

669-669.2:537.312.62.396.67

ПАРАМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ МЕЙСНЕРА В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ БОРИДАХ РОДИЯ С МАГНИТНОЙ ПОДСИСТЕМОЙ И ПРИ ЕЕ ОТСУТСТВИИ

© 2024 г. С. А. Лаченков^{1, *}, В. А. Власенко^{1,2}, А. Ю. Цветков²,

М. А. Кононов^{1,3}

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Ленинский пр., 49, Москва, 119991 Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Ленинский пр., 53, Москва, 119334 Россия

³Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук, ул. Вавилова, 38, Москва, 119334 Россия

*e-mail: slachenkov@imet.ac.ru

Поступила в редакцию 01.11.2023 г.

После доработки 29.01.2024 г.

Принята к публикации 30.01.2024 г.

Исследованы полевые $M(H)$ и температурные $M(T)$ зависимости магнитного момента ряда сверхпроводящих боридов родия со структурой типа LuRu_4B_4 : «классического» сверхпроводника (YRh_4B_4), твердого раствора замещения с магнитным ионом ($\text{Y}_{0.8}\text{Dy}_{0.2}\text{Rh}_4\text{B}_4$), магнитных сверхпроводников ($\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ и $\text{HoRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$). На основе полученных данных проанализированы особенности парамагнитного эффекта Мейснера у этих соединений. Показано, что парамагнитный эффект Мейснера может возникнуть как под влиянием собственной магнитной подсистемы сверхпроводника, так и посредством небольших добавок магнитных ионов к исходному «классическому» сверхпроводящему соединению.

Ключевые слова: сверхпроводимость, магнитные свойства, магнитные сверхпроводники, магнитные ионы, магнитная подсистема, парамагнитный эффект Мейснера, режим FC, режим ZFC

DOI: 10.31857/S0002337X24020059, EDN: LIQIXW

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что переход вещества в сверхпроводящее состояние характеризуется не только резким падением электропроводности (до нулевого значения), но и идеальным диамагнетизмом (эффектом Мейснера), т.е. полным выталкиванием внешнего магнитного поля из образца, если оно не превышает критического значения. Возникновение эффекта Мейснера следует из теории БКШ, причем этот эффект имеет чисто квантово-механическую природу и не может быть объяснен на основе уравнений Максвелла [1].

С открытием высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) был установлен интересный факт: в некоторых из таких ма-

териалов при переходе в безрезистивное состояние в магнитном поле проявлялся не традиционный диамагнетизм, а положительный магнитный момент (парамагнитный эффект Мейснера). Такой эффект был обнаружен на Bi -керамике – соединении со слоистой структурой, относящемся к ВТСП II рода [2]. Дальнейшие исследования показали, что парамагнитный эффект Мейснера имеет место у ниобиевых дисков [3] и даже у алюминия – сверхпроводника I рода [4]. Отметим, что положительный магнитный момент сверхпроводники показывают в том случае, если охлаждение (ниже T_c) происходит во внешнем магнитном поле (режим FC). С другой стороны, при охлаждении образца в отсутствие внешнего поля с последующим отогревом при включенном

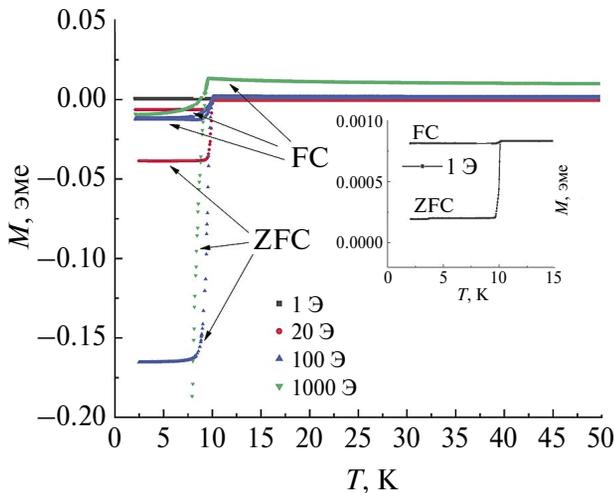


Рис. 1. Зависимости $M(T)$ в полях 1, 20, 100, 1000 Э для образца YRh_4B_4 в режимах FC и ZFC.

магнитном поле (режим ZFC) возникает отрицательный магнитный момент. В рамках традиционных теоретических представлений такое поведение магнитного момента образца характерно не для сверхпроводника, а для идеального проводника [1].

