

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12
Исследование магнитных свойств
аморфного ферромагнетика
при помощи высокотемпературного магнитометра
к.ф.-м.н., доц. Глушков Владимир Витальевич
(ИОФ РАН)

УДК 538.22

Составитель: В.В. Глушков

Исследование магнитных свойств аморфного ферромагнетика при помощи высокотемпературного магнитометра: Лабораторная работа / Сост.: В.В. Глушков. – М: МФТИ, 2008. – 25 с.

Перспективы инновационных применений ферромагнетиков связаны с разработкой элементной базы спинтроники (например, спиновые транзисторы и наноструктуры с магнитными ячейками памяти), с исследованием наномира (магнитный силовой микроскоп) и т.д.

В лабораторной работе изучаются магнитные свойства аморфных ферромагнетиков путем исследования полевых и температурных зависимостей намагниченности образцов аморфных магнитных сплавов с оценкой влияния беспорядка на основные параметры ферромагнетика (температура Кюри, обменное поле и т.д.), а также с изучением гистерезисных явлений.

Введение. Исследования магнитных явлений в веществах, проявляющих ферромагнитные свойства, представляют собой важное научное направление, помогающее раскрыть основы строения материи. Претендующий на широкое применение магнетизм вносит огромный вклад в научно-технический прогресс. Современную электротехнику, электронику и вычислительную технику нельзя представить без ферромагнитных материалов, характеристики которых интенсивно используются, постоянно уточняются и улучшаются.

Ферромагнетизм. При изучении магнитных свойств следует понимать, что магнетизм имеет существенно квантовую природу. Классическая система в состоянии теплового равновесия не может обладать магнитным моментом даже при наличии внешнего магнитного поля. Существование магнитного момента свободного атома связано с тремя главными обстоятельствами: наличием спина электрона; наличием орбитального момента, связанного с движением электронов вокруг ядра; изменением орбитального момента при наложении внешнего магнитного поля.

Определим **намагниченность** вещества M как магнитный момент единицы объёма, при этом **магнитная восприимчивость** χ определяется соотношением $M = \chi B$ (B — магнитная индукция). Вещества с отрицательной магнитной восприимчивостью называются **диамагнитными**, с положительной — **парамагнитными**. Диа- и парамагнетики характеризуются малыми значениями восприимчивости ($\sim 10^{-5}$) и не проявляют магнитных свойств в отсутствие магнитного поля. В то же время в некоторых материалах суммарный эффект магнитных моментов проявляется во много раз сильнее, чем в случае парамагнетизма или диамагнетизма. Причина появления сильных магнитных свойств в таких веществах связана с параллельной ориентацией магнитных моментов атомов, приводящей к большой намагниченности даже в отсутствие внешнего магнитного поля. Намагниченность, образующуюся таким самопроизвольным образом, называют **спонтанной**,

а вещества со спонтанной намагниченностью – **ферромагнетиками**.

Впервые механизм образования спонтанной намагниченности в ферромагнетиках был объяснен Вейссом, предположившим, что внутри ферромагнетика действует молекулярное магнитное поле (**обменное поле**), благодаря которому все спины ориентируются параллельно. Ориентирующему действию обменного поля противостоит дезориентирующее влияние теплового возбуждения. При повышении температуры тепловое движение разрушает порядок магнитных моментов. Температура, выше которой спонтанная намагниченность исчезает, называется **точкой Кюри** T_C .

Вейсс определил обменное поле как некоторое эквивалентное ему по упорядочивающему эффекту магнитное поле B_E . В приближении усредненного поля каждый магнитный момент испытывает действие этого поля, пропорционального намагниченности

$$B_E = \lambda M, \quad (1)$$

где λ – постоянная величина, не зависящая от температуры. Легко можно установить связь между T_C и постоянной усредненного поля λ . В парамагнитной фазе внешнее поле B будет создавать конечную намагниченность, а последняя, в свою очередь, – создавать конечное обменное поле B_E . В этом случае намагниченность выражается через суммарное поле:

$$M = \chi_p(B + B_E). \quad (2)$$

Поскольку парамагнитная восприимчивость описывается законом Кюри $\chi_p = C/T$, используя (1) и (2), легко получить **закон Кюри–Вейсса** для восприимчивости:

$$\chi = \frac{M}{B} = \frac{C}{T - T_C}, \quad (3)$$

где $T_C = C\lambda$. Этот закон хорошо описывает наблюдаемую температурную зависимость восприимчивости в парамагнитной области.

Оценка постоянной усредненного поля для железа ([2], с. 546) дает значения $\lambda \approx 10^4$, что с учетом величины спонтанной намагниченности $M_S \approx 10^3$ ед. СГСМ дает $B_E = \lambda M_S \approx 10^7$ Гс. Таким образом, обменное поле в ферромагнетике колоссально велико и значительно превышает магнитные поля, создаваемые всеми магнитными ионами кристалла (для соседних узлов поле магнитного иона по порядку величины равно $\mu_B/a^3 \approx 10^3$ Гс, где a – постоянная решетки, $\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-21}$ эрг/Гс – магнетон Бора).

