромагнита ФЛ-1; 8 — блок управления разверткой и стабилизацией магнитного поля; 9 — переключатель направления тока в обмотке электромагнита; 10 — датчик Холла; 11 — измеритель магнитной индукции; 12, 15 — нагреватели; 13, 16 — источники постоянного тока; 14 — транспортный сосуд Дьюара; 17 — вакуумный насос; 18 — вакуумная лампа; 19 — вакуумметр; 20 — дифференциальная термомпара; 21 — термостат; 22 — вольтметр; 23 — измерительные катушки; 24 — усилитель напряжения; 25 — синхронный детектор; 26 — ФНЧ; 27 — двухлучевой осциллограф

осциллограф 27. На первый канал осциллографа подается опорный сигнал с блока 6, второй канал осциллографа подключен к выходу синхронного детектора.

Данные с измерителя магнитной индукции 11 (канал Н), с вольтметра постоянного тока 22 (канал Т) и с выхода регистрирующей схемы магнитометра (канал м) поступают на контроллер, а с него в свою очередь передаются на компьютер РС. Автоматизация измерений производится с помощью программы, написанной на языке программирования Delphi. Значения измеряемых параметров в ходе эксперимента записываются на жесткий диск компьютера и могут графически отображаться на экране монитора.

Вибратор

На рис. 2 показано устройство вибратора и схема размещения измерительных катушек. Вибратор изготовлен на основе магнитной системы от мощного электродинамика, у которого предварительно были удалены диффузодержатель, центрирующая шайба и диффузор с подвесом и пылезащитным колпачком. Конструкция вибратора включает в себя постоянный магнит 28 с магнитопроводом, в его центре в керне 29 просверлено отверстие диаметром 14 мм, через которое пропущен якорь 30. К якорю прикреплена звуковая катушка 31 от того же электродинамика; катушка размещена в кольцевом воздушном зазоре магнитопровода.

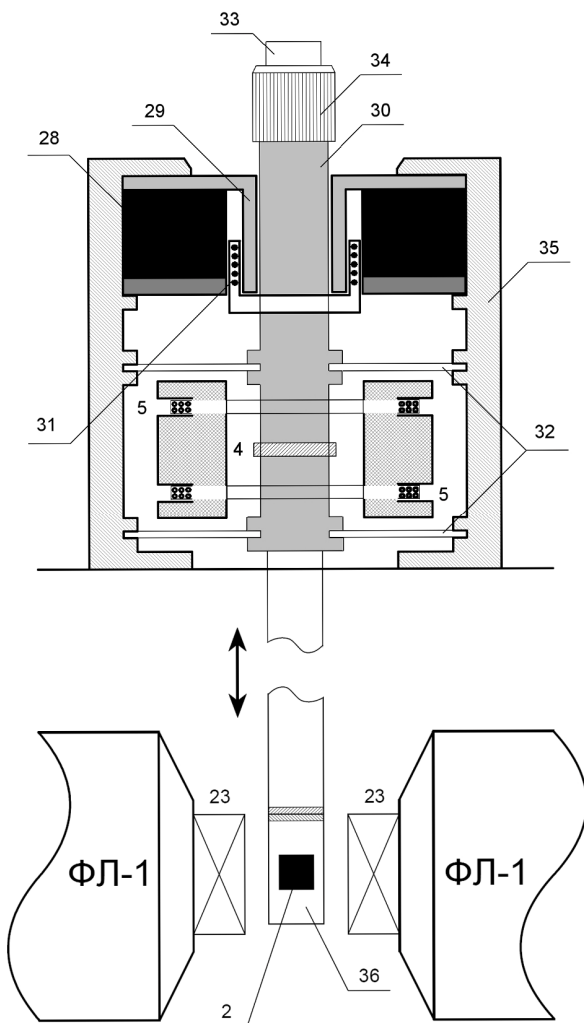


Рис. 2. Устройство вибратора (нумерация элементов единая с рис. 1).