Из статьи [5] следует, что особенности парамагнитного эффекта Мейснера в случае Bi -керамики (например, ВТСП $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$) связаны с микроструктурой исследуемых материалов. Образцы I типа, синтезированные реакционным спеканием, имели пористую структуру с типичным размером зерна $\sim 1-4$ мкм, тогда как образцы II типа, полученные литьем из расплава, имели зерна значительно более крупные и плотно упакованные. В случае образцов I типа в режиме FC имел место частичный эффект Мейснера, тогда как для образцов II типа проявлялся парамагнитный отклик. Таким образом, микроструктура образцов оказывает существенное влияние на характер и тип эффекта Мейснера. Отметим, что до недавнего времени только критические токи массивных сверхпроводников относили к структурно чувствительным параметрам [1].

В настоящее время существуют два принципиальных подхода [5], которые позволяют объяснить возникновение парамагнитного эффекта Мейснера.

Первый базируется на наличии в образце сверхпроводящих гранул, между которыми существуют джозефсоновские связи с

отрицательными энергиями (π -контакты). В джозефсоновских петлях, составленных из таких контактов, генерируются незатухающие токи, приводящие к появлению спонтанных орбитальных моментов, совпадающих по направлению с внешним магнитным полем.

Второй подход заключается в том, что сверхпроводящий образец может захватывать магнитный поток с последующим сжатием его в гигантский вихрь по мере уменьшения температуры. Идея захвата потока внутри сверхпроводящего образца и его последующего сжатия в гигантский вихрь является более простым и общим объяснением причины возникновения парамагнитного эффекта Мейснера, который охватывает широкий круг явлений.

Первоначально парамагнитный эффект Мейснера был подробно исследован и теоретически интерпретирован только у обычных сверхпроводников, в то время как сверхпроводники с собственной магнитной подсистемой (магнитные сверхпроводники) оставались вне поля зрения.

Как известно [6], магнитные сверхпроводники — это вещества, обладающие одновременно магнитными и сверхпроводящими свойствами. К таким объектам относятся сложные бориды родия с общей химической формулой RRh_4B_4 (где R — редкоземельный металл) [7–9]; железосодержащие сверхпроводники систем 1144 ($EuRb/CsFe_4As_4$) [10, 11], системы 122 $EuFe_2(As_{0.7}P_{0.3})_2$ [12]; семейство RNi_2B_2C с магнитными атомами [13–15]. Магнитная подсистема таких материалов в ряде случаев может радикально изменить их сверхпроводящие характеристики. Особенно интересны с этой точки зрения сложные бориды родия с широким спектром физических свойств, исследование которых остается актуальным и в настоящее время [16, 17].

В работе [18] было показано, что магнитная подсистема $Dy_{0.8}Y_{0.2}Rh_4B_4$ приводит к нарушению стандартного параболического хода кривой верхнего критического магнитного поля ($B_{c2}(T)$), отклонению величины энергетической щели ($\Delta(0)$) от значений,

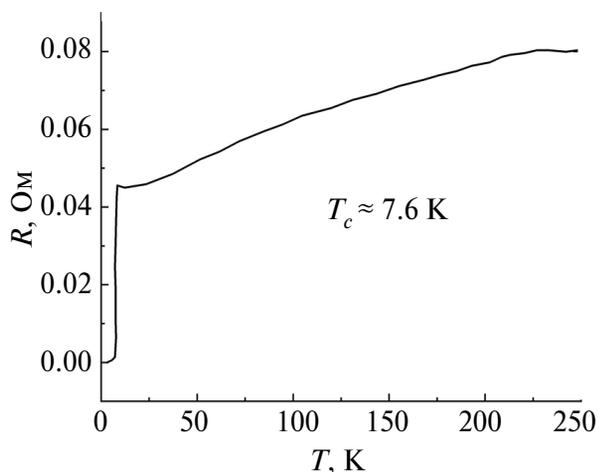


Рис. 2. Температурная зависимость электросопротивления для образца $Y_{0.8}Dy_{0.2}Rh_4B_4$.

предсказываемых теорией БКШ, и ряду других аномалий.