Обменное взаимодействие. Обменное поле дает приблизительное представление о величине сил квантово-механического обменного взаимодействия. Распределение заряда в системе из двух электронов зависит от взаимного расположения их спинов, поскольку принцип Паули исключает конфигурацию, когда в одной точке пространства в данный момент времени находятся два электрона с одинаковым направлением спина, и не исключает конфигурацию с их антипараллельным расположением. В таком случае электростатическая энергия будет зависеть от относительной ориентации спинов. Разность энергий, отвечающих конфигурациям электронов с параллельным и антипараллельным направлением спинов, и определяет **обменную энергию**.

Для нахождения температурной зависимости намагниченности ниже точки Кюри можно также воспользоваться приближением усредненного поля. С целью упрощения рассмотрим систему свободных магнитных моментов $\mu = \mu_B$, в которой энергетические уровни в магнитном поле описываются соотношением $E = \pm \mu_B B$. Если система имеет только два энергетических уровня, для их равновесных относительных населенностей имеем

$$\frac{N_1}{N} = \frac{\exp\left(\frac{\mu_B B}{k_B T}\right)}{\exp\left(\frac{\mu_B B}{k_B T}\right) + \exp\left(-\frac{\mu_B B}{k_B T}\right)}, \quad \frac{N_2}{N} = \frac{\exp\left(-\frac{\mu_B B}{k_B T}\right)}{\exp\left(\frac{\mu_B B}{k_B T}\right) + \exp\left(-\frac{\mu_B B}{k_B T}\right)},$$

где N_1 , N_2 – населенности нижнего и верхнего уровней, $N = N_1 + N_2$ – полное число частиц в системе. Проекция суммарного магнитного момента частиц, находящихся в верхнем состоянии, на направление магнитного поля равна $-N_2\mu_B$, а магнитного момента частиц в нижнем состоянии: $+N_1\mu_B$. Результирующая намагниченность всех частиц, следовательно, равна

$$M = (N_1 - N_2)\mu_B = N\mu_B \operatorname{th} \left(\frac{\mu_B B}{k_B T} \right). \quad (4)$$

Если пренебречь внешним магнитным полем, то B следует заменить обменным полем B_E , что с учетом (1) дает

$$M_S = N\mu_B \operatorname{th} \left(\frac{\mu_B \lambda M_S}{k_B T} \right). \quad (5)$$

Решения уравнения (5), отвечающие $M_S \neq 0$, существуют лишь в интервале температур от 0 до $T_C = N\mu^2 \lambda / k_B$ (см. рис. 1). При увеличении температуры намагниченность непрерывно уменьшается и обращается в 0 при $M_S(T) \sim (T_C - T)^\beta$ ($\beta = 1/2$). Такое непрерывное изменение спонтанной намагниченности позволяет классифицировать переход парамагнетик–ферромагнетик как фазовый переход второго рода.

Доменная структура. При температурах ниже точки Кюри магнитные моменты в рамках микроскопически малых объемов выстроены в основном параллельно друг другу. Если же рассматривать образец в целом, то его макроскопическая намагниченность может оказаться значительно меньше, чем ожидаемая намагниченность насыщения, для достижения которой необходимо приложение внешнего магнитного поля.

Объяснение этому дал в свое время еще Вейсс, предположивший, что ферромагнитные образцы в магнитном отношении состоят из множества малых областей, называемых **доменами**. В каждом домене намагниченность равна намагниченности насыщения при данной температуре, однако направления векторов намагниченности разных доменов не обязательно параллельны друг другу. Таким образом, возрас-

тание магнитного момента образца под действием магнитного поля связано с двумя независимыми процессами: 1) в слабых внешних полях домены, векторы которых ориентированы "благоприятно" относительно направления поля, растут за счет "неблагоприятно" ориентированных доменов; 2) в сильных полях векторы намагниченности поворачиваются в направлении внешнего поля (рис. 2). Указанные процессы и определяют кривую технического намагничивания ферромагнетика.

Направление спонтанной намагниченности в доменах определяется взаимодействиями, которые ориентируют вектор намагниченности вдоль определенных кристаллографических направлений, называемых осями легкого намагничивания. Энергия, связанная с этими взаимодействиями, называется **энергией магнитной анизотропии**. Одна из причин магнитной анизотропии иллюстрируется схемой на рис. 3. Намагниченность кристалла "чувствует" кристаллическую решетку благодаря перекрытию электронных орбит. Споровые моменты взаимодействуют с орбитальными моментами из-за наличия спин-орбитальной связи, а орбитальные моменты в свою очередь взаимодействуют с кристаллической решеткой за счет существующих в ней электростатических полей и перекрытия волновых функций соседних атомов решетки.