28 — постоянный магнит; 29 — магнитопровод; 30 — ярлык; 31 — звуковая катушка; 32 — фигурные стеклотекстолитовые диски; 33 — шток; 34 — накидная гайка; 35 — металлический корпус; 36 — медная ампула с исследуемым образцом 2

Якорь вместе с катушкой центрирован с помощью двух фигурных стеклотекстолитовых дисков 32, которые выполняют роль тарельчатых пружин. Также на якоре закреплен небольшой постоянный магнит 4, который находится посередине пары катушек Гельмгольца 5. Магнит 4 имеет форму кольца, его внешний и внутренний диаметры равны 19 и 9 мм соответственно, а толщина — 2,5 мм. Катушки Гельмгольца намотаны на диэлектрическом каркасе диаметром 28 мм, имеют квадратное сечение $2,5 \times 2,5$ мм, расстояние между катушками составляет 12 мм. Каждая катушка

содержит 300 витков медного провода ПЭТВ-1 диаметром 0,1 мм. Через ярлык пропускается шток 33 и фиксируется накидной гайкой 34 с уплотнением. Все элементы вибратора заключены в металлический корпус 35.

Переменный ток, проходя через катушку 31, взаимодействует с постоянным магнитным полем и создает электродинамическую силу, приводящую в колебания катушку и скрепленный с ней ярлык 30 вместе с магнитом 4 и штоком 33. Шток изготовлен из кварцевой трубки диаметром 6 мм длиной 700 мм. К нижнему концу штока крепится медная ампула 36, в которую помещается исследуемый образец 2. Важно надежно зафиксировать образец внутри ампулы во избежание его свободного перемещения при колебаниях штока. При выполнении высокотемпературных измерений для этой цели хорошо подходит каолиновая вата.

Измерительные катушки

Измерительные катушки 23 размещаются в центральной части полусных наконечников электромагнита ФЛ-1 [20]. Неподвижная фиксация измерительных катушек относительно полусных наконечников позволяет свести к минимуму наводки из-за вибрации со стороны магнитного поля электромагнита. Диаметр полусных наконечников составляет 60 мм, зазор между полюсами — 42 мм. Измерительные катушки изготовлены с учетом рекомендаций, изложенных в [22]. Катушки намотаны на диэлектрические каркасы, имеющие в сечении форму прямоугольника 10×16 мм и высоту 28 мм. Расстояние между катушками — 16 мм. Каждая катушка содержит 2800 витков медного провода ПЭТВ-2 диаметром 0,063 мм. С помощью такой конфигурации измерительных катушек удастся решить одновременно несколько задач. Во-первых, обеспечить достаточно хорошее потокоцепление их обмоток с образцом 2. Во-вторых, добиться независимости коэффициента пропорциональности наводимой в измерительных катушках э. д. с. от размера образца (диаметром до 5 мм). В-третьих, снизить влияние неточности расположения образца на результаты измерений. Данная геометрия позволяет реализовать чувствительность вибрационного магнитометра $\delta m = 5 \cdot 10^{-4}$ Гс·см³. Динамический диапазон магнитометра достигает значения 50 Гс·см³.

Поскольку материал штока — кварцевое стекло имеет очень низкий коэффициент линейного теплового расширения ($\alpha = 0,6 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹ [23]), в процессе измерения смещение равновесного положения образца по вертикали относительно измерительных катушек в диапазоне температур 300÷1000 К составляет всего 0,15 мм. Соответствующая этому смещению оценка погрешности измерения магнитного момента, проведенная по извест-

Схема стабилизации амплитуды колебаний охвачена электромеханической отрицательной обратной связью. Стабилизация происходит следующим образом. Вибратор питается переменным током от усилителя мощности. Сигнал обратной связи (ОС) — э. д. с., наведенная в катушках Гельмгольца 5 при колебаниях магнита 4, закрепленного на якоре 30 вибратора (рис. 2), поступает на усилитель 42, затем выпрямляется амплитудным детектором 43 и сглаживается фильтром низких частот 44. Отфильтрованное выпрямленное напряжение подается на один из входов интегратора 45. На другой его вход подается постоянное напряжение $U_{оп}$ с выхода источника постоянного напряжения 46, уровень которого определяет значение амплитуды механических колебаний. Выход интегратора 45 подключен к входу опорного напряжения ЦАП 40. Если амплитуда колебаний магнита 4 становится отличной от заданной напряжением $U_{оп}$, то как результат меняется величина напряжения обратной связи. Это приводит к разбалансу входных напряжений интегратора, вследствие чего напряжение на его выходе начинает изменяться. Будучи подведенным к ЦАП 40, оно управляет амплитудой синусоидального напряжения на выходе ЦАП. Тенденция изменения зависит от соотношения между напряжениями на входах интегратора. Если, например, величина напряжения, поступающего с фильтра 44, меньше, чем величина $U_{оп}$, то напряжение на выходе интегратор-сумматора изменяется в сторону увеличения, и наоборот. Напряжение, подводимое к вибратору 1, тоже начинает изменяться, вызывая в свою очередь изменение амплитуды механических колебаний. Этот процесс происходит до тех пор, пока не будет устранен разбаланс напряжений на входах интегратора 45, что соответствует равенству амплитуды механических колебаний заданному значению. Таким образом, амплитуда колебаний якоря вместе с магнитом и штоком поддерживается постоянной.