Не так давно были выполнены измерения критических токов (j_c) у магнитного сверхпроводника $HoRh_{3.8}Ru_{0.2}B_4$ [19]. Интерес к таким исследованиям был инициирован результатами работы [20], согласно которым магнитные области могут давать дополнительные центры пиннинга в сверхпроводнике. Оказалось, что закон «подобия», который как правило выполняется для обычных сверхпроводников, нарушается в случае магнитных [19]. Таким образом, к числу ранее установленных аномалий в сверхпроводниках с магнитной подсистемой добавилась еще одна, связанная с поведением их критических токов. В ряду таких аномалий наблюдаемый парамагнетизм в сверхпроводниках с собственной магнитной подсистемой — это еще один фрагмент, дополняющий и расширяющий картину наших представлений о взаимовлиянии сверхпроводимости и магнетизма.

Недавно авторы [21] наблюдали парамагнитный эффект Мейснера в искусственно созданной ферромагнитно-сверхпроводящей периодической структуре. В свою очередь в работе [22] этот эффект был обнаружен и исследован у сверхпроводника с собственной магнитной подсистемой $DyRh_{3.8}Ru_{0.2}B_4$, причем переход борида в сверхпроводящее состояние происходил на фоне положительного магнитного момента, обусловленного

магнитной подсистемой (переход образца $DyRh_{3.8}Ru_{0.2}B_4$ в ферромагнитное состояние происходит при $T_m \sim 45$ К). Важно, что суммарный положительный момент магнитной подсистемы, сформированный в режиме FC, перекрывает вклад от диамагнитного эффекта Мейснера.

Представляется весьма важным расширить представления о парамагнитном эффекте Мейснера, а также проанализировать особенности поведения $M(T)$ магнитных сверхпроводников в режимах FC и ZFC в магнитных полях выше первого критического, включив в круг рассматриваемых объектов сложные бориды родия, сочетающие сверхпроводимость и магнетизм, а также их сверхпроводящие изоструктурные аналоги, у которых магнитная подсистема отсутствует.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Сложные бориды родия RRh_4B_4 были синтезированы из смеси порошков иттрия, диспрозия, гольмия, родия, рутения и бора с чистотой не хуже 99.93%. Размер частиц порошка не превышал 40 мкм. Порошки иттрия, диспрозия и гольмия были приготовлены из дистиллированных редкоземельных металлов. Дистилляция металлов была выполнена в лаб. 12 ИМЕТ РАН по методикам, описанным в [23]. Необходимые порошки, взятые в требуемых количествах, тщательно перемешивали в агатовой ступке с добавлением ацетона, затем из них прессовали цилиндры. Синтез проводился прямым сплавлением исходных компонентов в контролируемой аргоновой атмосфере под давлением. Для кристаллизации соединений в структуре типа $LuRu_4B_4$, которая благоприятна для сосуществования сверхпроводимости и магнетизма, некоторое количество Rh замещали на Ru.

Удельное электросопротивление образцов измеряли обычным четырехконтактным методом при температурах от 1.6 до 250 К.

Зависимости магнитного момента образцов от поля и температуры измеряли на универсальном приборе PPMS-9 фирмы Quantum Design.