Происхождение доменов легко понять из рассмотрения схематических структур, показанных на рис. 4. Каждая из схем представляет поперечное сечение ферромагнитного монокристалла. На схеме а) мы имеем отдельный домен, магнитные полюсы, образовавшиеся на противоположных гранях кристалла, приводят к большой величине магнитной

энергии, равной $\int \frac{B^2}{8\pi} dV$. Плотность магнитной энергии для схемы а) – порядка $M_s^2 \approx 10^6$ эрг/см³. На схеме б) магнитная энергия примерно вдвое меньше, чем в случае а), так как исходный домен разделен теперь на два домена с противополо-

ложной намагниченностью. Схема в) и подобные ей, где происходит разделение на N доменов, отвечают дальнейшему уменьшению магнитной энергии как минимум в N раз по сравнению со схемой а).

Доменные структуры на схемах г) и д) имеют нулевую магнитную энергию. Здесь границы замыкающих доменов, имеющих форму трехгранных призм вблизи концевых граней кристалла, образуют углы по 45° с намагниченностью своих доменов и с намагниченностью соседних (90° -е соседство). В такой структуре магнитный поток замыкается внутри кристалла. Наблюдаемые доменные структуры часто имеют гораздо более сложный характер, чем в описанных выше простых примерах, но их образование всегда связано с уменьшением энергии системы и переходом от конфигурации насыщения, обладающей большой магнитной энергией, к некоторой доменной конфигурации с меньшей энергией.

Аморфное состояние вещества. В кристаллических веществах все атомы расположены упорядоченным образом с формированием кристаллической решетки. Эквивалентность атомов и их локального окружения позволяет в значительной степени упростить теоретическое описание физических свойств кристаллического состояния вещества. Вместе с тем изготовление бездефектных кристаллов требует, как правило, высокой технологии, что приводит к необходимости анализа влияния дефектов (вакансий, примесей, межкристаллитных границ и т.д.) на физические характеристики кристалла. Кроме этого, сохранение кристаллического порядка существенно ограничивает диапазон варьирования физических свойств кристалла, например, путем легирования (введения примесей) исходного вещества.

В противоположность кристаллическим твердотельным объектам аморфными называют такие вещества, в которых атомы распределены неупорядоченно. Типичным представителем такого рода веществ, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, является стекло. При рассеянии аморфным веществом характеристического рентгеновского излуче-

ния вместо отчетливых дебаевских колец на рентгенограмме появляется размытое гало. Из неравномерной интенсивности этого гало можно заключить, что хотя расположение атомов, соседствующих с отдельно взятым атомом, и является нерегулярным, оно все же отвечает некоторому вероятностному распределению. Таким образом, в аморфной фазе длины связей и углы между ними сохраняются в несколько деформированном виде в сравнении с идеальным расположением ближайших атомов, отвечающем кристаллическому состоянию.

Для получения аморфных материалов применяются самые различные способы, в том числе закалка из расплава, напыление на охлаждаемую подложку, электроосаждение, ионно-плазменное распыление и т.д. Чтобы приготовленные указанными способами аморфные вещества сохраняли стабильность своих свойств во времени, часто необходимо вводить в них от 10% до 20% таких элементов, как В, С, N, Si, Р, которые в свою очередь могут влиять на их физические свойства.

Магнитные свойства аморфных веществ представляют интерес, по крайней мере, с двух точек зрения. Во-первых, интересно выяснить влияние разупорядочения на магнитные свойства атомов и, таким образом, установить, нет ли специфического влияния аморфного состояния на магнитные свойства вещества в сравнении с влиянием структуры кристалла на его магнитные свойства. Во-вторых, аморфное вещество в макроскопическом смысле является однородным. Известно, что некоторые магнитные свойства материала, в частности ход кривой технического намагничивания, являются структурно-чувствительными характеристиками. Исследования кристаллических образцов часто требуют изготовления монокристаллов высокого качества с применением высокоразвитой технологии. Между тем, если считать монокристаллы совершенными, то аморфные вещества, являющиеся по контрасту с ними верхом несовершенства, можно все-таки называть однородными в магнитном отношении. Такое их свойство любопытно не только само по себе, но и, безусловно,

важно с практической точки зрения. При этом к достоинствам аморфных материалов можно отнести их механическую прочность, технологичность и сравнительно широкий диапазон варьирования состава – качества, которые косвенно стимулируют интерес к их изучению.

Цель данной работы – определить основные характеристики и выявить особенности ферромагнитного состояния аморфного сплава $\text{Fe}_{0,75}\text{Cr}_{0,1}\text{B}_{0,15}$. Для этого в работе предлагается провести исследование температурной и полевой зависимостей намагниченности изучаемого образца.