Формирователь импульсов 47 служит для формирования опорного сигнала синхронного детектора 25 (рис. 1). Вход формирователя 47 импульсов подключен к выходу усилителя 42, а выход — ко входу опорного сигнала синхронного детектора 25.

Узлы устройства стабилизации частоты и амплитуды колебаний штока выполнены в основном на базе аналоговых и цифровых интегральных схем.

Для питания электрической схемы устройства стабилизации частоты и амплитуды колебаний используются три стабилизированных напряжения: ± 15 В и +5 В.

Параметры элементов электрической схемы подобраны таким образом, чтобы амплитуда механических колебаний штока составляла 0.5 мм

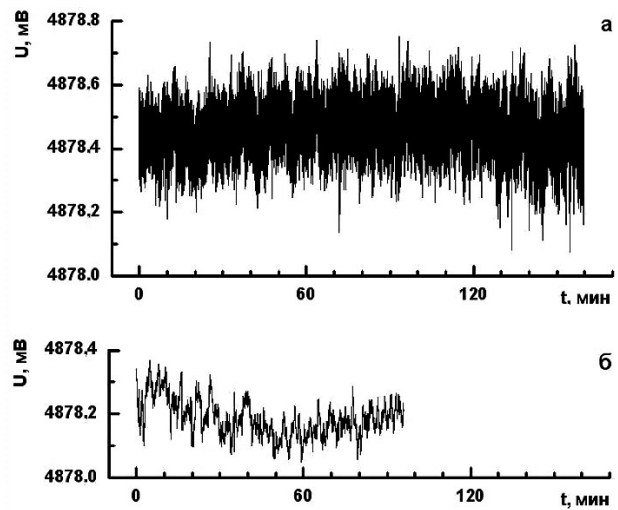


Рис. 4. Напряжение на выходе ФНЧ (44) при работе вибратора: а — со штоком, б — без штока

и общий ход штока был равен соответственно 1 мм. При этом за счет применения отрицательной обратной связи нестабильность амплитуды колебаний не превышает 10^{-4} .

На рис. 4 представлены временные зависимости напряжения на выходе фильтра нижних частот 44, снятые при работе вибратора как при наличии штока 33 (а), так и без штока (б); масса штока — 25 г. Более высокий уровень шумов в первом случае обусловлен нестабильностью силы трения штока о внутреннюю поверхность канала термостата при вибрации штока. Данные получены с помощью модуля АЦП Е-24 производства ЗАО "Л-КАРД" (<http://www.lcard.ru>). Частота выборки сигнала составляла 5 Гц.

ПРИМЕР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная установка предназначена преимущественно для снятия двух типов зависимостей: 1) зависимости магнитного момента исследуемого образца от температуры $m(T)$ при постоянном магнитном поле; 2) зависимости магнитного момента образца от магнитного поля $m(H)$ при постоянной температуре. Кроме того, возможно изучение релаксационной зависимости, т. е. зависимости магнитного момента образца от времени $m(t)$ при неизменных температуре и магнитном поле. При измерениях слабомагнитных веществ важно учитывать, что ампула, в которую помещается образец, сама по себе тоже обладает магнитными свойствами. Поэтому необходимо также проводить измерение магнитного момента пустой