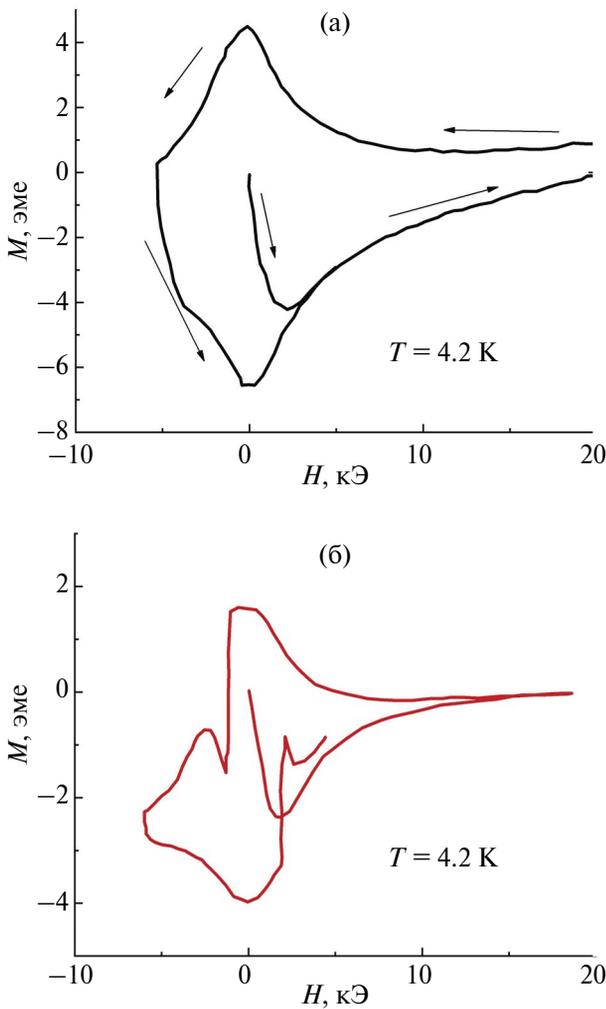


Рис. 3. Фрагменты зависимостей магнитного момента от поля при 4.2 К для YRh_4B_4 (а) и $\text{Y}_{0.8}\text{Dy}_{0.2}\text{Rh}_4\text{B}_4$ (б).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве объектов исследования были выбраны сверхпроводящие соединения: YRh_4B_4 , $\text{Y}_{0.8}\text{Dy}_{0.2}\text{Rh}_4\text{B}_4$, $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ и $\text{HoRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$. Все эти соединения были практически однофазными и состояли из фазы типа LuRu_4B_4 с тетрагональной решеткой. Более подробно рентгеновские исследования этих образцов описаны в работах [19, 22]. Отметим, что сверхпроводящие бориды родия со структурой типа LuRu_4B_4 , содержащие атомы Y или R, были впервые представлены в работе [24].

Сверхпроводящий борид YRh_4B_4 (критическая температура сверхпроводящего перехода ~ 10 К, величина первого критического поля $\sim 120\text{--}150$ Э) кристаллизуется в струк-

туре типа LuRu_4B_4 . Важно, что у этого соединения нет магнитной подсистемы.

Зависимости магнитного момента от температуры ($M(T)$) для YRh_4B_4 в полях от 1 до 1000 Э представлены на рис. 1. Анализ зависимостей $M(T)$ показывает, что после сверхпроводящего перехода магнитный момент имеет отрицательную величину, а модуль разности M_{ZFC} и M_{FC} увеличивается по мере возрастания внешнего магнитного поля. Аналогичная картина наблюдалась для ранее упомянутого Bi-ВТСП, синтезированного реакционным спеканием [5]. Таким образом, величина парамагнитного отклика и поведение $M(T)$ в режимах FC и ZFC у YRh_4B_4 со структурой типа LuRu_4B_4 аналогичны другим немагнитным сверхпроводникам, для которых наблюдался парамагнитный эффект Мейснера.

Интересен случай сверхпроводника $\text{Y}_{0.8}\text{Dy}_{0.2}\text{Rh}_4\text{B}_4$, полученного на основе бориды YRh_4B_4 , в котором небольшое количество атомов Y замещено на Dy. У такого твердого раствора замещения критическая температура сверхпроводящего перехода понизилась до ~ 7.6 К (рис. 2) по сравнению с исходным YRh_4B_4 ($T_c \sim 10$ К), а величина первого критического поля составила $\sim 120\text{--}150$ Э, как у исходного YRh_4B_4 .

Известно [9], что введение даже небольшого количества парамагнитных примесей в сверхпроводник (~ 1 ат.%, а в отдельных случаях ~ 0.1 ат.%) может привести к существенной деградации его свойств. Это происходит вследствие обменного взаимодействия отдельных локализованных магнитных ионов и электронов проводимости. Такое взаимодействие может быть описано на основе гамильтониана вида

$$H_{\text{exc}} = 1/N \sum_j \Gamma(g-1) \left(\vec{\sigma} \vec{S}_j \right), \quad (1)$$

где Γ – обменный параметр, S_j – спин j -го локализованного момента, σ – спин электрона проводимости, N – полное число атомов в системе.

Сравнительный анализ петель гистерезиса образцов YRh_4B_4 и $\text{Y}_{0.8}\text{Dy}_{0.2}\text{Rh}_4\text{B}_4$ (рис. 3) показывает, что они во многом схожи и ти-

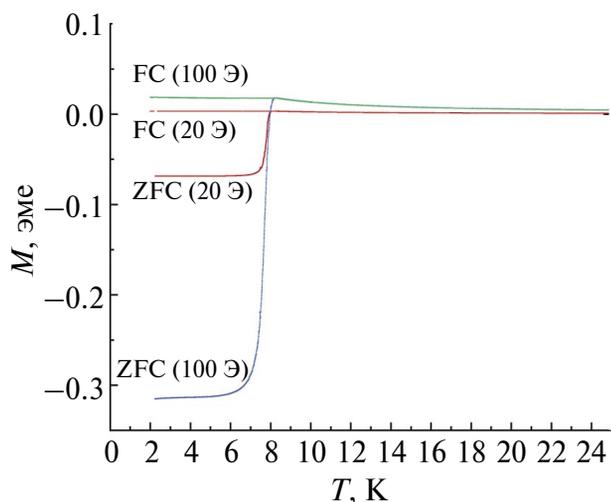


Рис. 4. Зависимости $M(T)$ для образца $Y_{0.8}Dy_{0.2}Rh_4B_4$ в полях 20 и 100 Э в режимах FC и ZFC.