Экспериментальная установка. Для измерения намагниченности образцов в данной работе используется магнитометр с вращающимся образцом (рис. 5). Образцы исследуемого вещества 1 помещаются в ампулы 2, которые в свою очередь крепятся симметрично на валу электродвигателя 3. При вращении вала поле рассеяния, обусловленное намагниченностью вращающегося образца, создает переменный магнитный поток в расположенных поблизости двух парах измерительных катушек 4. Переменное напряжение, индуцируемое в катушках, пропорционально намагниченности образца. Нагреватель 5 ($R = 20 \text{ Ом}$) предназначен для изменения температуры рабочего объема. Температура образца при этом контролируется образцовым платиновым термометром сопротивления 6, расположенным в непосредственной близости к образцам в рабочем объеме магнитометра. Постоянное магнитное поле создает катушка-соленоид 7, при этом цепь водяного охлаждения 8 служит для защиты соленоида и от перегрева.

Управление высокотемпературным магнитометром и регистрация данных осуществляется при помощи автоматизированного лабораторного комплекса модели АЛКМ-1 (производство ООО «Криотэл»), включающего блок усиления и детектирования сигнала, блок регистрации и управления температурой, блок управления магнитным полем, блок стабилизации частоты вращения двигателя и персональный компьютер на базе процессора AMD. Блок-схема автомати-

зированного комплекса АЛКМ-1 приведена на рис. 6. Для обеспечения стабильности вращения вала электродвигателя в процессе эксперимента используется схема стабилизации частоты вращения, состоящая из преобразователя "частота-напряжение" и источника тока двигателя с отрицательной обратной связью (рис. 6). При отклонении частоты вращения вала от эталонной блок стабилизации частоты вращения компенсирует уменьшение (увеличение) частоты соответствующим увеличением (уменьшением) напряжения питания электродвигателя. Переменное напряжение, генерируемое парой светодиод-оптический диод при вращении диска с прорезями, также используется для измерения частоты сигнала, оптоэлектронного датчика частоты блока стабилизации, при этом изменение эталонного напряжения в цепи обратной связи позволяет менять частоту вращения вала в пределах от 20 до 24 Гц.

Измеряемый переменный сигнал с выхода приемных катушек подается на вход прецизионного усилителя переменного напряжения с регулируемым коэффициентом усиления (1, 10, 100 и 1000). Детектированный сигнал, пропорциональный намагниченности образца, подается на 16-битный аналогово-цифровой преобразователь АЦП1 (рис. 6), после чего информация об амплитуде поступает на контроллер порта RS232 и передается в компьютер. Постоянное магнитное поле в рабочем объеме магнитометра создается при помощи соленоида, питаемого от программируемого источника тока (максимальный ток 200 мА). Коэффициент соленоида равен 82 мТл/А.

Измерение температуры образца осуществляется при помощи образцового платинового термометра сопротивления ($R(273,15\text{ K}) = 100\text{ Ом}$) на постоянном токе 100 мкА. Высокая точность измерения температуры (на уровне 0,02-0,03 К) достигается путем использования схемы на основе 16-битного аналогово-цифрового преобразователя АЦП2 (рис. 6). Температура образца визуально контролируется на дисплее модуля регистрации и управления температурой

комплекса АЛКМ-1. Перестройка температуры осуществляется изменением величины тока через нагреватель (0–2 А) с использованием программируемого источника тока на основе 16-битного цифроаналогового преобразователя ЦАП2 (рис. 6). Цепь водяного охлаждения подсоединена к водопроводу.

Основные элементы и органы управления автоматизированным лабораторным комплексом модели АЛКМ-1 показаны на рис. 7.

Для управления комплексом АЛКМ-1 используется программное обеспечение, разработанное на базе пакета LabWindows CVI 8.1 (National Instruments), которое позволяет регулировать токи соленоида и нагревателя, включая изохронные режимы развертки, переключать коэффициенты усиления сигнала, осуществлять сбор и запись данных на жесткий диск, а также представлять экспериментальные данные на графике в режиме реального времени.

Диалоговое окно программы «Магнитометр» изображено на рис. 8. На панели «Сигнал, мВ» отображается текущее значение сигнала с приемных катушек, а также текущее значение коэффициента усиления блока детектирования сигнала. Коэффициент усиления сигнала можно установить как из диалогового окна программы, так и при помощи кнопок переключения коэффициента усиления (поз. 12 рис. 7). На панелях «Температура, К» и «Магнитное поле, мТл» выводятся значения указанных параметров, а также текущие значения токов нагревателя и соленоида. Опция «X» позволяет выбрать один из указанных параметров для графического представления данных. Переключатели «Авто/Вручную» предназначены для переключения между режимами автоматической развертки токов нагревателя и соленоида (с изохронным изменением мощности нагревателя мВт/с и тока соленоида мА/с) и ручной установки указанных параметров при помощи кнопок «Установить». В последнем случае активируется дополнительное окно диалога. Программное изменение режимов развертки возможно только в автоматическом

режиме управления комплекса АЛКМ-1 при включенных индикаторах 13 и 21 (рис. 7). Переключатели «Авто/Вручную» активируются при включении опции «Х».