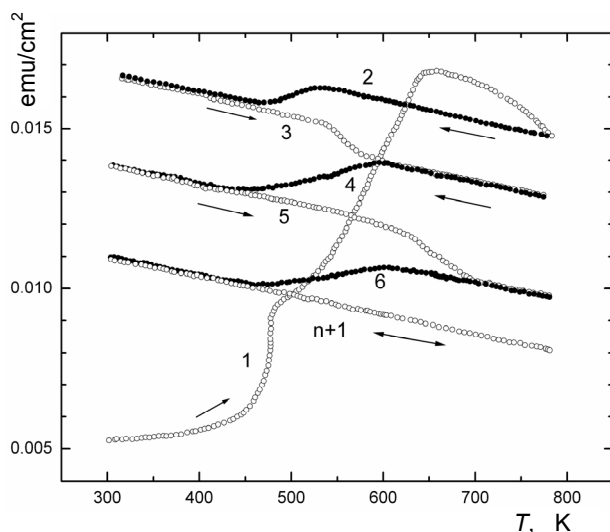


Рис. 5. Высокотемпературный участок зависимостей намагниченности тонких магнитных пленок системы Dy—Co. $H = 3.0$ кЭ

ампулы при условиях, идентичных условиям измерения исследуемого образца. При обработке результатов сигнал от пустой ампулы вычитается.

Проиллюстрируем возможности вибрационного магнитометра с устройством стабилизации параметров механических колебаний образца на примере магнитных измерений, выполненных на тонких магнитных пленках системы Dy—Co, имеющих толщину 740 Å, при этом толщина слоев Co и Dy составляет 400 и 340 Å соответственно. Площадь пленки составляла 0.5 см². На рис. 5 представлена эволюция намагниченности пленки Dy—Co при многократном термоциклировании в интервале температур 300–800 К. Видно, что при получающемся отношении сигнал/шум намагниченность порядка 10⁻² emu/cm² не является пределом чувствительности, а имеется запас как минимум на порядок. Это позволяет проводить исследования пленок толщиной порядка 50–100 Å. Обсуждение физических свойств исследованных пленок будет представлено в специализированном журнале.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработано, создано и апробировано устройство стабилизации параметров механических колебаний образца для высокотемпературного вибрационного магнитометра. Относительная нестабильность амплитуды колебаний составляет 10⁻⁴, а частоты — 10⁻⁵. Применение устройства позво-

ляет уменьшить относительную погрешность измерений, связанную с нестабильностью параметров механических колебаний, до уровня 10⁻⁴.

Описанная в настоящей статье схема стабилизации параметров механических колебаний образца хорошо подходит не только для высокотемпературных исследований. Она может быть использована для вибрационных магнитометров любого типа и предназначения.

Настоящая работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-02-16 671-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pouloupoulos P., Baberschke K. Magnetism in Thin Films // *J. Phys.: Condens. Matter*. 1999. V 11, N 48. P. 9495–9515.
2. Патрин Г.С., Белецкий В.В., Великанов Д.А. и др. Нестехиометрия и низкотемпературные магнитные свойства кристаллов FeSi // *ФТТ*. 2006. Т. 48, № 4. С. 658–662.
3. Foner S. Versatile and Sensitive Vibrating-Sample Magnetometer // *Rev. Sci. Instr.* 1959. V 30, N 7. P. 548–557.
4. Боярский Л.А., Стариков М.А. Вибрационный магнитометр с компенсирующей катушкой // *Работы по физике твердого тела (Сборник)*. Новосибирск: Наука, 1967. С. 191–202.
5. Лаврухин А.М. Установка с вибрационным магнитометром для определения статических характеристик ферроматериалов // *Измерительная техника*. 1967, № 10. С. 53–57.
6. Голант К.М., Веселаго В.Г. Простой вибрационный магнитометр для исследования ферромагнетиков // *ПТЭ*. 1975. № 4. С. 189–191.
7. Сигал Г.П., Соколов Б.Ю. Регистрирующая схема для автокомпенсационного виброматометра // *ПТЭ*. 1995. № 1. С. 132–135.
8. Бажан А.Н., Боровик-Романов А.С., Крейнес Н.М. Магнитометр для определения величины и направления намагниченности в анизотропных кристаллах // *ПТЭ*. 1973. № 1. С. 213–216.
9. Flanders P.J., Doyle W.D. Motor Driven Magnetometer for Thin Magnetic Films // *Rev. Sci. Instr.* 1962. V 33, N 6. P. 691–693.
10. Тагиров Р.И. Вибрационный магнитометр для измерения магнитных свойств ТМП // *Аппаратура и методы исследования тонких магнитных пленок (Сборник)*. Красноярск, 1968. С. 96–101.
11. Noakes J.E., Arrott A., Haakana C. Vibrating Sample Magnetometers // *Rev. Sci. Instr.* 1968. V 39, N 10. P. 1436–1438.