пичны для немагнитных сверхпроводников. Таким образом, небольшие добавки Dy к YRh_4B_4 еще не позволяют сформировать хорошо выраженную магнитную подсистему, но значительно понижают T_c соединения из-за взаимодействия локализованных магнитных ионов и электронов проводимости.

На рис. 4 приведены результаты исследований зависимости $M(T)$ образца $Y_{0.8}Dy_{0.2}Rh_4B_4$ в режимах FC и ZFC (в полях 20 и 100 Э). Сравнительный анализ зависимостей $M(T)$ соединений YRh_4B_4 и $Y_{0.8}Dy_{0.2}Rh_4B_4$ в режимах FC и ZFC (при 20 и 100 Э) указывает на их существенное различие (рис. 1 и 4): в случае YRh_4B_4 магнитный момент всегда имеет диамагнитный отклик (при FC более слабый), тогда как у образца $Y_{0.8}Dy_{0.2}Rh_4B_4$ такой отклик наблюдался только в режиме ZFC. Как отмечалось выше, небольшие добавки Dy к YRh_4B_4 не позволяют сформироваться собственной магнитной подсистеме соединения. С другой стороны, ионы диспрозия в структуре $Y_{0.8}Dy_{0.2}Rh_4B_4$ образуют систему локализованных магнитных ионов, которые существенно влияют на характер $M(T)$ в режимах FC и ZFC и приводят к возникновению парамагнетизма в режиме FC ниже температуры сверхпроводящего перехода.

В работе [22] сообщалось о парамагнитном эффекте Мейснера у магнитного сверхпроводника $DyRh_{3.8}Ru_{0.2}B_4$ в полях ~ 20 Э. В настоящей работе были продолжены

исследования этого соединения и выполнены измерения магнитного момента $M(T)$ в режимах FC и ZFC в более высоких магнитных полях (в полях 100 и 1000 Э) (рис. 5). Помимо «естественного» сдвига начала сверхпроводящего перехода $DyRh_{3.8}Ru_{0.2}B_4$ в область более низких температур, связанного с увеличением внешнего магнитного поля, можно отметить еще ряд важных моментов: возрастание величины $M(T)$ образца при повышении поля от 100 до 1000 Э; даже в режиме ZFC в приложенном внешнем магнитном поле ~ 1000 Э образец не проявлял диамагнетизма, хотя находился в сверхпроводящем состоянии. Сверхпроводящее состояние образца при таких условиях следует из анализа $B_{c2}(T)$ $DyRh_{3.8}Ru_{0.2}B_4$ при $T < 4$ К и $B < 0.2$ Тл [22].

Другой объект, у которого был исследован и проанализирован парамагнитный эффект Мейснера, — это магнитный сверхпроводник $HoRh_{3.8}Ru_{0.2}B_4$ (кристаллическая структура типа $LuRu_4B_4$) с критической температурой сверхпроводящего перехода $T_c \sim 6$ К, температурой магнитного перехода (парамагнетик \rightarrow ферромагнетик) $T_m \sim 20.4$ – 22.5 К и величиной первого критического поля ~ 70 – 80 Э.

Результаты измерений $M(T)$ $HoRh_{3.8}Ru_{0.2}B_4$, выполненные в полях от 1 до 1000 Э, представлены на рис. 6. Видно, что в поле 20 Э образец $HoRh_{3.8}Ru_{0.2}B_4$ показывает парамагнитный эффект Мейснера, аналогичный тому, что наблюдался у соединения $DyRh_{3.8}Ru_{0.2}B_4$. Расхождение кривых $M(T)$ образца $HoRh_{3.8}Ru_{0.2}B_4$ в режимах FC и ZFC (рис. 6) начинается при температурах ниже T_m , причем во всех случаях кривые FC идут выше ZFC, а величина магнитного момента повышается по мере увеличения поля от 20 до 1000 Э. Второй этап резкого расхождения кривых FC и ZFC начинается при температурах ниже T_c , когда ZFC резко идет вниз, а FC остается практически постоянной в полях до 100 Э либо идет вверх в случае более высоких магнитных полей (~ 1000 Э). Важно, что $M(T)$ $HoRh_{3.8}Ru_{0.2}B_4$ в режиме ZFC при температурах ниже T_c всегда показывает отрицательные значения (в отличие от образца $DyRh_{3.8}Ru_{0.2}B_4$ (рис. 5)), тогда как в режиме FC магнитный момент положителен.