В правой части диалогового окна программы «Магнитометр» изображается график экспериментальных данных. Расположенные вблизи осей окна позволяют изменять масштаб осей. Режим «Авто» включает автоматическое определение масштаба по максимальному и минимальному значениям соответствующих данных, режим «Макс» устанавливает значения, определяемые инициализационным файлом (доступ к файлу ограничен преподавателем). Ручная установка масштаба осей ординат и абсцисс осуществляется вводом максимального/минимального значений в окна, расположенные рядом с осями. Кнопка «Очистить график» удаляет предыдущие данные из графического окна. Выбор цвета осуществляется при помощи палитры, активирующейся при нажатии опции «Цвет».

Имя файла, в который записываются данные, вводится в дополнительном диалоговом окне, активируемом при нажатии кнопки «Обзор...». Запись данных в файл осуществляется только при включенной опции «Вкл», при этом строка с именем файла выделяется розовым цветом. Данные в файл записываются в следующем формате: 1 столбец – намагниченность (В), 2 столбец – магнитное поле (мТл), 3 столбец – температура (К), 4 столбец – время с момента включения программы (с).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Внимательно ознакомьтесь с описанием лабораторной работы.
2. Включите приборы лабораторного комплекса и компьютер.
3. Запустите программу «Магнитометр».
4. Ознакомьтесь с основными органами управления лабораторного комплекса и активными элементами диалого-

вого окна программы.

5. Установите тумблер переключения режима развертки тока соленоида в положение «ручной». Введите постоянное магнитное поле (ток через соленоид $\sim 50 \div 200$ мА), контролируйте появление сигнала на дисплее «Намагниченность, В». Убедитесь, что детектируемый сигнал коррелирует с изменением магнитного поля. Выберите оптимальный коэффициент усиления.

6. При постоянном значении магнитного поля (ток через соленоид $\sim 50 \div 200$ мА) измерьте зависимость амплитуды сигнала $M[V]$ от частоты вращения двигателя $\nu[\text{Гц}]$. Используя текстовый редактор Notepad, запишите зависимость $M(\nu)$ в файл. Постройте зависимость $M(\nu)$ в электронных таблицах OpenOffice. Сравните полученную зависимость с ожидаемым изменением $M(\nu)$. Установите фиксированную частоту вращения вала двигателя, запишите установленное значение в лабораторный журнал.

Измерение полевой зависимости намагниченности аморфного ферромагнетика $\text{Fe}_{0,75}\text{Cr}_{0,1}\text{B}_{0,15}$

1. Уменьшите в ручном режиме ток через соленоид до минимального значения.

2. Установите тумблер переключения режима развертки тока соленоида в положение «автоматический». Включите опцию «X» на панели «Магнитное поле, мТл». Задайте оптимальную скорость развертки тока через соленоид.

3. Введите имя файла и включите запись в файл. С помощью кнопок управления «>» и «<» зарегистрируйте зависимость $M(H)$ при увеличении и уменьшении магнитного поля. Для визуального сравнения данных рекомендуется изменять цвет при каждом изменении направления развертки магнитного поля.

4. Используя полученные данные $M(H)$, сделайте вывод об эффективных магнитных характеристиках исследуемого образца.

Измерение температурной зависимости намагниченности аморфного ферромагнетика $\text{Fe}_{0,75}\text{Cr}_{0,1}\text{B}_{0,15}$

1. Установите тумблер переключения режима развертки тока соленоида в положение «ручной». Введите в ручном режиме постоянное магнитное поле (ток через соленоид $\sim 50\div 200$ мА). Выберите оптимальный коэффициент усиления.

2. Откройте кран водяного охлаждения магнитометра **(под контролем преподавателя)**.

3. Введите имя файла и включите запись в файл.

4. Установите тумблер переключения режима развертки тока нагревателя в положение «автоматический». Включите опцию «X» на панели «Температура, К». Используя в активном окне программы переключатель «Авто/Вручную» и кнопку «Установить», задайте начальное значение тока нагревателя ($\sim 0.5\text{--}0.9$ А). Проконтролируйте начало роста температуры в рабочем объеме магнитометра.

5. Исходя из расчетного времени эксперимента ($\sim 10\text{--}15$ минут), начального и конечного токов через нагреватель и сопротивления нагревателя 20 Ом, рассчитайте скорость изменения мощности нагревателя. Введите полученное значение в диалоговое окно «развертка». Включите автоматическую развертку тока через нагреватель нажатием кнопки «>».