12. Кусков Г.С., Ларионов Л.В., Обер Э.О. К вопросу об оптимальной конструкции вибрационного магнитометра для измерения намагниченности насыщения ферромагнитных материалов // *Электронная техника. Серия 7. Ферритовая техника*. 1969, № 4. С. 28–35.
13. Соколов В.И. Автокомпенсационный магнитометр со сверхпроводящим соленоидом // *ПТЭ*. 1971. № 5. С. 206–208.
14. Панина Л.К. Вибрационный магнитометр с компенсационной схемой катушек и удвоением частоты // *ПТЭ*. 1981. № 1. С. 218–219.
15. Балаев А.Д., Бояришинов Ю.В., Карпенко М.М., Хрусталева Б.П. Автоматизированный магнитометр со сверхпроводящим соленоидом. М.: ПИК ВИНТИ, 1985. № 69-85 деп. 32 с.
16. Шурухин Б.П., Кузнецов В.Н., Махоткин В.Е., Булушев А.Г. Высокотемпературный магнитометр с вибрирующей платформой // *ПТЭ*. 1985. № 1. С. 209–210.
17. Максимочкин В.И., Трухин В.И., Гарифуллин Н.М., Хасанов Н.А. Автоматизированный высокочувствительный вибрационный магнитометр // *ПТЭ*. 2003. № 5. С. 132–137.
18. Arrott A., Goldman J.E. Principle for Null Determination of Magnetization and Its Application to Cryogenic Measurements // *Rev. Sci. Instr.* 1957. V 28, N 2. P. 99–102.
19. Zieba A., Foner S. Superconducting Magnet Image Effect Observed with a Vibrating Sample Magnetometer // *Rev. Sci. Instr.* 1983. V 54. N 2. P. 137–145.
20. Мирясов Н.З., Рубцов В.К. Лабораторный электромагнит // *ПТЭ*. 1959. № 5. С. 142–143.
21. Геращенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К. и др. Температурные измерения: Справочник. К.: Наук. думка, 1989. 704 с.
22. Поливанов К.М., Калугин Е.И., Криваксин А.И. Оптимальная конфигурация приемных катушек вибрационного магнитометра // *ПТЭ*. 1971. № 5. С. 203–205.
23. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. М.: Мир, 1982. 520 с.
24. Альтшуллер Г.Б., Елфимов Н.Н., Шакулин В.Г. Кварцевые генераторы: Справочное пособие. М.: Радио и связь, 1984. 232 с.

*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН,
г. Красноярск
(Великанов Д.А., Юркин Г.Ю., Патрин Г.С.)*

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск
(Великанов Д.А., Патрин Г.С.)*

Материал поступил в редакцию 18.06.2008.

STABILIZATION OF SAMPLE MECHANICAL OSCILLATION PARAMETERS IN THE VIBRATING MAGNETOMETER

D. A. Velikanov^{1,2}, G. Yu. Yurkin¹, G. S. Patrin^{1,2}

¹*L.V. Kirensky Institute of physics of the Siberian Branch RAS, Krasnoyarsk*

²*Siberian federal university, Krasnoyarsk*

Scheme and structure of sample mechanical oscillation parameters stabilization for high temperature vibrating magnetometer in which direct measuring method is used is described. This device allows to reduce significantly error of measuring. The relative instability of vibration amplitude makes 10^{-4} , and frequencies — 10^{-5} . The experimental apparatus is intended for measuring of magnet moment of samples from $5 \cdot 10^{-4}$ to $50 \text{ Gs} \cdot \text{cm}^3$ in the range of temperatures 300–1000 K and magnetic fields 0–(± 15) kOe.