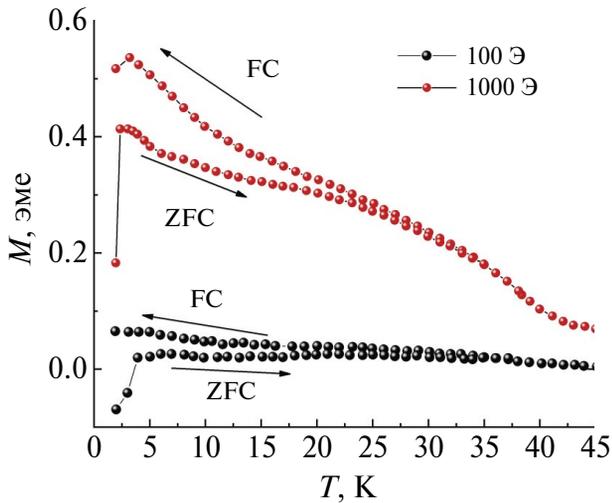


Рис. 5. Зависимости $M(T)$ для образца $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ в полях 100 и 1000 Э в режимах FC и ZFC.

Из сопоставления данных, представленных на рис. 5 и 6, а также результатов [22] следует, что поведение магнитного момента соединения $\text{HoRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ в основном аналогично тому, что наблюдалось у $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$. Важно отметить, что расхождение кривых FC и ZFC в случае сверхпроводников $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ и $\text{HoRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ начинается с перехода их собственной магнитной подсистемы из парамагнитного в ферромагнитное состояние. Хорошо известно, что подобным образом ведут себя кривые $M(T)$ обычных магнетиков [25, 26]. Второе резкое расхождение FC и ZFC у $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ и $\text{HoRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ происходит при температуре ниже T_c .

Из анализа работ [1–5] (обсуждались выше) следует, что парамагнитный эффект Мейснера существенно зависит от размерного и структурного факторов сверхпроводящих образцов. Теперь к таким факторам можно отнести магнитную подсистему сверхпроводника, а также небольшие добавки локализованных магнитных ионов, которые еще не формируют магнитную подсистему соединения, но обуславливают парамагнитный эффект Мейснера.

Если у обычных сверхпроводников расхождение кривых $M(T)$ в режимах FC и ZFC как правило наблюдается выше T_c , то в случае магнитных сверхпроводников это происходит в два этапа: первый связан с пе-

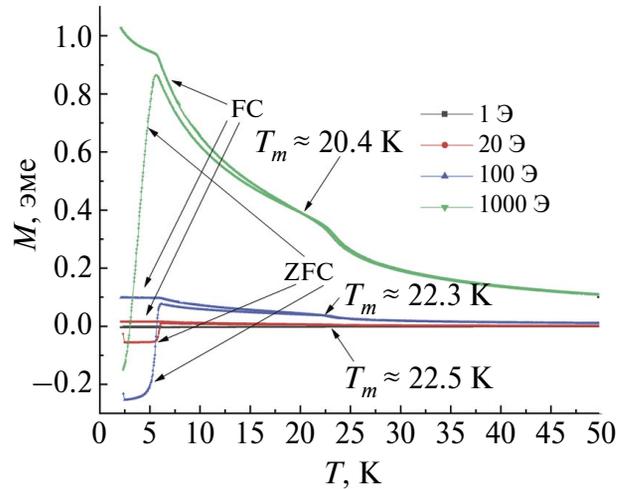


Рис. 6. Зависимости $M(T)$ в полях 1, 20, 100, 1000 Э для образца $\text{HoRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ в режимах FC и ZFC.