6. После перехода образца в парамагнитное состояние и при достижении максимальной температуры ($\sim 100\text{--}120$ °С) запишите изменение намагниченности с уменьшением температуры (включается нажатием кнопки «<<»). Для удобства визуального сравнения экспериментальных кривых нагрева-охлаждения рекомендуется изменить цвет при изменении направления развертки тока нагревателя.

7. После достижения комнатной температуры остановите запись данных в файл и перекройте линию водяного охлаждения.

8. Уменьшите до нулевых значений токи через соленоид и нагреватель.

9. Выключите приборы.

10. Сохраните данные на съемный носитель, выключите компьютер.

Обработка и анализ результатов

1. Постройте график полевой зависимости намагниченности $M[B] = f(H[\text{мТл}])$. Оцените амплитуду гистерезиса полевой зависимости намагниченности, а также значения остаточной намагниченности и коэрцитивной силы аморфного ферромагнетика $\text{Fe}_{0,75}\text{Cr}_{0,1}\text{B}_{0,15}$.

2. Постройте график температурной зависимости намагниченности $M[B] = f(T[\text{К}])$. Определите температуру Кюри T_C . Используя полученное значение T_C , оцените величину обменного поля B_E в исследуемом веществе. Сравните наблюдаемое поведение намагниченности аморфного ферромагнетика $\text{Fe}_{0,75}\text{Cr}_{0,1}\text{B}_{0,15}$ с теоретическими зависимостями $M_S(T) \sim (T_C - T)^\beta$, предсказываемыми в приближении среднего поля ($\beta = 1/2$) и в модели Гейзенберга ($\beta = 1/2$), а также с результатами численного решения уравнения $m = \text{th}(m/t)$ (таб. 1).

3. Объясните возможные причины наблюдаемых аномалий температурной зависимости намагниченности исследованного в данной работе аморфного ферромагнетика:

- плато на кривой $M(T)$ в окрестности комнатной температуры;
- размытия особенности на кривой $M(T)$ в окрестности точки Кюри;
- температурного гистерезиса зависимости $M(T)$ в окрестности температур вблизи T_C .

Вопросы при подготовке к выполнению лабораторной работы

- 1) Опишите качественное различие кристаллического и аморфного состояний вещества.
- 2) На какие классы делятся вещества по своим магнитным свойствам?
- 3) Какое взаимодействие приводит к возникновению спонтанной намагниченности в ферромагнитном состоянии?
- 4) На чем основаны различные методики измерения магнитных свойств конденсированных сред?

Вопросы для сдачи лабораторной работы

- 1) Как зависят от температуры основные характеристики ферромагнетика?
- 2) Что приводит к образованию доменной структуры в ферромагнитном состоянии?
- 3) Объясните процесс намагничивания ферромагнетика. Чем обусловлен полевой гистерезис на кривой намагничивания?
- 4) Как влияет аморфная структура вещества на его магнитные свойства?

СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вонсовский С.В.* Магнетизм. — М.: Наука, 1971, главы 17–20, 23.
2. *Киттель Ч.* Введение в физику твердого тела. — М.: Наука, 1978.
3. *Боровик Е.С., Еременко В.В., Мильнер А.С.* Лекции по магнетизму. — М.: Физматлит, 2005.
4. *Тикадзуми С.* Физика ферромагнетизма: Магнитные свойства вещества. — М.: Мир, 1983.
5. *Кринчик Г.С.* Физика магнитных явлений. — М.: МГУ, 1985.

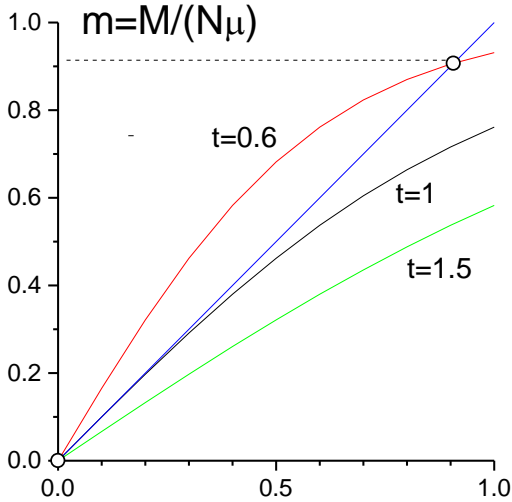


Рис. 1. Графическое решение уравнения $m = \text{th}(m/t)$, полученного из уравнения (5) заменой переменных $m = M/N\mu$, $t = T/T_C$