реходом их собственной магнитной подсистемы из парамагнитного в ферромагнитное состояние; второй наблюдается при температуре ниже сверхпроводящего перехода в виде резкого расхождения кривых FC и ZFC. Важно, что при наличии магнитной подсистемы переход в сверхпроводящее состояние в режимах FC и ZFC происходит из двух неэквивалентных состояний ее магнитного момента ($M_{FC} \neq M_{ZFC}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезирован ряд сверхпроводящих боридов родия со структурой типа LuRu_4B_4 : «классический» сверхпроводник (YRh_4B_4), твердый раствор замещения с магнитным ионом ($\text{Y}_{0.8}\text{Dy}_{0.2}\text{Rh}_4\text{B}_4$), магнитные сверхпроводники ($\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ и $\text{HoRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$). Исследованы полевые $M(H)$ и температурные $M(T)$ зависимости магнитного момента этих соединений.

Показано, что в случае «классического» сверхпроводника YRh_4B_4 магнитный момент $M(T)$ после сверхпроводящего перехода имеет отрицательную величину как в режиме FC, так и в режиме ZFC, при этом модуль разности $|M_{ZFC} - M_{FC}|$ увеличивается по мере возрастания внешнего магнитного поля. Поведение магнитного момента YRh_4B_4 подобно другим немагнитным сверхпроводникам.

Установлено, что твердый раствор замещения $Y_{0.8}Dy_{0.2}Rh_4V_4$ не имеет магнитной подсистемы. Однако диспрозий в структуре $Y_{0.8}Dy_{0.2}Rh_4V_4$ образует систему локализованных магнитных ионов, которые существенно влияют на характер $M(T)$ и приводят к парамагнетизму в режиме FC ниже температуры сверхпроводящего перехода.

Установлено, что ход кривых $M(T)$ в режимах FC и ZFC в случае магнитных сверхпроводников $DyRh_{3.8}Ru_{0.2}V_4$ и $HoRh_{3.8}Ru_{0.2}V_4$ практически одинаков. Расхождение кривых FC и ZFC начинается с перехода магнитной подсистемы соединений из парамагнитного в ферромагнитное состояние; второе резкое расхождение кривых происходит при температуре ниже T_c .

Показано, что парамагнитный эффект Мейснера может возникнуть как под влиянием собственной магнитной подсистемы сверхпроводника, так и посредством небольших добавок магнитных ионов к исходному «классическому» сверхпроводящему соединению.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Измерения проведены с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФИАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнялась по государственному заданию № 075-01176-23-00.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. М.: МЦНМО, 2000. 397 с.
2. Svedlindh K. Niskanen, Norling P., Nordblad P., Lundgren L., Lonnberg B., Lundstrom T. Anti-Meissner Effect in the BiSrCaCuO-System // Physica C: Supercond. 1989. V. 162–164. Part 2. P. 1365–1366.
3. Pust L., Wenger L.E. Detailed Investigation of the Superconducting Transition of Niobium Disks Exhibiting the Paramagnetic Meissner Effect // Phys. Rev. B. 1998. V. 58. № 2. P. 14191–14194.
4. Geim A.K., Dubonos S.V., Lok J.G.S., Henini M., Maan J.C. Paramagnetic Meissner Effect in Small Superconductors // Nature. 1998. V. 396. P. 144–146.
5. Li. Paramagnetic Meissner Effect and Related Dynamical Phenomena // Phys. Rep. 2003. V. 376. P. 133–223. doi:10.1016/S0370-1573(02)00635-X
6. Буздин А.И., Булаевский Л.Н., Кулич М.Л., Паниюков С.В. Магнитные сверхпроводники // УФН. 1984. Т. 144. Вып. 4. С. 597–641.
7. Chevrel R., Sargent M., Prigent J. Sur de Nouvelles Phases Sulfurées Ternaires du Molybdène // Solid State Chem. 1971. V. 3. № 4. P. 515–519.
8. Matthias B. T., Marezio M., Corenzwit E., Cooper A.S., Barz H.E. High-Temperature Superconductors, the First Ternary System // Science. 1972. V. 175. № 4029. P. 1465–1466.
9. Maple M.B., Fischer O. Superconductivity in Ternary Compounds II. Superconductivity and Magnetism. N.Y.: Springer, 1982. P. 308.
10. Liu Y. B., Liu Y., Cao G. H. Iron-Based Magnetic Superconductors $AEuFe_4As_4$ (A = Rb, Cs): Natural Superconductor–Ferromagnet Hybrids // J. Phys.: Condens. Matter. 2021. V.3 4. № 9. P. 093001.
11. Usman M., Zhou X., Malliakas C.D., Welp U. et al. Probing Phosphorus Solubility and Its Effect on Critical Temperature (T_c) in the Helical Superconducting Magnet $RbEuFe_4As_{4-x}P_x$ // Chem. Mater. 2023. V. 35. № 20. P. 8494–8501. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.3c01310>
12. Prando G., Torsello D., Sanna S., Graf M. J. et al. Complex Vortex-Antivortex Dynamics in the Magnetic Superconductor $EuFe_2(As_{0.7}P_{0.3})_2$ // Phys. Rev. B. 2022. V. 105. № 22. P. 224504. <https://doi.org/10.1103>
13. Wolowiec C. T., White B. D., Maple M. B. Conventional Magnetic Superconductors // Phys. C: Supercond. Appl. 2015. V. 514. P. 113–129.
14. Mazumdar C., Gupta L. C. Discovery of Superconducting Quaternary Y–Ni–B–C System, $T_c \sim 12$ K, and a Brief Review of Superconducting and Magnetic Properties of RNi_2B_2C // Supercond. Sci. Technol. 2022. V. 35.