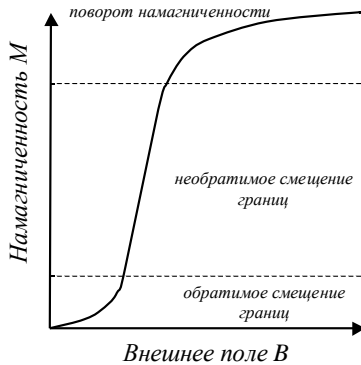
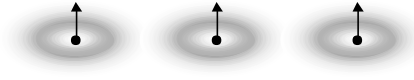
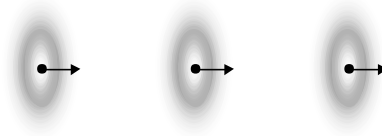


Рис. 2. Типичная кривая технического намагничивания ферромагнетика



а)



б)

Рис. 3. Ассиметрия перекрытия электронных оболочек соседних ионов как одна из причин кристаллографической магнитной анизотропии. Вследствие спин-орбитального взаимодействия распределение электронного заряда несферическое. Ассиметрия связана с направлением спина, поскольку изменение направления спина по отношению к осям кристалла изменяет обменную энергию, а также электростатическую энергию взаимодействий распределений заряда пар атомов

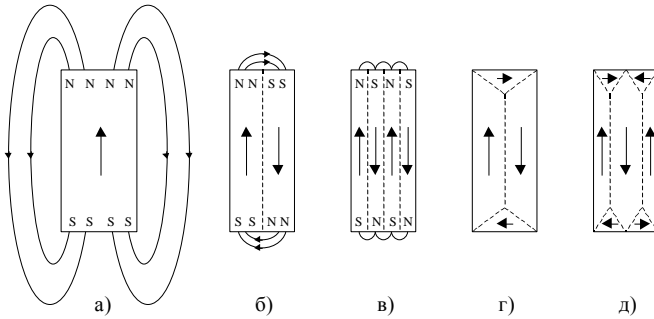


Рис. 4. Доменная структура ферромагнетиков

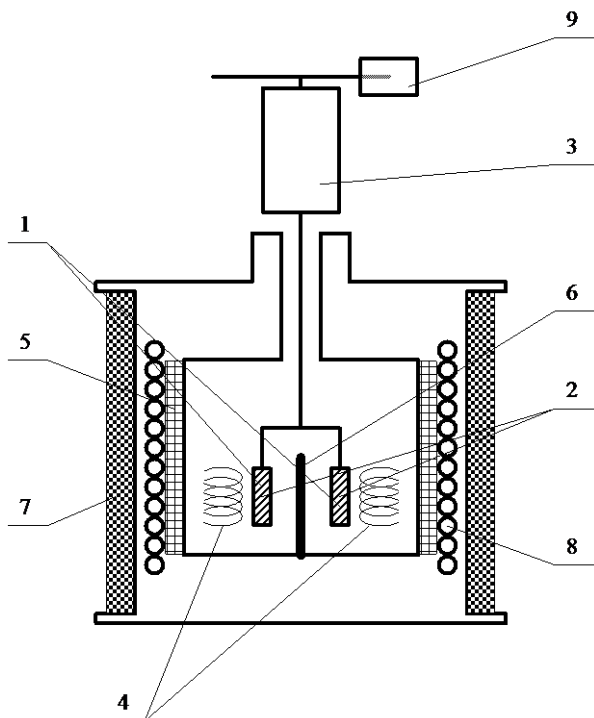


Рис. 5. Схема высокотемпературного магнитометра (обозначения в тексте)

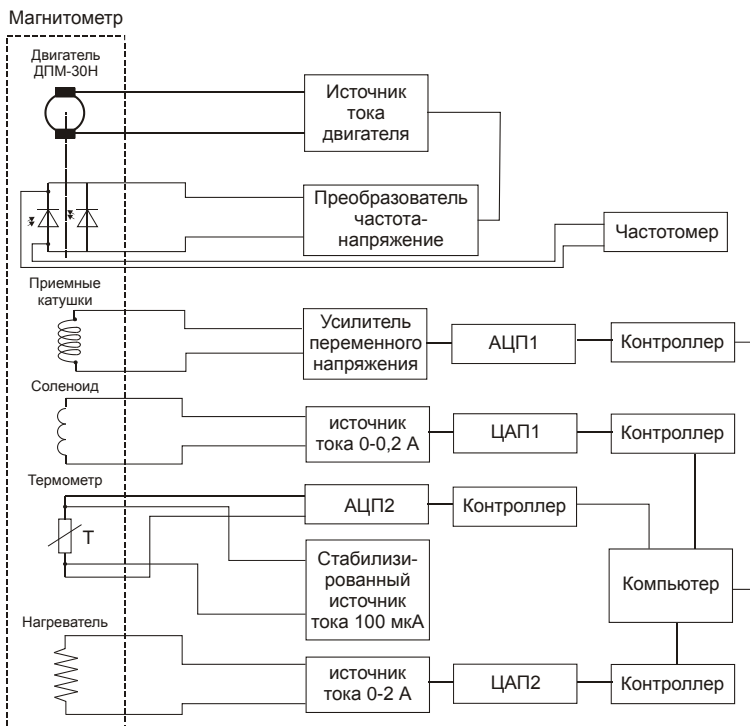


Рис. 6. Блок-схема автоматизированного лабораторного комплекса модели АЛКМ-1

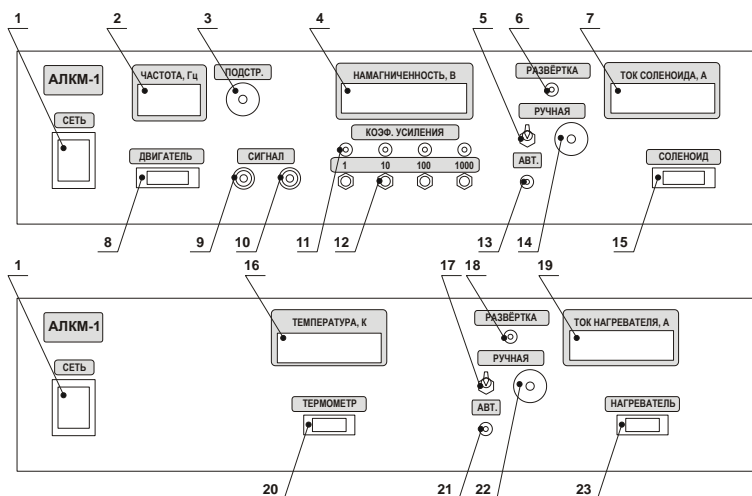


Рис. 7. Основные элементы и органы управления автоматизированным лабораторным комплексом модели АЛКМ-1

1. Выключатель питания
2. Цифровое табло частоты
3. Ручка подстройки частоты вращения вала двигателя
4. Цифровое табло намагниченности (значения в В)
5. Тумблер переключения режима развертки тока соленоида (ручной/автоматический)
6. Индикатор ручного режима развертки тока соленоида
7. Цифровое табло тока соленоида (значения в А)
8. Разъем соединения с двигателем и оптопарой
- 9–10. Симметричный вход усилителя переменного напряжения
11. Индикаторы коэффициента усиления (4 шт.)
12. Кнопки переключения коэффициента усиления (4 шт.)
13. Индикатор автоматического режима развертки тока соленоида
14. Потенциометр ручного режима развертки тока соленоида
15. Разъем соединения с соленоидом
16. Цифровое табло температуры (значения в К)
17. Тумблер переключения режима развертки тока нагревателя (ручной/автоматический)
18. Индикатор ручного режима развертки тока нагревателя
19. Цифровое табло тока нагревателя (значения в А)

20. Разъем соединения с термометром
21. Индикатор автоматического режима развертки тока нагревателя
22. Потенциометр ручного режима развертки тока нагревателя
23. Разъем соединения с нагревателем

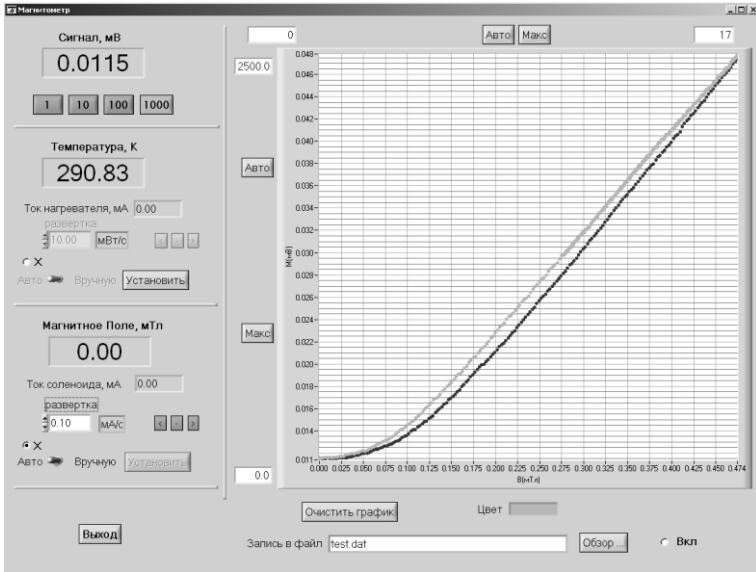


Рис. 8. Диалоговое окно программы «Магнитометр»

$T = T/T_C$	$m = M/M(0)$
1	0
0.98	0.24
0.96	0.34
0.94	0.42
0.92	0.48
0.9	0.52
0.88	0.57
0.86	0.61
0.84	0.65
0.82	0.68
0.8	0.71

Таб. 1. Численное решение уравнения $m = \text{th}(m/t)$