- № 9. P. 094001. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac7dcc>
15. *Gundogdu S., Clancy J.P., Xu G., Zhao Y. et al.* Magnetic Order and Competition with Superconductivity in (Ho-Er)Ni₂B₂C // *Mater. Res. Express*. 2020. V.7. № 11. P.116002. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abc9>
16. *Jatmika J., Maruyama H., Rahman M. S., Sakai A., Nakatsuji S., Iyo A., Ebihara T.* Superconducting Properties of the Ternary Boride YRh₄B₄ // *Supercond. Sci. Technol.* 2020. V. 33. № 12. P. 125006. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/abbb18>
17. *Kurata K., Muranaka T.* Superconducting Properties of Pt-Type and Bct-Type YRh₄B₄ // *Supercond. Sci. Technol.* 2023. V. 36. № 8. P. 085005. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/acd7ac>
18. *Бурханов Г.С., Лаченков С.А., Хлыбов Е.П.* Особенности фазовых переходов магнитного сверхпроводника Dy_{0.8}Y_{0.2}Rh₄B₄ // *Металлы*. 2010. № 3. С. 79–83.
19. *Бурханов Г.С., Лаченков С.А., Власенко В. А. Хлыбов Е.П., Гаврилкин С. Ю.* Особенности магнитных свойств и критических токов сверхпроводящих боридов родия YRh₄B₄ и HoRh_{3.8}Ru_{0.2}B₄ // *Неорган. материалы*. 2021. Т. 57. № 7. С. 720-726. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21070022>
20. *Jung S.-G., Kang J.-H., Park E. et al.* Enhanced Critical Current Density in the Pressure-Induced Magnetic State of the High-Temperature Superconductor FeSe // *Sci. Rep.* 2015. V. 5. P. 16385. doi:10.1038/srep1638
21. *Никитенко Ю. В., Жакетов В. Д.* Магнетизм ферромагнитно-сверхпроводящих неоднородных слоистых структур // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2022. Т. 53. Вып. 6. С.1339–1400.
22. *Бурханов Г.С., Лаченков С.А., Хлыбов Е.П.* Парамагнитный эффект Мейснера у магнитного сверхпроводника DyRh_{3.8}Ru_{0.2}B₄ // *Перспективные материалы*. 2020. № 4. С. 5-10. <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2020-4-5-10>.
23. *Девярых Г.Г., Бурханов Г.С.* Высокочистые тугоплавкие и редкие металлы. М.: Наука, 1993. 223 с.
24. *Johnston D.C.* Superconductivity in a New Ternary Structure Class of Boride Compounds // *Solid State Commun.* 1977. V. 24. № 10. P. 699-702.
25. *Труханов С.В.* Особенности магнитного фазового расслоения в анион-дефицитном манганите La_{0.70}Sr_{0.30}MnO_{2.85} // *ФТТ*. 2011. Т. 53. Вып. 9. С. 1748-1753.
26. *Балаев Д.А., Красиков А.А., Балаев А.Д., Столяр С.В., Ладыгина В.П., Исаков Р.С.* Особенности релаксации остаточной намагниченности антиферромагнитных наночастиц на примере ферригидрита // *ФТТ*. 2020. Т. 62. Вып. 7. С. 1043-1049. <https://doi.org/10.21883/FTT.2020.07.49469.038>